$$B = k\frac{I}{r} \qquad (۱-۵)$$

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:

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

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

آمپر

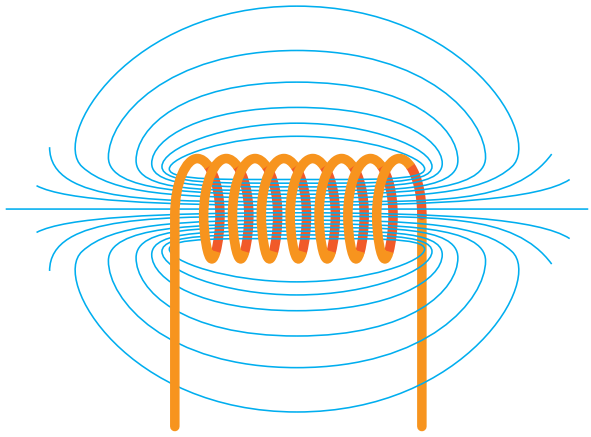
آندره آمپر در سال ۱۷۷۵ در شهر لیون فرانسه به دنیا آمد. در سال ۱۸۰۹ سمت استادی آنالیز و مکانیک پلی‌تکنیک را به‌دست آورد. وی در سال ۱۸۳۶ به دنبال کار مداوم که روح و تن او را خسته و فرسوده کرده بود در گذشت.

منبع www.wikipedia.com

۸ ـ ۱ ـ میدان مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

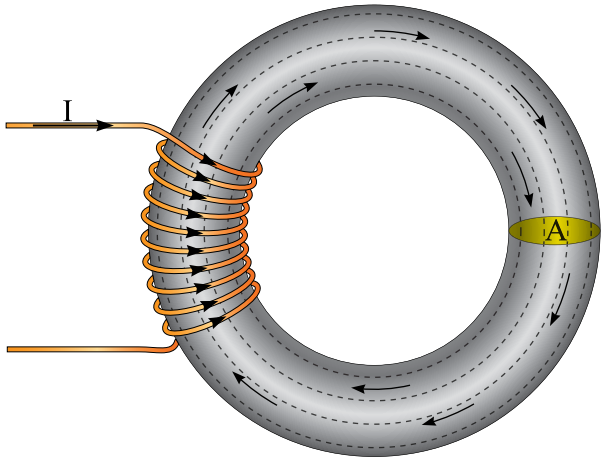
میدان مغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی در سرتاسر دو طرف هادی توزیع می‌شود و متمرکز نیست و مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در هر نقطه از اطراف هادی متغیر و کم است. اگر هادی حامل جریان الکتریکی به صورت سیم‌پیچ[۱] در آورده شود ضمن اینکه میدان الکترو مغناطیسی در درون سیم‌پیچ متمرکز می‌شود، چگالی فوران مغناطیسی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

۱. Winding



شکل ۱۴ ـ ۱

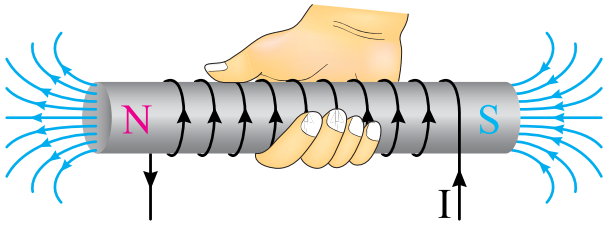
با قرار دادن سیم‌پیچ بر روی یک هسته از جنس مواد فرومغناطیس[1] مطابق شکل (۱۵ ـ ۱) و عبور جریان الکتریکی از آن، میدان الکترومغناطیسی با چگالی B بیش‌تری نسبت به سیم‌پیچ با هسته هوا ایجاد می‌شود. هسته فرومغناطیس باعث می‌شود، میدان الکترو مغناطیسی درون سیم‌پیچ متمرکزتر شود، لذا چگالی فوران مغناطیسی افزایش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



شکل ۱۵ ـ ۱

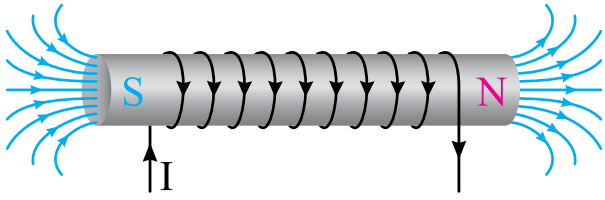
۹ ـ ۱ ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

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)

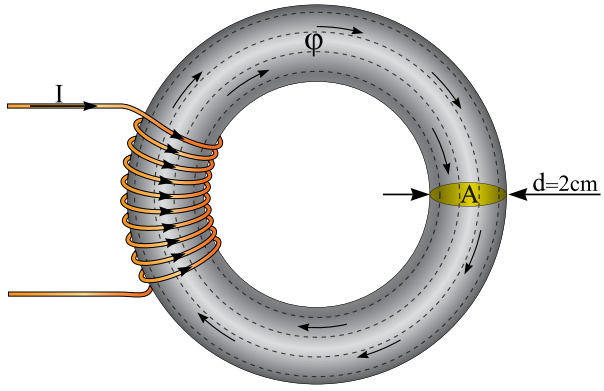


شکل ۱۷ ـ ۱

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 آهن‌ربای از خود نشان می‌دهند. آهن و آلیاژهای آهن، مواد فرومغناطیس هستند.

۲. Right-Hand Rule



شکل ۱۸ـ۱

حل:

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

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

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

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

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

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

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

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 ۱۹ـ۱

شکل ۲۰ـ۱

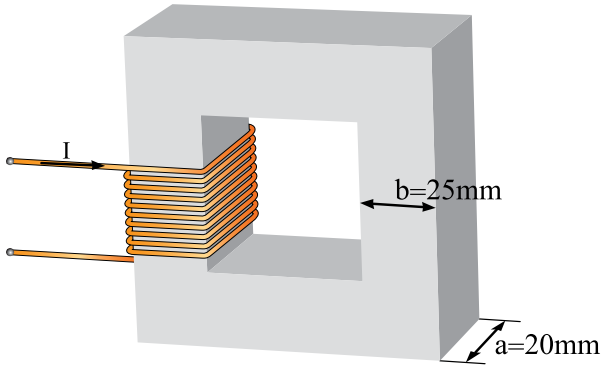
۳ـ میدان مغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی و سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی را با یک‌دیگر مقایسه کنید؟

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 G 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 (۱۳ 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.

$$\theta = NI \qquad (۱-۶)$$

در این رابطه:

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

N تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ بر حسب دور [T]

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؟

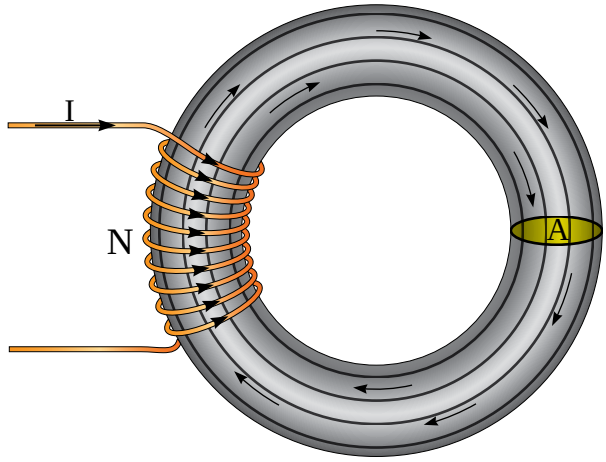
حل:

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

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 (۲۲ ـ ۱)

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 «شـــدت میدان مغناطیسی» گویند و آن را بـــا H نمایش می‌دهند و از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دســـت می‌آید.

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

در این رابطه:

H شدت میدان مغناطیســـی بر حسب آمپر دور بر متر $\left[\frac{AT}{m}\right]$

N تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ

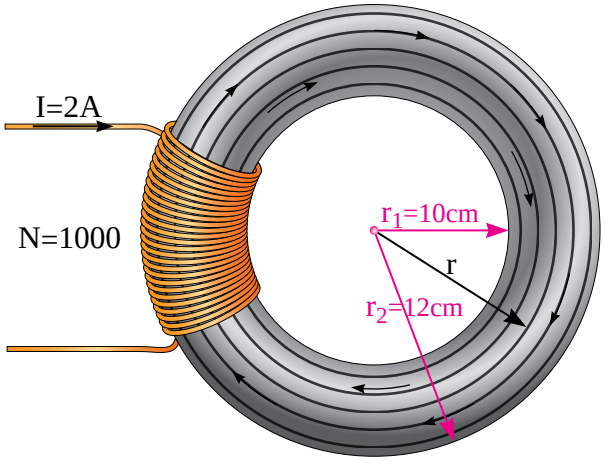
طول متوسط هسته بر حسب متر [m]

در رابطـــه (۷ ـ ۱) تعداد حلقه‌های ســـیم‌پیچ N و طول توسط هســـته ℓ_C مقادیر ثابت هستند و معمولاً این رابطه به‌صورت (۸ ـ ۱) نوشته می‌شود:

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

بـــا توجه به رابطـــه (۸ ـ ۱) در واقع شـــدت میدان مغناطیســـی H معیاری از اثر جریـــان الکتریکی برای ایجاد میدان مغناطیسی است.

مثال ۶ ـ ۱ ـ شـــــدت مـــــیدان مغناطیسی شکل (۲۳ ـ ۱) را به‌دست آورید.



شکل ۲۳ ـ ۱

حل:

ـ شـــدت میـــدان مغناطیســـی 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 شـــعاع متوسط هسته را به‌دست آورد:

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

ـ محیط دایره از رابطه مقابل 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 شـدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) قابل محاسبه است.

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

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 شـدت میدان مغناطیسی از رابطـه ..... به‌دست می‌آید.

پرسش‌های صحیح غلط

۱ ـ حاصل‌ضرب شـدت جریـان الکتریکی در تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی گویند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ نسـبت نیـروی محرکه مغناطیسـی به جریان الکتریکی سیم‌پیچ شدت میدان مغناطیسی نام دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش تشریحی

۱ ـ رابطه نیروی محرکه مغناطیسـی را بنویسـید و کمیت‌های آن را شرح دهید؟

۲ ـ شدت میدان مغناطیسی را تعریف کنید؟

تمرین ۳ ـ ۱

۱ ـ نیروی محرکه مغناطیسـی یک سیم‌پیچ ۱۰۰۰ دوری، ۲۰۰ AT است. شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ چند آمپر است؟

۲ ـ شـدت میـدان مغناطیسـی در هسته بـه طول ۲۰ cm برابر $\left[\frac{AT}{m}\right]$ ۲۰۰۰ اسـت. اگر سـیم‌پیچ این هسـته دارای ۴۰۰۰ دور باشد شـدت جریان الکتریکی آن چند آمپر است؟

۱۲ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی

نسـبت چگالی فوران مغناطیسی B به شدت میدان مغناطیسـی H را «ضریب نفوذ مغناطیسـی»[۱] تعریف مـی‌کننـد و آن را بـا μ نمایـش مـی‌دهند و از رابـطه (۹ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu = \frac{B}{H} \qquad (۹ ـ ۱)$$

در این رابطه:

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

B چـگالـی فـوران مـغناطیسـی بر حسـب وبر بر مترمربع $\left[\frac{wb}{m^۲}\right]$

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

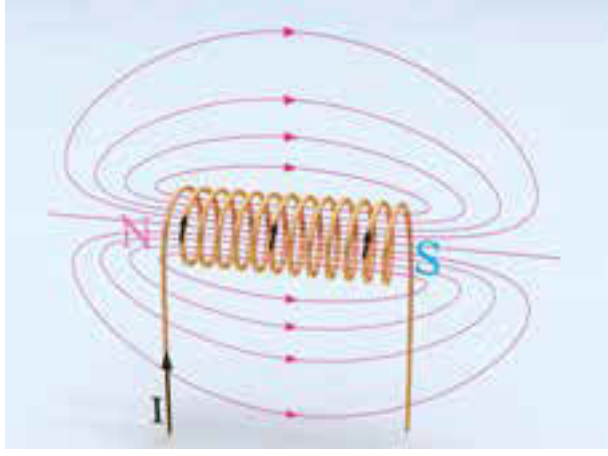
واحـد ضریب نفوذ مغناطیسـی μ از نسـبت واحدِ چگالـی میـدان مغناطیسـی $\left[\frac{wb}{m^۲}\right]$ به واحدِ شـدت میدان مغناطیسی $\left[\frac{A.T}{m}\right]$ به‌دست می‌آید.

۱. Permeability

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

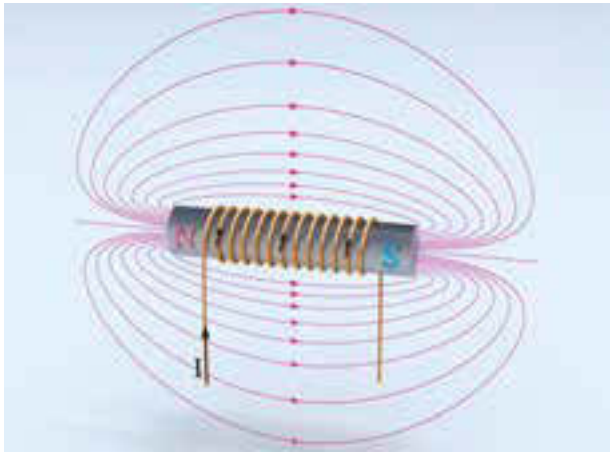
ضریب نفوذ مغناطیسی μ معیاری است که میزان گذردهی هسته را در مقابل خطوط نیروی مغناطیسی نشان می‌دهد. در یک شدت میدان مغناطیسی ثابت، هسته با ضریب نفوذ بزرگ‌تر خطوط نیروی میدان مغناطیسی بیش‌تری در خود جای می‌دهد. هرچه ضریب نفوذ هسته بزرگ‌تر باشد شدت میدان مغناطیسی H، چگالی فوران مغناطیسی B قوی‌تری در هسته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

$$H=\frac{NI}{\ell_C}=\frac{۱۰۰۰\times۰/۰۰۱}{۰/۲}=۵\left[\frac{A.T}{m}\right]$$

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

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

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

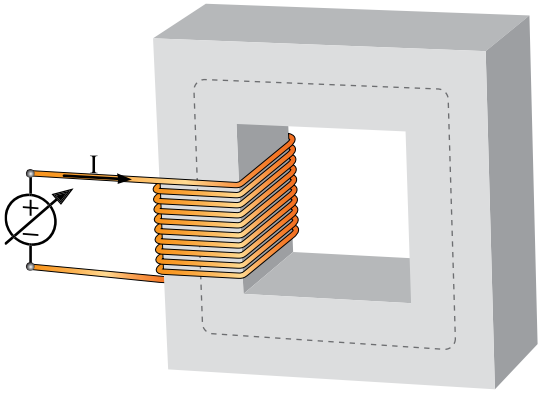
مثال ۸ ـ ۱ ـ اگر هسته سیم‌پیچ مثال ۷ ـ ۱ از هوا انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی به ۶×۱۰^{-۶} وبر بر مترمربع کاهش می‌یابد. ضریب نفوذ مغناطیسی هوا چقدر است؟ ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد را با هوا مقایسه کنید.

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

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

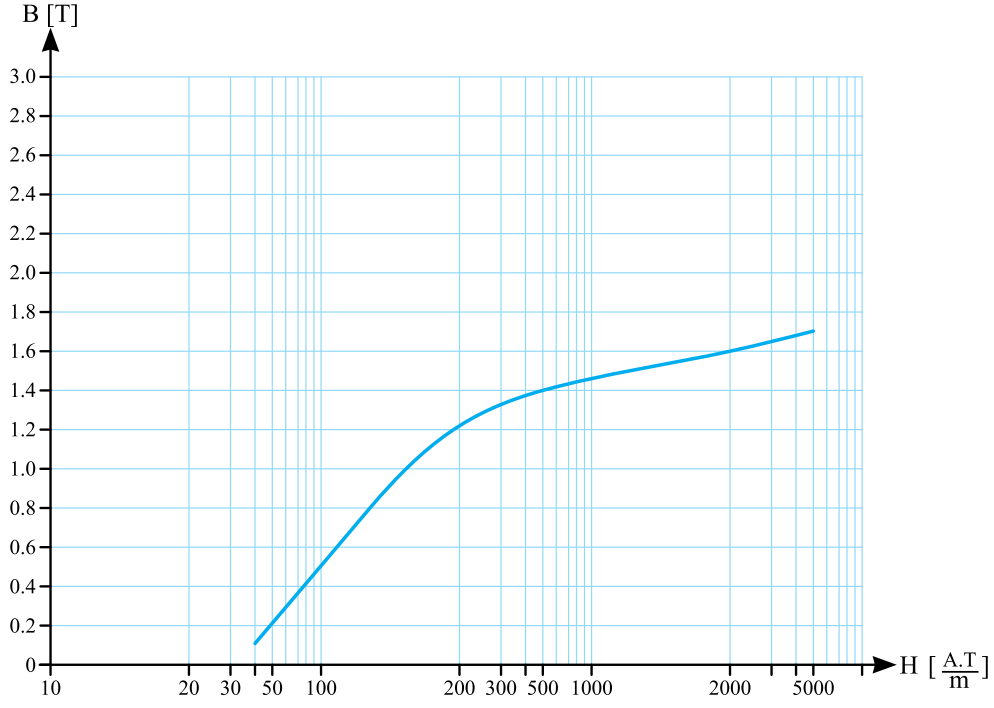
۱۳ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیس

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

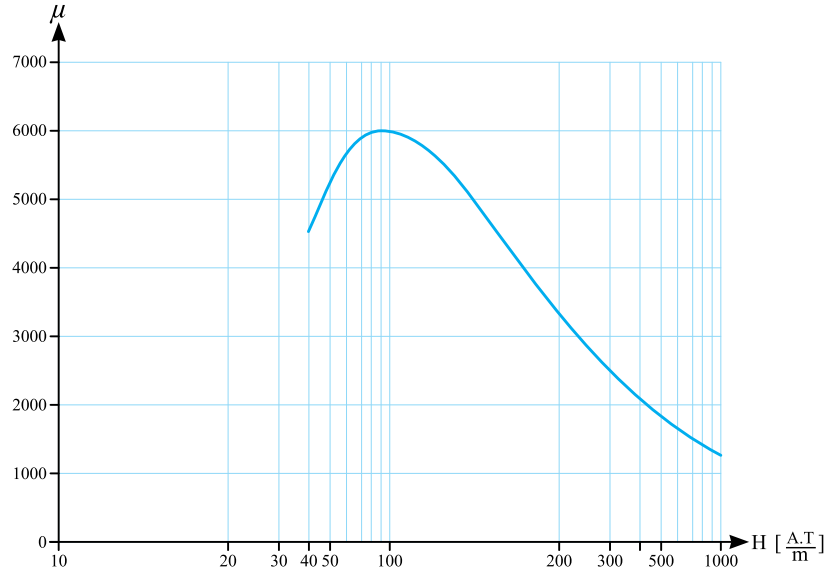
جریان سیم‌پیچ به آهستگی تا حداکثر مجاز افزایش داده می‌شود. افزایش جریان I شدت میدان مغناطیسی H را افزایش می‌دهد. اگر تغییرات چگالی فوران مغناطیسی B نسبت به شدت میدان مغناطیسی H هسته رسم شود، منحنی شکل (۲۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید. این منحنی، «منحنی مغناطیسی[۱]» یا «منحنی اشباع» نام دارد.



شکل ۲۷ ـ ۱ منحنی مغناطیسی فولاد ورق

۱. Magnetization Curve ۲. Gran – Oriented Steel

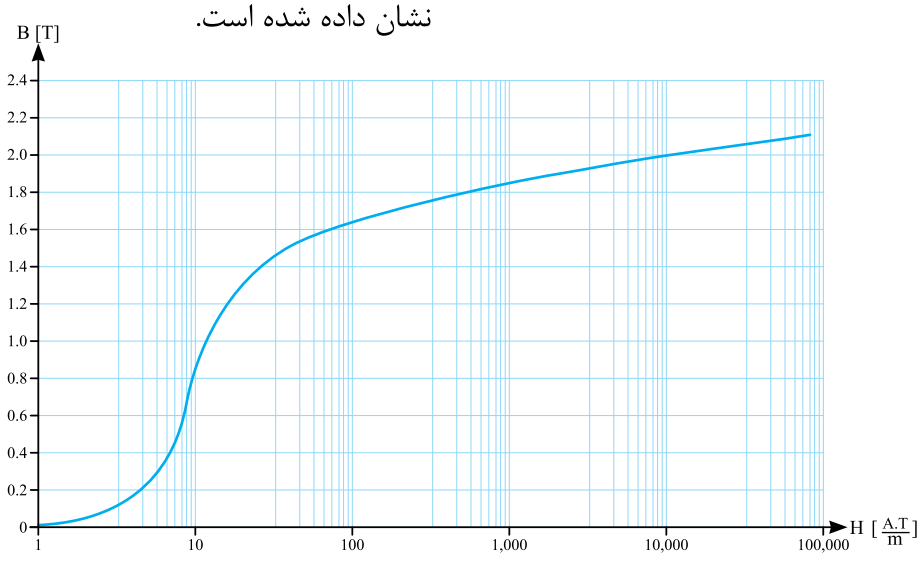
منحنی مغناطیسی تاثیر شدت میدان مغناطیسی H بر چگالی فوران مغناطیسی B هسته را نشان می‌دهد. در هر نقطه از منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیسی نسبت B به H، یعنی ضریب نفوذ مغناطیسی هسته μ عددی ثابت نیست. تاثیر شدت میدان مغناطیسی H بر ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته فرومغناطیس در شکل (۲۸ ـ ۱) نشان داده شده است. این 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 عمـل از منحنی مغناطیسـی بـرای تعیین B بر حسـب H یا H بر حسـب B می‌توان اسـتفاده کرد. مثال‌های زیر این موضوع را روشن می‌کند.

مثـال ۹ ـ ۱ ـ یـک سـیم‌پیچ ۱۰۰حلقه‌ای حامل جریـان الکتریکی ۱ آمپر بر روی یک هسـته از جنس فـولاد ورق به طول متوسـط ۱۰ سـانتی‌متر قرار دارد. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟

حل:

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

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

ـ از منحنـی مغناطیسـی شـکل (۲۷ ـ ۱) به ازای H=۲۰۰۰ مقدار B به‌دست می‌آید.

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

مثال ۱۰ ـ ۱ ـ اگر هسـته سـیم‌پیچ مثال ۹ ـ ۱ را از جنس فـولاد الکتریکی *M-5* انتخاب شـود، چگالی فوران مغناطیسـی هسته چند تسلا می‌شود؟ از مقایسه جواب‌های این دو مثال چند نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

حل:

ـ تعـداد حلقـه، جریان الکتریکی سـیم‌پیچ و طول هسته تغییر نکرده اسـت؛ لذا شدت میدان مغناطیسی ثابت می‌ماند. یعنی:

$$H=۱۰۰۰\left[\frac{A.T}{m}\right]$$

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

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

چگالـی فوران مغناطیسـی هسـته از جنس فولاد الکتریکـی *M-5* بیش‌تر از فولاد ورق شـده اسـت. در صورتی‌که شدت میدان مغناطیسی در هر دو برابر است. این موضوع مؤید آن اسـت که ضریب نفوذ مغناطیسی فـولاد الکتریکی *M-5* نسـبت به فـولاد ورق بزرگ‌تر است.

مثـال ۱۱ ـ ۱ ـ شـدت جریان الکتریکی سـیم‌پیچ ۱۰۰۰ حلقـه‌ای با هسـته فولاد ورق به طول متوسـط ۱۰ سـانتی‌متر و چگالی میدان مغناطیسـی ۱/۱ وبر به مترمربع چند آمپر است؟

حل:

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

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

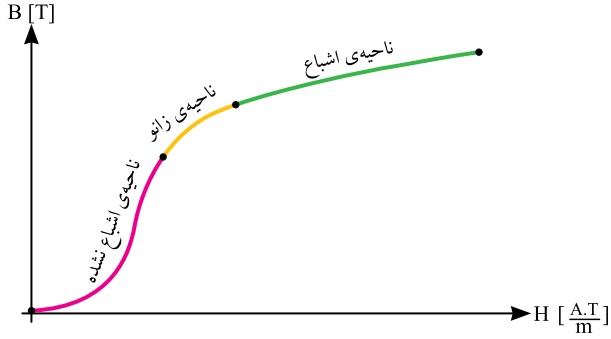
ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

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

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

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

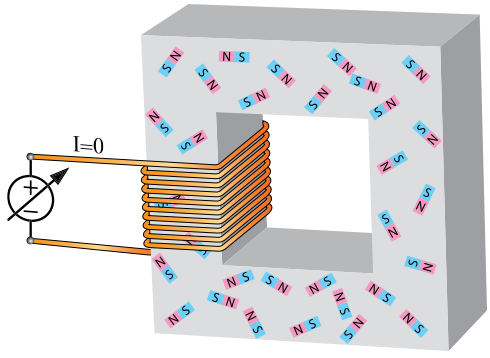
ناحیه اشباع نشده[۱]: در این ناحیه منحنی مغناطیسی تقریباً شکل خطی دارد و با تغییر اندک شدت میدان مغناطیسی H، چگالی فوران مغناطیسی B سریع تغییر می‌کند. در این ناحیه ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته زیاد است.

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 $۴\pi\times۱۰^{-۷}\left[\frac{wb}{A.T.m}\right]$ میل می‌کند.

ناحیه زانو[۳]: ناحیه گذر بین ناحیه اشباع نشده و ناحیه اشباع شده را ناحیه «زانوی» منحنی می‌نامند. در این ناحیه به تدیج 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.

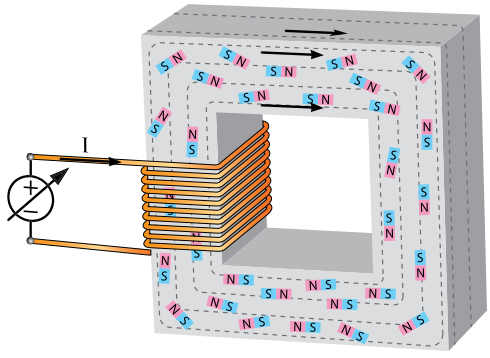
هسته فرومغناطیسی که سیم‌پیچ آن فاقد جریان الکتریکی است در شکل (۳۱ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۳۱ ـ ۱

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

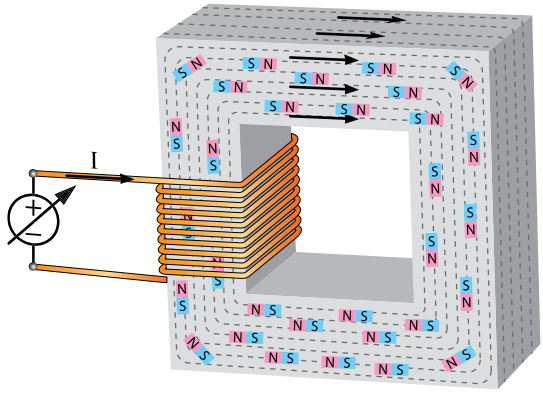
با عبور جریان الکتریکی مستقیم I از سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی H، باعث نظم گرفتن تعدادی از مولکول‌های مغناطیسی هسته در جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ می‌شود. لذا چگالی فوران مغناطیسی B در هسته زیاد می‌شود. شکل (۳۲ ـ ۱)



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 چگال فوران مغناطیسی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این حالت هسته در ناحیه اشباع است. شکل (۳۳ ـ ۱)



شکل ۳۳ ـ ۱

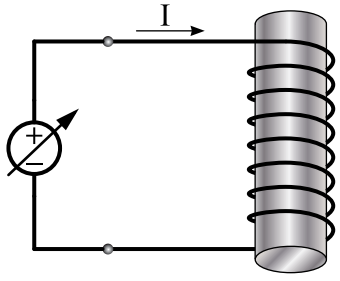
پس از اشباع هسته در صورتی‌که جریان الکتریکی سیم‌پیچ زیاد شود، شدت میدان مغناطیسی H افزایش می‌یابد، اما چگالی فوران مغناطیسی B هسته زیاد نمی‌شود؛ زیرا کلیه مولکول‌های مغناطیسی هسته در ناحیه اشباع منظم شده‌اند.

افزایش جریان الکتریکی سیم‌پیچ بعد از اشباع هسته باعث گرم شدت 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.

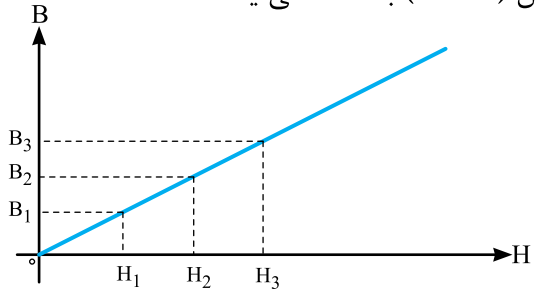
۱۵ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در خلاء

برای نشان دادن ضریب نفوذ مغناطیسی در خلاء، جریان مستقیم dc از سیم‌پیچ بدون هسته شکل (۳۴ ـ ۱) در خلاء 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 $H=\frac{NI}{L}$ افزایش می‌دهد. اگر تغییرات چگالی فوران مغناطیسی B درون سیم‌پیچ را 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 خلاء» می‌باشد. طبق تعریف نسبت چگالی فوران مغناطیسی B به شدت میدان مغناطیسی H در هر نقطه از این نمودار را «ضریب نفوذ مغناطیسی خلاء» 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_o چگالی فوران مغناطیسی در خلاء

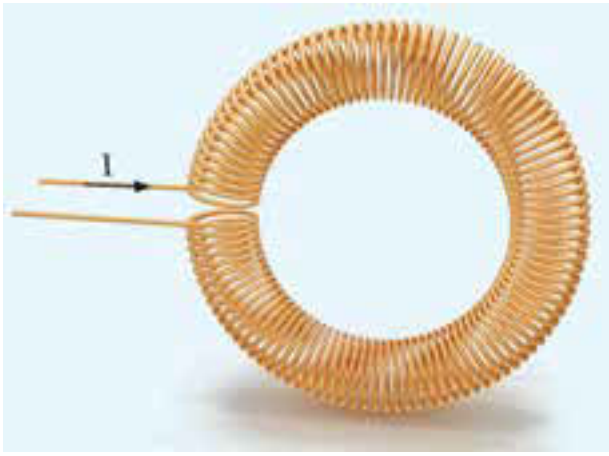
H_o شدت میدان مغناطیسی در خلاء

μ_o ضریب نفوذ مغناطیسی خلاء

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

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

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



شکل ۳۶ ـ ۱

حل:

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

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

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

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

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

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

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

حل:

ـ ابتدا از منحنی شکل (۲۷ ـ ۱) شدت میدان مغناطیسی برای تولید چگالی میدان ۰/۶ وبر بر مترمربع به‌دست می‌آید.

$$B = ۰/۶ \frac{wb}{m^۲} \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H = ۸۰ \left[\frac{A.T}{m}\right]$$

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

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

$$I = \frac{H.\ell_C}{N} = \frac{۸۰\times۱۰\times۱۰^{-۲}}{۱۰۰۰} = ۰/۰۰۸\ [A]$$

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

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

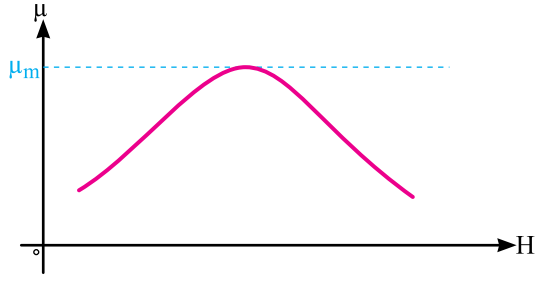
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_\circ} \qquad (۱ ـ ۱۲)$$

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 ارایه می‌کنند تا مصرف‌کننده با استفاده از آن ضریب نفوذ مغناطیسی μ را از رابطه (۱۳ ـ ۱) به‌دست آورد.

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

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r نشان می‌دهد جسم چند برابر خلاء 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]

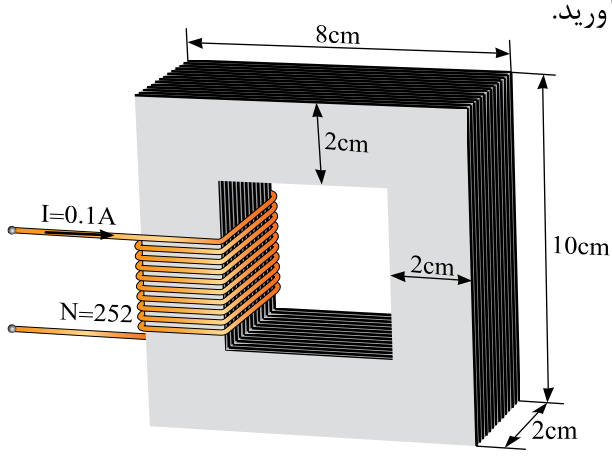
ـ مواد پارامغناطیس[2]

ـ مواد فرومغناطیس[3]

فعالیت

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

مثال ۱۴ ـ ۱ ـ 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:

$$\ell_{C1} = 2(10+8) = 36\ [cm]$$

محیط درونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C2} = 2(6+4) = 20\ [cm]$$

محیط متوسط برابر است با:

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

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

$$H = \frac{NI}{\ell_C} = \frac{252\times 0/1}{28\times 10^{-2}} = 90\ \left[\frac{AT}{m}\right]$$

از منحنی شکل (۳۲ ـ ۱) ضریب نفوذ نسبی برابر است با:

$$H = 90\ \left[\frac{AT}{m}\right] \xrightarrow{\text{منحنی شکل (۳۲ ـ ۱)}} \mu_r = 6000$$

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

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu = 4\pi\times 10^{-7}\times 6000 = 7/5\times 10^{-3}\ \left[\frac{wb}{A.T.m}\right]$$

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 خلاء همواره مقدار ..... دارد و برابر است با ..... .

۴ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی 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 ☐

پرسش های 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 خلاء را رسم کنید.

۷ ـ رابطه ضریب نفوذ مغناطیسی خلاء 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 $۰/۵\ \frac{wb}{AT.m}$ 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 طور 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-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 خلاء

ب ـ با هسته از جنس فولاد الکتریکی *M-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.