

## فصل اول

### الکترومغناطیس کاربردی

از زمان‌های بسیار قدیم بشر با آهن‌رباهای طبیعی آشنا بوده و نیروهای جاذبه و دافعه بین قطعات مختلف این آهن‌رباها و نیز بین آنها و سایر قطعات آهنی را می‌شناخته است. اما تا حدود ۲۰۰ سال قبل تحلیل صحیح و دقیقی از رفتار اجسام مغناطیسی ارائه نشده بود و به همین دلیل استفاده چندانی از این پدیده انجام نمی‌شد. در سال ۱۸۱۹ میلادی یک دانشمند دانمارکی بنام اورستد متوجه شد هنگام عبور جریان الکتریکی از یک سیم که در مجاورت یک قطب‌نما قرار دارد عقربه قطب‌نما (که جنس آن آهن‌ربای طبیعی است) منحرف می‌گردد. این تجربه نشان داد که جریان الکتریکی نیز مانند آهن‌ربای طبیعی در اطراف خود یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند که شدت آن بستگی به شدت جریان سیم دارد. پس از کشف اورستد در سال‌های بعد دانشمندانی نظیر فاراده، لنز، لورنس و ... به مرور، قوانین مغناطیسی را کامل نمودند. این قوانین امروزه در تحلیل و طراحی اکثر سیستم‌هایی که به نوعی با مغناطیس سروکار دارند بکار می‌رود مانند کاربرد در ماشین‌های الکتریکی، مخابرات، مهندسی پزشکی، مهندسی هوا و فضا و ... لذا در این قسمت با مروری بر تعاریف مقدماتی کمیات مغناطیسی، روش‌های تحلیل و بکارگیری میدان‌های مغناطیسی بیان می‌شود.

### تعاریف مقدماتی

(۱) شار یا فلوی مغناطیسی ( $\Phi$ ): مجموعه خطوط مغناطیسی که از سطحی محدود می‌گذرد شار یا فلوی مغناطیسی نام دارد و واحد آن در سیستم SI ولت ثانیه (V.S) یا وبر (Wb) می‌باشد. فلوی مغناطیسی در الکترومغناطیس شبیه جریان در مدار الکتریکی است یعنی همان طوری که جریان نمی‌تواند مسیر ناپیوسته داشته باشد فلو نیز نمی‌تواند ناپیوسته باشد، به عبارتی فلو یکطرفه نمی‌باشد.

نکته ۱: واحدهای دیگر شار، ماکسول و خط می‌باشد به طوری که :

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V.S} = 10^8 \text{ Maxwells} = 10^8 \text{ Lines}$$

(۲) چگالی فلوی مغناطیسی یا اندوکسیون مغناطیسی ( $B$ ): میزان فلو در واحد سطح، چگالی فلو نام دارد و واحد آن در سیستم SI تسلا (T) یا وبر بر متر مربع ( $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$ ) می‌باشد. فوران کل خارج شده از یک سطح برابر  $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$  می‌باشد و چنانچه  $B$  بر سطح  $A$  عمود باشد داریم:

$$\Phi = B.A \Rightarrow \boxed{B = \frac{\Phi}{A}}$$

نکته ۲: در بعضی از موارد چگالی فلو بر حسب واحد کوچکتری به نام گوس (G) نیز سنجیده می‌شود به طوری که:

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 10^4 \text{ G}$$

مثال ۱: یک سیم پیچ با سطح مقطع هسته  $30$  سانتیمتر مربع، فوران  $0.015$  وبر تولید می‌کند. چگالی فوران مغناطیسی در این هسته چند تسلا می‌باشد؟

۵ (۴)

۰/۵ (۳)

۰/۰۵ (۲)

۰/۰۰۵ (۱)

$$\left. \begin{array}{l} \Phi = 0.015 \text{ Wb} = 15 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\ A = 30 \text{ cm}^2 = 30 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow B = \frac{\Phi}{A} = \frac{15 \times 10^{-4}}{30 \times 10^{-4}} = 0.5 \text{ T}$$

پاسخ: گزینه «۳»

مثال ۲: سطح مقطع بوبینی  $81 \text{ mm}^2$  است. اگر بخواهیم چگالی شار هسته  $9/0$  تسلا باشد، فوران مورد نیاز چند و بر است؟

- (۱)  $72/9 \times 10^{-6}$  (۲)  $9 \times 10^{-3}$  (۳)  $72/9 \times 10^{-4}$  (۴)  $81 \times 10^{-3}$

$$\phi = BA = 0/9 \times 81 \times 10^{-6} = 72/9 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

پاسخ: گزینه «۱»

نیروی محرکه مغناطیسی (MMF : Magnetic Motive Force): به نیروی مغناطیسی که سبب تولید شار در مدارات مغناطیسی می شود نیروی محرکه مغناطیسی گویند و واحد آن آمپر دور (A.T) می باشد. نیروی محرکه مغناطیسی در یک سیم پیچ حامل جریان از حاصل ضرب جریان سیم پیچی در تعداد دور سیم پیچی بدست می آید. یعنی:

$$MMF = N.I$$

نکته ۳: همانطوری که در مدارات الکتریکی بدون وجود نیروی محرکه الکتریکی (EMF : Electro Motive Force) جریان برقرار نمی شود در مدارات مغناطیسی نیز بدون وجود MMF فلو جاری نمی گردد به جز موارد خاص (مانند آهنربای دائمی).

تذکر ۱: در کتب مختلف نیروی محرکه مغناطیسی را با عبارات گوناگونی به صورت زیر نشان می دهند:

$$MMF = \theta = \xi = F_m = V_m = N.I$$

مثال ۳: مقدار نیروی محرکه مغناطیسی یک بوبین به کدام عامل وابسته است؟

- (۱) جریان بوبین (۲) جریان و مقاومت مغناطیسی (۳) مقاومت اهمی سیمها (۴) مقاومت مغناطیسی

پاسخ: گزینه «۱» بر طبق رابطه  $\theta = NI$  نیروی محرکه مغناطیسی فقط به جریان و تعداد دور بوبین وابسته می باشد.

مثال ۴: در یک بوبین با ثابت بودن جریان، کدام عامل سبب تغییر نیروی محرکه مغناطیسی می شود؟

- (۱) تعداد دور سیم پیچ (۲) تعداد دور سیم پیچ و طول هسته (۳) سطح مقطع هسته (۴) طول هسته

پاسخ: گزینه «۱» با توجه به رابطه  $\theta = NI$  با ثابت بودن جریان، تغییر تعداد دور بوبین (N) می تواند باعث تغییر نیروی محرکه مغناطیسی ( $\theta$ ) شود.

شدت میدان مغناطیسی (H): چنانچه در ماده ای به طول متوسط  $L_c$ ، آمپر دور یا نیروی محرکه مغناطیسی برابر  $MMF (= N.I)$  موجود باشد به نسبت این نیرو به طول متوسط ماده، شدت میدان مغناطیسی در آن ماده گویند. واحد شدت میدان مغناطیسی در سیستم SI نیوتن بر وبر ( $\frac{N}{Wb}$ ) یا آمپر دور بر متر ( $\frac{A.T}{m}$ ) می باشد. شدت میدان مغناطیسی در هر نقطه داخل میدان مغناطیسی از نظر عددی برابر با نیرویی است که از طرف قطب شمال (N) فورانی معادل  $1 \text{ Wb}$  در آن نقطه ایجاد می کند. با استفاده از قانون مداری آمپر می توان شدت میدان مغناطیسی در یک ماده مغناطیسی به طول متوسط  $L_c$  را از رابطه زیر بدست آورد:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L}_c = NI \Rightarrow H L_c = NI \Rightarrow H = \frac{NI}{L_c}$$

مثال ۵: در روی هسته ای با طول  $12$  سانتی متر  $600$  حلقه سیم پیچیده شده است. اگر جریان  $4 \text{ A}$  از سیم پیچ عبور کند، شدت میدان

مغناطیسی در این هسته چند  $\frac{A.T}{m}$  می گردد؟

- (۱)  $200$  (۲)  $230$  (۳)  $1200$  (۴)  $2000$

پاسخ: گزینه «۴»

$$\theta = NI = 600 \times 4 = 2400 \text{ A.T} \Rightarrow H = \frac{\theta}{L_c} = \frac{2400}{12 \times 10^{-2}} = 2000 \frac{A.T}{m}$$

مثال ۶: شدت میدان مغناطیسی یک سیم پیچ با هسته بزرگ و تعداد دور سیم پیچ زیاد با شدت میدان کدام سیم پیچ می تواند یکسان باشد؟ (جنس هسته ها یکی است)

- (۱) هسته کوچک و دور سیم پیچ بیشتر (۲) هسته کوچک و دور سیم پیچ کمتر (۳) هسته بزرگ تر و دور سیم پیچ کمتر (۴) هسته بزرگ تر و دور سیم پیچ برابر

پاسخ: گزینه «۲» شدت میدان مغناطیسی با طول هسته نسبت عکس و با تعداد دور سیم پیچ نسبت مستقیم دارد لذا اگر طول هسته بزرگ و تعداد دور سیم پیچی زیاد و یا طول هسته کوچک و تعداد دور سیم پیچی کم باشد، شدت میدان مغناطیسی تقریباً یکسانی خواهیم داشت.

مثال ۷: یک سیم پیچ با هسته مدور به قطر متوسط  $300\text{ cm}$  (بدون هسته آهنی) دارای شدت میدان مغناطیسی  $2000 \frac{\text{A.T}}{\text{m}}$  می باشد نیروی محرکه‌ی مغناطیسی در آن چند آمپر دور است؟ ( $\pi = 3$ )

$$(1) 6 \times 10^3 \quad (2) 18 \times 10^3 \quad (3) 7 \times 10^2 \quad (4) 45 \times 10^4$$

پاسخ: گزینه «۲»  
 محیط هسته مدور همان طول متوسط هسته می باشد، لذا  $L_{av} = 9\text{ m}$  خواهد بود، در این صورت داریم:

$$\theta = H.L_{av} = 2000 \times 9 = 18000 = 18 \times 10^3 \text{ A.T}$$

ضریب نفوذ مغناطیسی مطلق ( $\mu$ ) و ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی ( $\mu_r$ ): اگر یک ماده مغناطیسی مثلاً یک میله آهنی را در داخل میدان یکنواختی به شدت  $H$  قرار دهیم چگالی فوران  $B$  در میله ایجاد می شود که در آن ارتباط بین  $H$  و  $B$  به وسیله ضریبی بنام  $\mu$  انجام می گیرد که آنرا ضریب نفوذ مطلق آن میله یا ماده نامند به طوریکه:

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

اگر میدان در هوا و یا در خلاء ایجاد شده باشد ضریب نفوذ آن مقدار ثابتی برابر  $4\pi \times 10^{-7}$  ویر بر آمپر دور در متر ( $\frac{\text{Wb}}{\text{A.T.m}}$ ) می باشد و آن را با  $\mu_0$  نشان می دهند و به آن ضریب نفوذ مغناطیسی مطلق هوا گویند. ضریب نفوذ مغناطیسی کلیه مواد را نسبت به هوا سنجیده و به آن ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی جسم گویند و آنرا با  $\mu_r$  نشان می دهند یعنی:

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

یا

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

ضریب نفوذ مغناطیسی مطلق بر حسب  $\frac{\text{Wb}}{\text{A.T.m}}$  یا  $\frac{\text{H}}{\text{m}}$  (هانری بر متر) سنجیده می شود. و ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی بدون واحد است.

نکته ۴: مقدار  $\mu$  و ( $\mu_r$ ) در یک ماده مغناطیسی ثابت نبوده و بستگی به شدت میدان و چگالی میدان (نقطه کار) موجود در ماده دارد به طوری که با افزایش مقدار  $H$  (یا  $B$ ) مقدار  $\mu_r$  ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.

مثال ۸: نسبت چگالی فوران مغناطیسی به شدت میدان مغناطیسی چه نام دارد؟  
 (۱) اندکسیون (۲) ضریب نفوذ (۳) فوران (۴) نیروی محرکه

پاسخ: گزینه «۲» بر طبق رابطه  $\mu = \frac{B}{H}$  مشخص است.

مثال ۹: واحد ضریب نفوذ مغناطیسی کدام است؟

$$(1) \frac{\text{V.S}}{\text{m}^2} \quad (2) \frac{\text{Wb}}{\text{A.m}} \quad (3) \frac{\text{V.S}}{\text{m}} \quad (4) \frac{\text{Wb}}{\text{A}}$$

پاسخ: گزینه «۲»

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow \text{واحد ضریب نفوذ مغناطیسی} = \frac{\frac{\text{V.S}}{\text{m}^2}}{\frac{\text{V.S}}{\text{A.m}}} = \frac{\text{V.S}}{\text{A.m}} = \frac{\text{Wb}}{\text{A.m}}$$

مثال ۱۰: از یک سیم پیچ با طول متوسط  $5$  متر و تعداد دور  $1000$  و ضریب نفوذ  $\frac{\text{Wb}}{\text{A.m}} 15 \times 10^{-5}$  چند آمپر جریان عبور کند تا چگالی فوران  $75$  تسلا شود؟

$$(1) 5 \quad (2) 1/5 \quad (3) 2/5 \quad (4) 5$$

پاسخ: گزینه «۳»  
 $H = \frac{B}{\mu} = \frac{75}{15 \times 10^{-5}} = 5000 \frac{\text{A.T}}{\text{m}}$  &  $\theta = H.L_{av} = 5000 \times 5 = 25000 \text{ A.T}$

$$\theta = NI \Rightarrow I = \frac{\theta}{N} = \frac{25000}{10000} = 2/5 \text{ A}$$

مثال ۱۱: شدت میدان مغناطیسی بوبینی  $700 \frac{\text{A.T}}{\text{m}}$  است اگر ضریب نفوذ نسبی هسته  $\frac{500}{\pi}$  باشد، چگالی شار بوبین چند تسلا می باشد؟

$$(1) 1/5 \times 10^{-1} \quad (2) 1/5 \times 10^{-2} \quad (3) 14 \times 10^{-1} \quad (4) 14 \times 10^{-2}$$

پاسخ: گزینه «۴»  
 $B = \mu H = \mu_0 \mu_r H = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{500}{\pi} \times 700 = 14 \times 10^{-2} \text{ T}$

۶) مقاومت مغناطیسی یا رلوکتانس ( $R_m$ ): میزان مقاومتی که یک ماده در مقابل عبور شار مغناطیسی از خود نشان می‌دهد مقاومت مغناطیسی نام دارد و واحد آن  $\frac{A.T}{Wb}$  بوده و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

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

در این رابطه  $A$  سطح مقطع ماده مورد نظر بر حسب  $m^2$  و  $\mu$  ضریب نفوذ مغناطیسی مطلق ماده مورد نظر ( $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ) بر حسب  $\frac{H}{m}$  و  $L_c$  نیز طول متوسط ماده مورد نظر بر حسب  $m$  می‌باشد.

مثال ۱۲: واحد سنجش کدام کمیت مغناطیسی  $\frac{A}{Wb}$  است؟

- (۱) ضریب نفوذ مغناطیسی (۲) شدت میدان (۳) رلوکتانس (۴) تلفات هیستریسیس

پاسخ: گزینه «۳»

مثال ۱۳: در یک آهن مغناطیسی با ضریب نفوذ نسبی ۲۰۰۰ اگر طول آهن ۱۲ cm و سطح مقطع آن  $5 \text{ cm}^2$  باشد، رلوکتانس آن چقدر است؟ ( $\pi = 3$ )

(۱)  $10^8 \frac{A.T}{Wb}$  (۲)  $10^4 \frac{A.T}{Wb}$  (۳)  $10^{-4} \frac{A.T}{Wb}$  (۴)  $10^{-8} \frac{A.T}{Wb}$

$$R_m = \frac{L_c}{\mu A} = \frac{12 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7} \times 2000 \times 5 \times 10^{-4}} = 10^4 \frac{A.T}{Wb}$$

پاسخ: گزینه «۲»

نکته ۵: از میان کمیات مغناطیسی فوق‌الذکر شدت میدان مغناطیسی و نیروی محرکه مغناطیسی مستقل از جنس هسته بوده و باقی کمیات وابسته به جنس هسته می‌باشد.

مثال ۱۴: از یک سیم‌پیچ بدون هسته جریان ثابتی عبور می‌کند حال اگر یک هسته آهنی به درون سیم‌پیچ هدایت شود کدام کمیت مغناطیسی در این حالت بدون تغییر باقی می‌ماند؟

- (۱) شدت میدان (۲) چگالی میدان (۳) شار مغناطیسی (۴) شدت میدان و نیروی محرکه مغناطیسی

پاسخ: گزینه «۴» چون جریان ثابت است لذا شدت میدان و نیروی محرکه مغناطیسی ثابت می‌مانند. از طرفی با وارد کردن هسته آهنی ضریب نفوذ مغناطیسی هسته تغییر می‌کند و نتیجتاً شار و چگالی شار مغناطیسی هسته تغییر می‌کنند.

مثال ۱۵: کدام گزینه به جنس جسم بستگی دارد و تا حد زیادی خواص مغناطیسی آن را تعیین می‌کند؟

- (۱) شدت میدان مغناطیسی (۲) چگالی فوران (۳) فوران مغناطیسی (۴) ضریب نفوذ مغناطیسی

پاسخ: گزینه «۴»

### دسته‌بندی مواد بر اساس قابلیت نفوذ مغناطیسی نسبی

(۱) مواد مغناطیسی طبیعی (فرومغناطیس): موادی هستند که در آنها  $\mu_r$  بسیار بزرگتر از یک است مانند: کبالت، آهن، فولاد، نیکل و آلیاژهای آن، فریت نرم و ... مثلاً برای فریت نرم  $\mu_r = 10000$  می‌باشد. مواد فرومغناطیسی خود به دو دسته مواد سخت مغناطیسی و مواد نرم مغناطیسی تقسیم می‌شوند. در مواد سخت مغناطیسی خاصیت مغناطیسی برای مدتی حفظ می‌شود ولی در مواد نرم مغناطیسی بعد از جدا شدن ماده از حوزه مغناطیسی، میدان مغناطیسی (خاصیت مغناطیسی) نیز از بین می‌رود.

مثال ۱۶: هسته آهنی باعث کاهش ..... و افزایش ..... می‌شود.

- (۱) اندوکسیون - رلوکتانس (۲) رلوکتانس - فوران (۳) شدت میدان - اندوکسیون (۴) فوران - رلوکتانس

پاسخ: گزینه «۲» هسته آهنی به دلیل دارا بودن ضریب نفوذ مغناطیسی بالا بر طبق رابطه  $R_m = \frac{L_c}{\mu A}$  باعث کاهش رلوکتانس و در نتیجه

افزایش فوران خواهد شد.

(۲) مواد غیرمغناطیسی (پارامغناطیسی): موادی هستند که در آنها  $\mu_r$  کمی بزرگتر از یک (حداکثر تا ۴ یا ۵) می باشد مانند هوا، اکسیژن، پلاتین، آلومینیوم و ... مثلاً برای اکسیژن  $\mu_r = 1/00000003$  می باشد.

(۳) مواد ضد مغناطیسی (دایامغناطیسی): موادی هستند که در آنها  $\mu_r$  کمی کوچکتر از یک است مانند: جیوه، نقره، قلع، آب و ... مثلاً برای آب  $\mu_r = 0/899991$  می باشد.

نکته ۶: مقدار ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد پارامغناطیسی و دایامغناطیسی مستقل از میزان شدت میدان (یا نیروی محرکه مغناطیسی) است در صورتی که ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیسی وابسته به شدت میدان است (به نکته ۴ مراجعه شود).

مثال ۱۷: ضریب نفوذ مغناطیسی در کدام ماده بزرگتر است؟

(۱) آلومینیوم (۲) آهن (۳) نقره (۴) قلع

پاسخ: گزینه «۲» آهن جزء مواد فرومغناطیسی بوده لذا ضریب نفوذ مغناطیسی بالاتری نسبت به سایر گزینه ها دارد.

مثال ۱۸: یک سیم بیج با شدت میدان ۲ کیلو آمپر بر متر در هسته چگالی شاری برابر با  $0/8\pi$  میلی تسلا ایجاد کرده است. جنس هسته کدام است؟

(۱) آهن نرم (۲) خلاء یا هوا (۳) فولاد سخت (۴) هوا

پاسخ: گزینه «۲»

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0/8\pi \times 10^{-3}}{2 \times 10^3} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$$

ملاحظه می گردد که ضریب نفوذ مغناطیسی به دست آمده دقیقاً همان ضریب نفوذ مغناطیسی هوا و خلاء می باشد.

## رابطه بین شدت میدان و چگالی میدان مغناطیسی

همانطور که ذکر شد چنانچه  $B$  چگالی میدان مغناطیسی و  $H$  شدت میدان مغناطیسی باشد داریم:

$$B = \mu H \quad \& \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

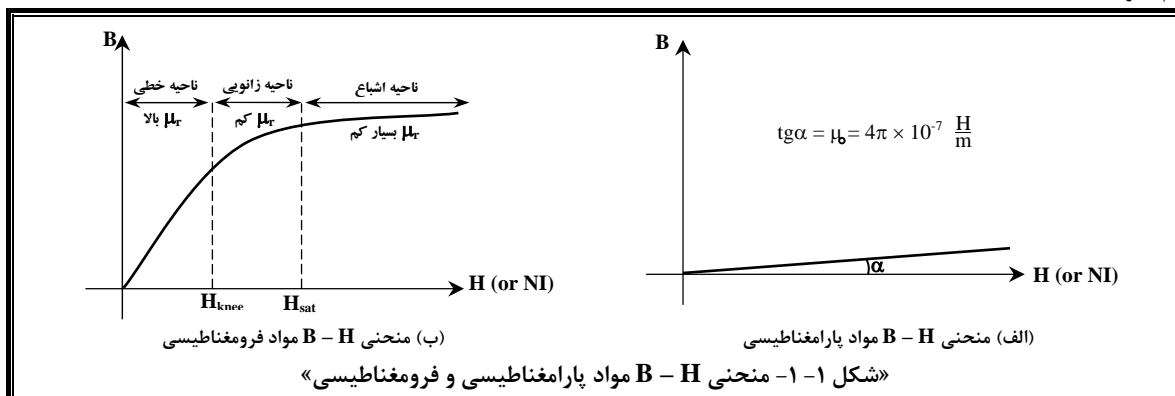
از رابطه فوق نتایج زیر حاصل می شود:

(۱) در مواد پارامغناطیسی و دایامغناطیسی: در این گونه مواد  $\mu_r \approx 1$  است لذا:

$$\mu_r \approx 1 \Rightarrow B = \mu_0 H \Rightarrow B = 4\pi \times 10^{-7} H$$

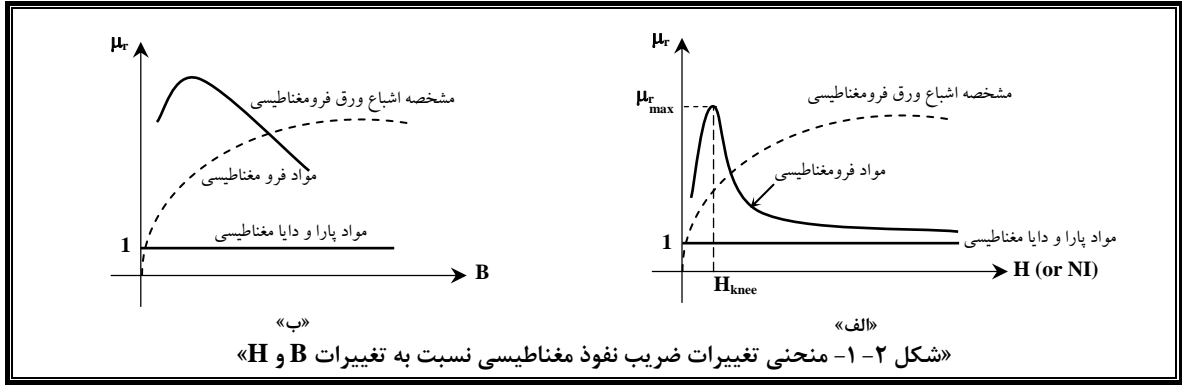
لذا می توان منحنی  $B-H$  را برای اینگونه مواد به صورت شکل «۱-۱-الف» رسم نمود.

(۲) در مواد فرومغناطیسی: در این گونه مواد  $\mu_r \gg 1$  بوده و متغیر است لذا می توان منحنی  $B-H$  را برای اینگونه مواد به صورت شکل «۱-۱-ب» رسم نمود.



طبق شکل «۱-۱-الف» به علت کم بودن شیب مشخصه  $B-H$  در مواد پارا و دایامغناطیسی چگالی میدان تولیدی اینگونه از مواد بسیار کمتر از مواد فرومغناطیسی است که این امر در بسیاری از موارد ضعف این مواد محسوب می شود. در عین حال می توان ذکر کرد که عمده ترین مزیت مواد پارا و دایامغناطیسی عدم اشباع در آنها است. در مواد فرومغناطیسی در ناحیه اشباع تغییرات چگالی میدان بسیار کمتر از تغییرات شدت میدان است.

در مواد فرومغناطیسی با افزایش  $H$  یا  $B$  ضریب نفوذ مغناطیسی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد اما در مواد پارامغناطیسی و دایامغناطیسی با افزایش  $H$  یا  $B$  ضریب نفوذ مغناطیسی همواره ثابت می ماند. شکل «۱-۲-الف» منحنی « $\mu_r - H$ » و شکل «۱-۲-ب» منحنی « $\mu_r - B$ » را در مواد فرو، پارا و دایامغناطیسی نشان می دهد.



نکته ۷: طبق شکل «الف-۱-۲» حداکثر مقدار  $\mu_r$  در مواد فرومغناطیسی در آستانه ناحیه زانویی (knee) ایجاد می‌شود.

نکته ۸: در ماشین‌های AC و ترانسفورماتورها نقطه کار ماشین (به دلایل اقتصادی) در ناحیه اشباع بوده و در ماشین‌های DC (به دلایل کنترلی) در ناحیه زانویی می‌باشد.

نکته ۹: طبق شکل «الف-۱-۲» بعد از اشباع مواد فرومغناطیسی به علت کاهش شدید ضریب نفوذ مغناطیسی مقاومت مغناطیسی شدیداً افزایش می‌یابد.

مثال ۱۹: بعد از اشباع هسته مغناطیسی کدام پارامتر افزایش می‌یابد؟

- (۱) شدت میدان (۲) چگالی میدان (۳) رلوکتانس (۴) نیروی محرکه مغناطیسی

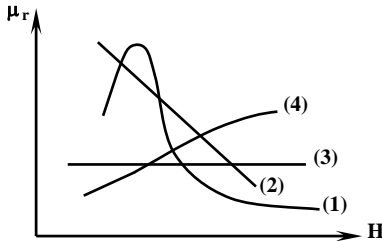
پاسخ: گزینه «۳» بعد از اشباع  $\mu_r$  شدیداً کاهش و  $R_m$  شدیداً افزایش می‌یابد.

مثال ۱۹: در مواد با ضریب نفوذ مغناطیسی بیشتر، مقدار ثابتی از شدت میدان سبب ایجاد چگالی فوران ..... می‌شود.

- (۱) بیشتر (۲) ثابت (۳) کمتر (۴) نامعین

پاسخ: گزینه «۱» بر طبق رابطه  $B = \mu H$  افزایش ضریب نفوذ مغناطیسی ( $\mu$ ) باعث بیشتر شدن چگالی فوران (B) خواهد شد.

مثال ۲۰: در شکل مقابل کدام منحنی مربوط به خلاء است؟



- (۱) ۱  
(۲) ۲  
(۳) ۳  
(۴) ۴

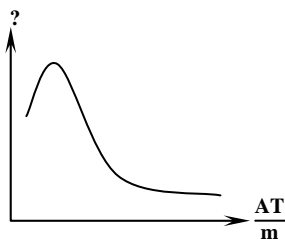
پاسخ: گزینه «۳» ضریب نفوذ مغناطیسی خلاء (و کلیه مواد پارا و دایا مغناطیسی) همواره عددی ثابت است و با تغییر شدت میدان مغناطیسی تغییر نمی‌کند.

مثال ۲۱: پدیده اشباع مغناطیسی در کدام مواد ظاهر می‌شود؟

- (۱) آلومینیم (۲) تمام اجسام (۳) مواد پارامغناطیسی (۴) فولاد الکتریکی

پاسخ: گزینه «۴» فقط مواد فرومغناطیسی به اشباع می‌روند.

مثال ۲۲: منحنی شکل روبرو تغییرات کدام کمیت مغناطیسی را برای ورق فولاد نشان می‌دهد؟



- (۱) چگالی شار  
(۲) شار  
(۳) شدت میدان  
(۴) ضریب نفوذ نسبی

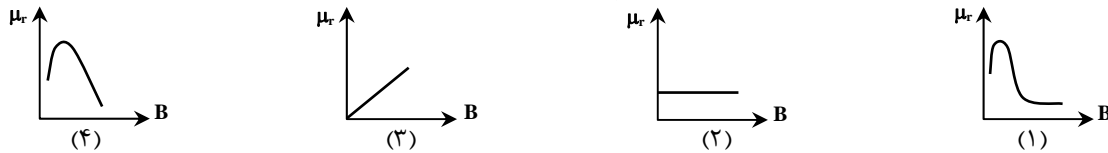
پاسخ: گزینه «۴» واحد داده شده برای محور افقی واحد شدت میدان مغناطیسی (H) می‌باشد پس با توجه به شکل «الف-۱-۲» محور عمودی نشان دهنده ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی ( $\mu_r$ ) ماده است.

مثال ۲۳: تغییرات ضریب نفوذ مغناطیسی در هسته آهنی و هوا چگونه است؟

- (۱) در هسته آهنی ثابت و در هوا متغیر است.  
 (۲) در هسته آهنی متغیر و در هوا ثابت است.  
 (۳) در هسته آهنی و در هوا متغیر است.  
 (۴) در هسته آهنی و در هوا همواره ثابت است.

پاسخ: گزینه «۲» ✓

مثال ۲۴: تغییرات  $\mu_r$  برای ورق فولاد به ازای تغییرات B کدام است؟



پاسخ: گزینه «۴» با توجه به شکل «۲-۱-ب» با افزایش B مقدار  $\mu_r$  ابتدا افزایش و سپس با همان شیب کاهش می‌یابد. ✓

مثال ۲۵: منحنی شکل داده شده، تغییرات یک کمیت از یک هسته مغناطیسی را نشان می‌دهد. عبارت صحیح کدام است؟



- (۱) چگالی میدان در هسته‌ها پس از اشباع به شدت کاهش می‌یابد.  
 (۲) ضریب نفوذ نسبی مغناطیسی هسته‌ها پس از اشباع مثل هوا می‌باشد.  
 (۳) شدت میدان مغناطیسی در هسته‌ها پس از اشباع به سمت یک میل می‌کند.  
 (۴) آمپر دور در مدار مغناطیسی پس از اشباع برابر یک می‌شود.

پاسخ: گزینه «۲» طبق شکل داده با افزایش H که ماشین به اشباع می‌رود ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی حدود یک می‌گردد یعنی پس از اشباع رفتار هسته مانند هوا می‌شود. ✓

### فریت (Ferrit)

فریت مخلوطی از اکسیدهای آهن و دیگر فلزات است. این ماده رابطه نزدیکی با مواد فرومغناطیسی دارد ولی به دلیل اختلاف در وضعیت مغناطیسی، آنها را مواد فری مغناطیسی می‌نامند. فریت مقاومت الکتریکی بسیار بالایی (حدوداً  $10^6$  برابر سایر فلزات) دارد لذا جریان فوکو در آن صفر است پس به دلیل بالا بودن مقاومت الکتریکی این هسته نیازی به ورقه ورقه شدن ندارد. مواد خام فریت ارزان و مواد ساخته شده آن از هر آلیاژی سبک‌تر است اما به علت وجود اکسیژن غیرمغناطیسی در آن این ماده نمی‌تواند به اندازه مواد فرومغناطیسی خاصیت مغناطیسی بالایی داشته باشد مثلاً اگر حداکثر چگالی میدان در آهن  $2/18$  تسلا باشد در فریت حدود  $0/3$  تا  $0/5$  تسلا است به عبارت دیگر اشباع در فریت زودتر رخ می‌دهد که این مسئله سبب محدود بودن کاربرد آن می‌باشد.

مثال ۲۶: کدامیک از هسته‌های زیر نیازی به ورقه ورقه شدن ندارند؟

- (۱) آهن (۲) کبالت (۳) فریت (۴) نیکل

پاسخ: گزینه «۳» آهن، کبالت، نیکل و فولاد جزء مواد فرومغناطیسی بوده و باید ورقه ورقه شوند اما موادی نظیر فریت، پرمالوی و سوپرمالوی جزء مواد فری مغناطیسی بوده و نیازی به مورق شدن ندارند. ✓

مثال ۲۷: دلیل اصلی یکپارچه بودن هسته‌های فریتی چیست؟

- (۱) مقاومت مغناطیسی بالا (۲) هدایت الکتریکی بالا (۳) مقاومت الکتریکی پایین (۴) هدایت الکتریکی پایین

پاسخ: گزینه «۴» در فریت‌ها به دلیل پایین بودن ضریب هدایت الکتریکی مقاومت الکتریکی بالا بوده لذا نیازی به ورقه ورقه شدن ندارند. ✓

مثال ۲۸: عمده‌ترین عیب فریت ..... می‌باشد.

- (۱) سبک بودن آن (۲) مقاومت مکانیکی کم آن (۳) بالا بودن مقاومت الکتریکی آن (۴) اشباع زود هنگام آن

پاسخ: گزینه «۴» در فریت‌ها به علت وجود اکسیژن غیرمغناطیسی اشباع در چگالی میدان‌های کم (حدود  $0/3T$  تا  $0/5T$ ) رخ می‌دهد. ✓

### تأثیر دما و فرکانس روی مواد مغناطیسی

با افزایش فرکانس و ازدیاد درجه حرارت ضریب نفوذ مغناطیسی کاهش می‌یابد. به طوری که با افزایش بیش از حد دما، اجسام فرومغناطیسی به نقطه‌ای موسوم به نقطه Curie می‌رسند که خواص مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. درجه حرارت Curie برای آهن  $770^\circ C$  و برای نیکل  $348^\circ C$  است. در عمل چون ماشین‌های الکتریکی در وضعیت عادی زیر  $150^\circ C$  کار می‌کنند لذا هیچوقت به نقطه Curie نمی‌رسند. درجه حرارتی که خاصیت مغناطیسی فریت از بین می‌رود درجه حرارت نیل نام دارد که برای فریت‌های معمولی بین  $250^\circ C$  تا  $500^\circ C$  است.

مثال ۲۹: با افزایش فرکانس کاری یک مدار مغناطیسی ..... می‌یابد.

- (۱) فوران، افزایش  
(۲) نیروی محرکه مغناطیسی، افزایش  
(۳) فوران، کاهش  
(۴) نیروی محرکه مغناطیسی، کاهش

پاسخ: گزینه «۳» با افزایش فرکانس کاری  $\mu_r$  هسته کاهش لذا فوران هسته نیز کاهش می‌یابد.

مثال ۳۰: نقطه Curie در یک هسته مغناطیسی:

- (۱) نقطه‌ای است که در آن فرکانس، خاصیت مغناطیسی هسته از بین می‌رود.  
(۲) نقطه‌ای است که در آن فرکانس، خاصیت مغناطیسی هسته حداکثر می‌شود.  
(۳) نقطه‌ای است که در آن دما، خاصیت مغناطیسی هسته از بین می‌رود.  
(۴) نقطه‌ای است که در آن دما، خاصیت مغناطیسی هسته حداکثر می‌شود.

پاسخ: گزینه «۳» اگر دمای هسته به دمای کوری (Curie) برسد هسته خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد.

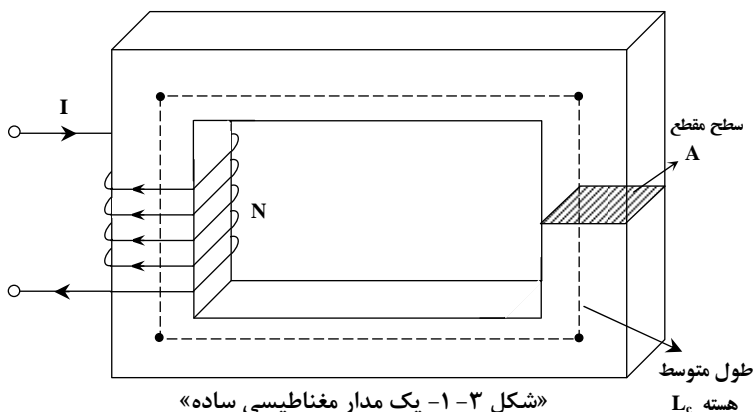
## تشابه کمیات مغناطیسی و الکتریکی

با توجه به یکسان بودن اکثر قوانین موجود در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توان بین کمیات مغناطیسی و الکتریکی وجوه مشترکی به صورت جدول «۱-۱» پیدا نمود.

«کمیات مغناطیسی»				«کمیات الکتریکی»			
نام کمیت	حروف مشخصه	واحد	رابطه	نام کمیت	حروف مشخصه	واحد	رابطه
فلوی مغناطیسی	$\Phi$	Wb	$\int \vec{B} \cdot d\vec{A}$	جریان الکتریکی	I	A	$\int \vec{J} \cdot d\vec{A}$
نیروی محرکه مغناطیسی	MMF	A.T	N.I	نیروی محرکه الکتریکی	EMF	V	-
مقاومت مغناطیسی	$R_m$	$\frac{A.T}{Wb}$	$\frac{L_c}{\mu A}$	مقاومت الکتریکی	$R_e$	$\frac{V}{A} = \Omega$	$\frac{L}{\sigma A}$
ضریب نفوذ مغناطیسی	$\mu$	$\frac{H}{m}$	-	ضریب نفوذ الکتریکی	$\sigma$	$\frac{\Omega}{m}$	-
چگالی فوران مغناطیسی	B	$\frac{Wb}{m^2}$	$\frac{\Phi}{A}$	چگالی جریان الکتریکی	J	$\frac{A}{m^2}$	$\frac{I}{A}$
شدت میدان مغناطیسی	H	$\frac{A.T}{m}$	$\frac{MMF}{L_c}$	شدت میدان الکتریکی	E	$\frac{V}{m}$	$\frac{EMF}{L}$
افت پتانسیل مغناطیسی	$\theta$	A.T	$R_m \cdot \Phi$	افت پتانسیل الکتریکی	$V_e$	V	$R_e \cdot I$
KVL مغناطیسی	$\sum \theta_i = 0$	-	-	KVL الکتریکی	$\sum V_{e_i} = 0$	-	-
KCL مغناطیسی	$\sum \Phi_i = 0$	-	-	KCL الکتریکی	$\sum I_i = 0$	-	-

«جدول ۱-۱»

## مدارات مغناطیسی



یک یا چند سیم‌پیچ که مشتمل بر جریان بوده و بر زمینه یک ماده مغناطیسی، یک میدان مغناطیسی ایجاد کند را مدار مغناطیسی می‌نامیم، این میدان می‌تواند کنترل‌پذیر و جهت‌پذیر باشد، شکل «۱-۳» یک مدار مغناطیسی را نشان می‌دهد. در این شکل چنانچه جریان سیم‌پیچی DC باشد مدار مغناطیسی DC و چنانچه جریان سیم‌پیچی AC باشد مدار مغناطیسی AC نام دارد.



## انواع مدارات مغناطیسی

## (۱) مدار مغناطیسی ساده

در این نوع از مدارات مغناطیسی جنس هسته در سرتاسر مسیر ثابت بوده و سطح مقطع مسیر نیز در سرتاسر مسیر یکی است.

## (۲) مدار مغناطیسی مرکب

در این نوع از مدارات مغناطیسی جنس هسته در طول مسیر ممکن است تغییر نموده و یا سطح مقطع هسته در طول مسیر ممکن است کم و یا زیاد گردد.

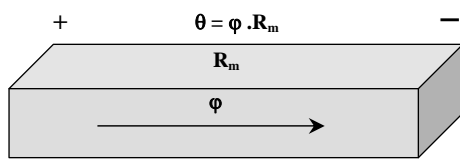
نکته ۱۰: ترانسفورماتورهای تکفاز جزء مدارات مغناطیسی ساده بوده و ماشین‌های الکتریکی دوار به علت وجود فاصله هوایی (تغییر جنس مسیر) جزء مدارات مغناطیسی مرکب می‌باشند.

نکته ۱۱: چنانچه در مدار مغناطیسی انشعاب وجود نداشته باشد فوران در همه جای مدار یکسان است (حتی در فاصله هوایی وهسته) و اگر سطح مقطع نیز در همه جا یکسان باشد چگالی فوران نیز در همه جا یکسان است.

## قوانین تحلیل مدارات مغناطیسی

## (۱) قانون اهم مغناطیسی

چنانچه  $\Phi$  فلوی مغناطیسی جاری شده در یک قطعه از یک هسته مغناطیسی با رلوکتانس  $R_m$  مطابق شکل «۴-۱» باشد، نیروی محرکه مغناطیسی به اندازه  $\theta$  در دو سر آن قطعه حاصل می‌شود که مقدار آن برابر است با:  $\theta = \Phi \cdot R_m$



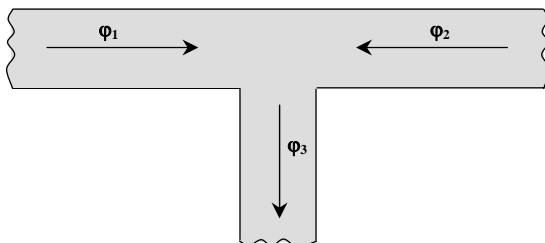
«شکل ۴-۱»

به این مقدار نیروی محرکه مغناطیسی که در دو سر رلوکتانس  $R_m$  ظاهر می‌شود افت پتانسیل مغناطیسی می‌گویند. پس طبق رابطه فوق

$$\Phi = \frac{\theta}{R_m}$$

می‌توان نوشت:

نکته ۱۲: همانطور که می‌دانیم  $H = \frac{\theta}{L}$  بوده لذا  $\theta = HL = \Phi \cdot R_m$  می‌باشد لذا به مقدار  $HL$  نیز افت پتانسیل مغناطیسی می‌گویند.



«شکل ۵-۱- تشکیل یک گره مغناطیسی»

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0$$

## (۲) قوانین کیرشهف در مدارات مغناطیسی

## (الف) KCL مغناطیسی:

در مدارات مغناطیسی جمع جبری تمامی فلوهای یک گره مغناطیسی (مانند شکل «۵-۱») در هر لحظه از زمان همواره برابر صفر می‌باشند یعنی:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0 \Rightarrow \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0 \Rightarrow \Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2$$

به عنوان مثال در شکل «۵-۱» داریم:

## (ب) KVL مغناطیسی:

در مدارات مغناطیسی جمع جبری تمامی نیروهای محرکه مغناطیسی و افت پتانسیل‌های مغناطیسی موجود در یک مسیر بسته (مانند شکل «۶-۱») در هر لحظه از زمان همواره برابر صفر

$$\sum_{i=1}^n \theta_i = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n H_i L_i = 0$$

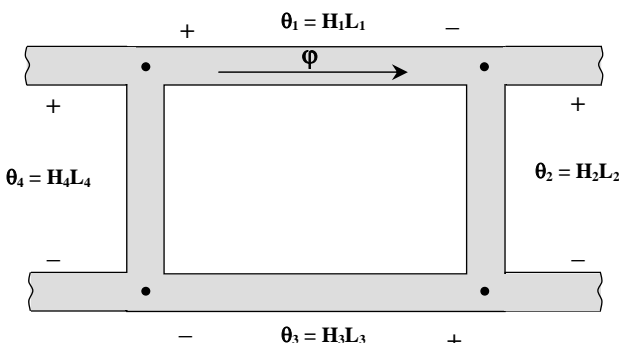
می‌باشند یعنی:

به عنوان مثال در شکل «۶-۱» داریم:

$$\sum_{i=1}^n \theta_i = 0 \Rightarrow \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \theta_4 = 0$$

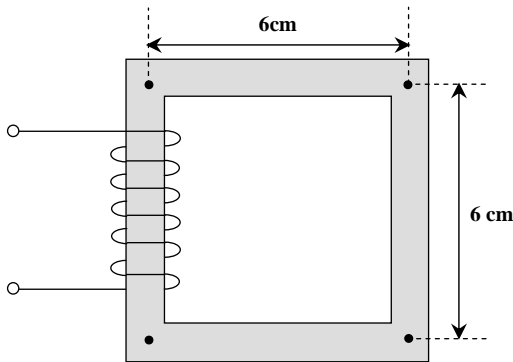
و یا:

$$\sum_{i=1}^n H_i L_i = 0 \Rightarrow H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_3 L_3 - H_4 L_4 = 0$$



«شکل ۶-۱- یک حلقه مغناطیسی»

مثال ۳۱: در مدار مغناطیسی شکل زیر اگر سطح مقطع در کل هسته  $5 \text{ cm}^2$  بوده و ضریب نفوذ نسبی هسته در همه جای آن  $2000$  باشد، رلوکتانس کل هسته چند  $\frac{kAT}{m}$  است؟ ( $\pi = 3$ )



(۱)  $20000$

(۲)  $20$

(۳)  $5000$

(۴)  $50$

پاسخ: گزینه «۲» طول متوسط هسته برابر محیط متوسط مربع مدار فوق است. لذا:

$$L_c = 6 + 6 + 6 + 6 = 24 \text{ cm} = 0.24 \text{ m}$$

$$R_m = \frac{L_c}{\mu A} = \frac{0.24}{4\pi \times 10^{-7} \times 2000 \times 5 \times 10^{-4}} = 20000 \frac{AT}{Wb} = 20 \frac{kAT}{Wb}$$

مثال ۳۲: هسته فولادی یک بوبین به سطح مقطع  $5 \text{ cm}^2$  سانتی متر مربع دارای فاصله هوایی  $5$  میلیمتری است. اگر شدت میدان

در فاصله هوایی  $10^\circ$  ( $\frac{A}{m}$ ) و از مقاومت مغناطیسی هسته صرف نظر شود نیروی محرکه مغناطیس کننده چند آمپر دور است؟

(۴)  $2 \times 10^8$

(۳)  $5 \times 10^9$

(۲)  $5 \times 10^3$

(۱)  $4 \times 10^3$

$$\theta = H \cdot L = 10^\circ \times 5 \times 10^{-3} = 5 \times 10^3 \text{ A.T}$$

پاسخ: گزینه «۲»

مثال ۳۳: در یک مدار مغناطیسی اگر شدت میدان مغناطیسی  $600 \frac{A.T}{m}$  و طول متوسط آن  $30$  سانتیمتر باشد فوران مغناطیسی  $0.06 \text{ Wb}$

در آن جاری شود، رلوکتانس مدار مغناطیسی چند آمپر بر وبر است؟

(۴)  $3000$

(۳)  $2000$

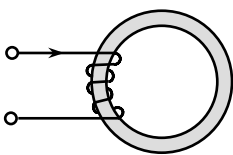
(۲)  $1800$

(۱)  $1280$

$$\theta = H.L = 600 \times 30 \times 10^{-2} = 180 \text{ A.T} \Rightarrow R_m = \frac{\theta}{\phi} = \frac{180}{0.06} = 3000 \frac{A}{Wb}$$

پاسخ: گزینه «۴»

مثال ۳۴: در شکل زیر سیم پیچ دارای  $400$  دور و جریان  $0.5$  آمپر و فوران هسته نیز  $0.1$  ویر است هسته از جنس آهن و به طول متوسط  $20$  سانتی متر و سطح مقطع  $5$  سانتی متر مربع است. ضریب نفوذ مغناطیسی هسته کدام است؟



(۲)  $2 \frac{H}{m}$

(۱)  $0.2 \frac{H}{m}$

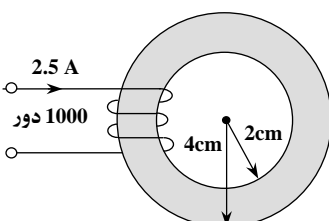
(۴)  $20 \frac{H}{m}$

(۳)  $0.02 \frac{H}{m}$

پاسخ: گزینه «۳» چون در مدار مغناطیسی فقط یک مسیر و با یک جنس و سطح مقطع وجود دارد پس کل آمپر دور تولیدی سیم بندی در همین مسیر مصرف می شود لذا:

$$NI = R_m \cdot \phi \Rightarrow R_m = \frac{NI}{\phi} = \frac{400 \times 0.5}{0.1} = 2000 \frac{AT}{Wb} \Rightarrow \mu = \frac{L_c}{R_m A} = \frac{20 \times 10^{-2}}{2000 \times 5 \times 10^{-4}} = 20 \times 10^{-3} \frac{H}{m} = 0.02 \frac{H}{m}$$

مثال ۳۵: در مدار مغناطیسی شکل زیر سطح مقطع در همه جای هسته  $2 \text{ cm}^2$  بوده و ضریب نفوذ نسبی هسته نیز  $6000$  می باشد، چنانچه سیم پیچی  $1000$  دوری هسته دارای جریان  $2.5 \text{ A}$  باشد، فلوی جاری شده در هسته چقدر است؟



(۱)  $25 \text{ mWb}$

(۲)  $10 \text{ mWb}$

(۳)  $20 \text{ mWb}$

(۴)  $5 \text{ mWb}$