GORETEX

فصل اوّل

آشنائی با مدارهای مغناطیسی

۳۰ صفحه

INTRODUCTION TO MAGNETISM

AND MAGNETIC CIRCUITS

آشنائی با مدارهای مغناطیس

مقدمه:

امروزه دنیائی که در آن زندگی میکنیم ، دنیای الکترونیک نامیده میشود . در جهان امروزی بشر بطرز عجیبی به الکتریسیته[۱] وابسته شده است و بدون آن زندگی بشر متمدن تقریبا" غیر ممکن است. اما باید خاطر نشان ساخت که پدیده حادوئی مغناطیس نیز نقش بسیار عمده‌ای در زندگی بشر ایفا میکند . بدون پدیده مغناطیس لوازم الکتریکی متداول از قبیل رادیو ، تلویزیون ، یخچال ، تهویه مطبوع ، و موتورها قادر بکار نخواهند بود . بطور کلی میتوان گفت با آنکه بشر به الکتریسیته وابستگی شدید پیدا کرده است ولی بدون پدیده مغناطیس قادر باستفاده از الکتریسیته نخواهیم بود . بطور خلاصه میگوئیم که بدون پدیده مغناطیس زندگی بشر متمدن غیر ممکن خواهد شد .

۱ ــ ۱ تشابه بین مغناطیس و الکتریسیته:

1-1 SIMILARiTIES BETWEEN MAGNETISM AND ELECTRICITY

دستگاههائی[۲] که در این کتاب مورد مطالعه قرار میگیرند تحت عنوان لوازم الکترو مغناطیسی[۳] بررسی میشوند . بعبارت دیگر عملکرد این دستگاهها به خاصیتهای الکتریکی و مغناطیسی آنها بستگی دارد . علاوه بر این باید خاطر نشان ساخت که عملکرد این دستگاهها به تاثیرات متقابل خواص الکتریکی و مغناطیسی آنها نیز بستگی خواهد داشت .

در این فصل لازم است مدارهای مغناطیسی[۴] نسبتا" ساده‌ای را مطرح کنیم تا عملکرد دستگاههای الکترومغناطیسی را بهتر درک نمائیم . در این فصل درخواهیم یافت که مدارهای مغناطیسی بسیار شبیه مدارهای الکتریکی هستند .

۱ــ۱ــ۱ : شار (ϕ) 1-1.1 Flux (ϕ)

شار[۵] در یک مدار مغناطیسی مشابه جریان در یک مدار الکتریکی است . یک قانون کلی بشرح زیر موجود است و در بیان مسائل تکنیکی از آن استفاده میشود .

---

1) Electricity 2) Devices 3) Electromagnetic
4) Magnetic-Circuit 5) Flux

$$\text{معلول (effect)} = \frac{\text{علت}}{\text{عکس‌العمل (مخالفت)}} = \frac{\text{cause}}{\text{opposition}}$$

طبق این قانون شار و جریان [۱] هر دو معلول هستند. شار را بوسیله خطوط فرضی وموهومی در مدار مغناطیسی نشان میدهند. مدارهای مغناطیسی از قسمتهای گوناگون تشکیل شده است و مواد مصرفی برای مدارهای مغناطیسی بگونه‌ای است که خطوط شار [۲] بسهولت شکل میگیرند. این مواد را مواد فرومغناطیسی [۳] مینامند. مواد فرو مغناطیسی در یک مدار مغناطیسی مشابه یک هادی [۴] خوب در یک مدار الکتریکی است.

واحد شار در سیستم احاد انگلیسی، خط [۵] (یا ماکسول) [۶] میباشد و واحد آن در سیستم آحاد بین‌المللی وبر [۷] می‌باشد (wb). منبعد در این کتاب سیستم آحاد بین‌المللی را با علامت اختصاری SI و سیستم آحاد انگلیسی را با علامت اختصاری ENG نشان میدهیم. باید دانست که:

$$1 \text{ weber} = 10^8 \text{ lines (or } 10^8 \text{ maxwells)} \qquad (۱-۱)$$

یکی از کمیت‌های مهم در مدارهای مغناطیسی، چگالی شار (B) میباشد. چگالی شار مقدار شاریست که از سطحی بمساحت A که عمود بر شار میباشد عبور میکند. در سیستم (ENG) داریم:

$$B = \frac{\phi \text{ lines}}{\mathbf{A}\ \text{in}^2} \quad \left(\text{or } \frac{\text{maxwells}}{\text{in}^2}\right) \qquad (۱-۲a)$$

در سیستم (SI) داریم:

$$B = \frac{\phi \text{ Wb}}{\mathbf{A}\ \text{m}^2} \quad [\text{or tesla (T)}] \qquad (۱-۲b)$$

---

1) Current 2) Lines of Flux 3) Ferromagnetic
4) Conductor 5) Line 6) Maxwell 7) Weber

مثال ۱ – ۱ (سیستم ENG): ***Example 1-1 (English)***

سطح مقطع یک هسته ۳ اینچ مربع میباشد ، اگر چگالی شار 80,000 lines/in². باشد مطلوبست محاسبه شار در این هسته .

حل:

از رابطه (a ۲ – ۱) داریم : $B = \frac{\phi}{A}$

در نتیجه :

$$\phi = BA = 80{,}000 \text{ lines/in}^2 \times 3 \text{ in}^2$$
$$= 240{,}000 \text{ lines} \quad \text{(or maxwells)}$$

مثال ۲ – ۱ (سیستم (SI)): ***Example 1-2 (SI)***

سطح مقطع یک هسته ۴%. متر مربع میباشد اگر چگالی شار[1] 1.5 T (تسلا)[2] باشد ، شار در هسته را حساب کنید . تسلا معادل وبر بر متر مربع میباشد .

حل:

از رابطه (b ۲ – ۱) داریم : $B = \frac{\phi}{A}$

در نتیجه :

$$\phi = BA$$
$$= 1.5 \text{ T} \times 0.04 \text{ m}^2$$
$$= 0.06 \text{ Wb}$$

۱ – ۱ – ۲ نیروی محرکه مغناطیسی : ***1-1.2 Magnetomotive Force, MMF(U)***

نیروی محرکه مغناطیسی[3] که منبعد آنرا با MMF یا U نشان میدهیم مشابه نیروی محرکه الکتریکی[4] (EMF) در مدارهای الکتریکی میباشد . همانطور که EMF باعث میگردد جریان در مدار الکتریکی برقرار شود ، نیروی محرکه مغناطیسی (MMF) نیز باعث میشود که شار در مدارهای مغناطیسی بوجود آید. با توجه به قانون کلی ذکر شده در قبل EMF و MMF هر دو "علت" محسوب میشوند .

---

1) Flux-Density 2) Tesla

3) Magnetic-Motive-Force 4) Electromotive-Force

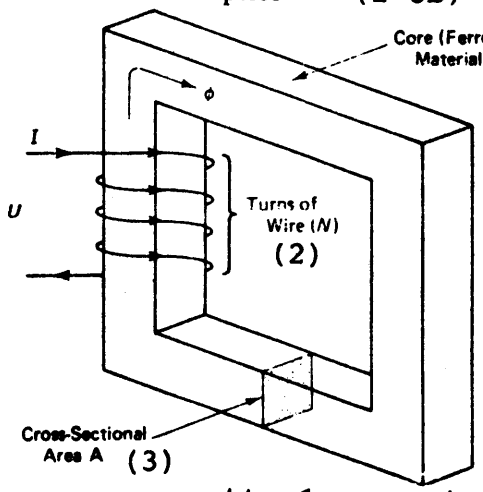
در اینجا باید اختلاف بین مدارهای الکتریکی و مدارهای مغناطیسی توجه کرد .
الف : در مدارهای الکتریکی بدون وجود EMF ، جریان الکتریکی برقرار نمیشود .
ب : در مدارهای مغناطیسی بدون وجود MMF شار برقرار میشود .
مثال ساده مربوط به بند "ب" همان آهن ربای دائمی [1] (مغناطیس دائمی) خواهد بود . آهن ربای دائمی معمولا" بشکل U بوده و اکثر خوانندگان با آن آشنائی دارند .

ساده‌ترین EMF در مبحث الکتریسیته همان باطری است . در مدارهای مغناطیسی ساده‌ترین (U) MMF ، توسط سیمی [2] که بدور هسته فرو مغناطیسی پیچیده شده و توسط جریان مستقیم [3] تغذیه میگردد بوجود می‌آید . (بشکل ۱ ــ ۱ نگاه کنید) .

(U) MMF از نظر عددی معادل حاصلضرب تعداد دورهای سیم (N) و جریان سیم (I) میباشد .

در سیستم (ENG) داریم : $U = NI$ ampere-turns (1-3a)

در سیستم (SI) داریم : $U = NI$ amperes (1-3b)



۱ : هسته از جنس مواد فرومغناطیس
۲ : تعداد دور سیم
۳ : سطح مقطع

شکل ۱ ــ ۱ : نمونه ساده‌ای از طرز ایجاد نیروی محرکه مغناطیسی MMF

1) Permanent-Magnet 2) Wire
3) Direct - Current

در اینجا خاطر نشان میسازیم که MMF اعمال شده به مدار مغناطیسی در شکل (۱ – ۱) معادل مجموع افتهای MMF [۱] در کل حلقه [۲] میباشد. این قانون نظیر قانون ولتاژ کیرشف [۳] است و در ادامه این فصل راجع به آن بیشتر توضیح میدهیم.

برای پیدا کردن جهت شار کافی است که دست راست خود را در جهت جریان به دور هسته قرار دهیم، در این صورت جهت شست دست راست، جهت شار در هسته را نشان میدهیم.

یکی دیگر از کمیت‌های مهم در مدارهای مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی (H) است. از نظر عددی H اینچنین حساب میشود:

در سیستم (ENG) داریم:

$$H = \frac{NI}{l} \quad \frac{\text{ampere-turns}}{\text{inch}} \qquad \text{(1-4a)}$$

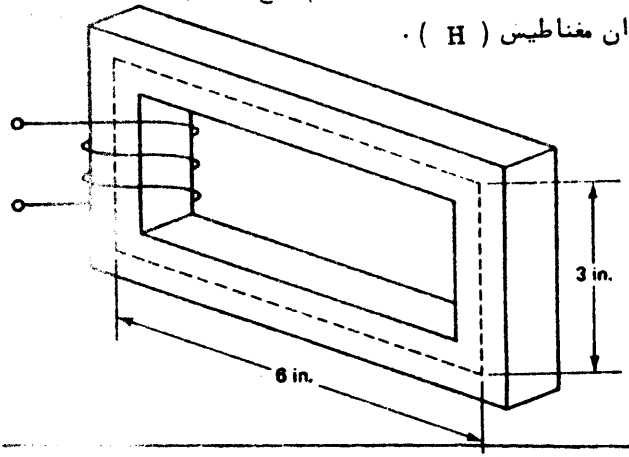
در سیستم (SI) داریم

$$H = \frac{NI}{l} \quad \frac{\text{amperes}}{\text{meter}} \qquad \text{(1-4b)}$$

در روابط اخیر L، طول متوسط مدار مغناطیسی میباشد.

مثال ۳ – ۱ (سیستم ENG): *Example 1-3 (English)*

یک هسته فرو مغناطیسی مطابق شکل (۲ – ۱) مفروض است و یک سیم پیچ ۱۰۰۰ دوری به دور آن پیچیده شده است. اگر جریان سیم پیچ ۲ امپر باشد، مطلوبست محاسبه MMF و شدت میدان مغناطیس (H).



شکل ۲ – ۱: هسته مربوط به مثال (۳ – ۱)

۱) MMF-Drops 2) Loop 3) Kirchhoff's Voltage Law 4) Magnetic-Field-Intensity

حل:

در اینجا فرض برآن است که سطح مقطع وجنس هسته در کل مسیر یکسان میباشد .
از رابطه (a ۳ – ۱) داریم :

$$U = NI$$
$$= 1000(2) = 2000 \text{ A-turns}$$

H را از رابطه (a ۴ – ۱) بدست می‌آوریم . ابتدا باید طول متوسط مسیر را حساب بکنیم (L) . طول متوسط مسیر با توجه به خط چین‌ها در شکل (۲ – ۱) بدست می‌آید .

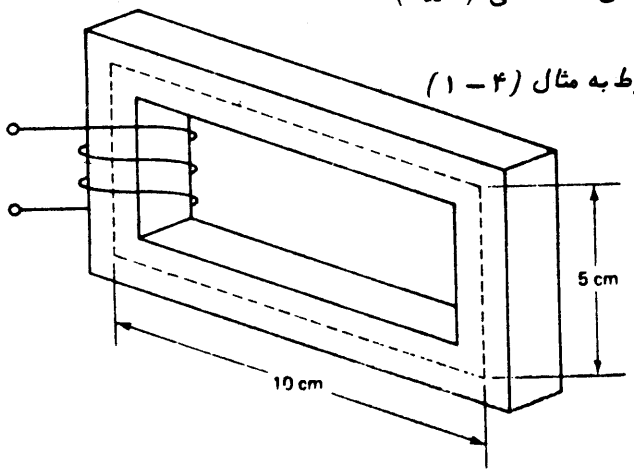
$$l = 3 \text{ in.} + 6 \text{ in.} + 3 \text{ in.} + 6 \text{ in.}$$
$$= 18 \text{ in.}$$

لذا :

$$H = \frac{NI}{l}$$
$$= 2000 \text{ A-turns}/18 \text{ in.}$$
$$= 111.11 \text{ A-turns/in.}$$

مثال ۴ – ۱ (سیستم SI) : ***Example 1-4 (SI)***

یک هسته فرو مغناطیسی مطابق شکل (۳ – ۱) مفروض است و یک سیم پیچ ۱۰۰۰ دوری به دور آن پیچیده شده است . اگر جریان سیم پیچ ۲ آمپر باشد ، مطلوبست محاسبه MMF و شدت میدان مغناطیسی (H) .



شکل ۳ – ۱ : هسته مربوط به مثال (۴ – ۱)

حل:

در اینجا فرض برآن است که سطح مقطع وجنس هسته در کل مسیر یکسان میباشد .
از رابطه (b ۳ – ۱) داریم :

$$U = NI$$
$$= 1000(2) = 2000\ A$$

H را از رابطه (b ۴ – ۱) بدست می‌آوریم ولی ابتدا باید طول متوسط مسیر را حساب کنیم (L) . طول متوسط مسیر را میتوان با توجه به خط چین‌ها در شکل (۳ – ۱) بدست آورد .

$$l = 5\ cm + 10\ cm + 5\ cm + 10\ cm$$
$$= 30\ cm$$
$$l = 30(0.01) = 0.3\ m$$

لذا :

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{2000\ A}{0.3\ m} = 6666.67\ A/m$$

۳–۱–۱ رلوکتانس : ($\mathcal{R}$)

1-1.3 Reluctance ($\mathcal{R}$)

رلوکتانس[1] ($\mathcal{R}$) در یک مدار مغناطیسی نظیر مقاومت[2] در یک مدار الکتریکی است . با توجه به قانون کلی ذکر شده در اوایل این فصل میتوان گفت که مقاومت ورلوکتانس هر دو عکس‌العمل (مخالفت) محسوب میشوند . فرمول مقاومت یک سیم مسی[3] را بخاطر می‌آوریم :

$$R = \frac{\rho l}{A} \qquad (۱ - ۵)$$

اگر بجای مقاومت ویژه[4] (ρ) از هدایت ویژه[5] (σ) استفاده شود داریم :

$$R = \frac{l}{\sigma A} \qquad (۱ - ۶)$$

از رابطه (۶ – ۱) درمییابیم که مقاومت یک سیم مسی با طول سیم نسبت مستقیم داشته ولی با هدایت ویژه و سطح مقطع نسبت معکوس دارد .

در مدار مغناطیسی ، رلوکتانس اینچنین تعریف میشود :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \qquad (۱ - ۷)$$

در رابطه (۷ – ۱) ، (l) طول متوسط مدار مغناطیسی یا هسته مورد نظر میباشد .

همچنین در این رابطه A سطح مقطع موثر مدار مغناطیسی بوده و در این فصل

---

1) Reluctance 2) Resistance 3) Copper Wire
4) Resistivity 5) Conductivity

فرض بر آن است که سطح مقطع در کل مسیر مدارهای مغناطیسی یکنواخت میباشد . در رابطه (۱ - ۱) ، μ نفوذ پذیری مغناطیسی (پرمابلیته) [۱] مدار مغناطیسی موردنظر نامیده میشود . پر مابلیته یک ماده بیانگر شدت و ضعف آن ماده در رابطه با بوجود آمدن شار در آن خواهد بود . بعبارت دیگر تحت MMF مفروضی اگر پرمابلیته ماده بزرگ باشد ، در این صورت شار بیشتری در آن ماده بوجود خواهد آمد و بالعکس اگر پر مابلیته ماده کوچک باشد در این صورت شار کمتری در آن ماده بوجود می‌آید . پرمابلیته هوا را نشان میدهند .

در سیستم (ENG) داریم :

$$\mu_0 = 3.19 \times 10^{-3} \frac{\text{kilolines/in}^2}{\text{A-turns/in.}} \qquad (۱-۸a)$$

در سیستم (SI) داریم :

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T}}{\text{A/m}} \qquad (۱-۸b)$$

با آنکه پر مابلیته هوا عددی ثابت است ولی پر مابلیته مواد فرومغناطیسی عدد ثابتی نخواهد بود .

پرمابلیته باعث پیوند چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی نیز میگردد . این را رابطه زیر بیان می‌کند .

$$B = \mu H \qquad (۱-۹)$$

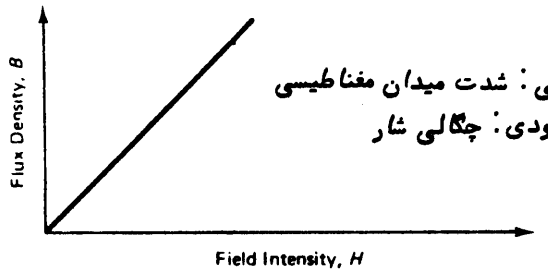
اگر μ عدد ثابتی باشد (هوا یا مواد غیر فرومغناطیسی [۲]) ، رابطه (۹ - ۱) را بصورت ترسیمی نشان داد (شکل ۴ - ۱) . شیب [۳] خط نشان داده شده در شکل (۱) پرمابلیته ماده غیر فرومغناطیسی را نشان میدهد .

$$\text{slope} = \mu = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{B}{H}$$

توجه کنید که در شکل (۴ - ۱) با افزایش H ، B نیز زیاد میشود و لذا این دو کمیت با یکدیگر رابطه خطی دارند . در اینجا یادآور میشویم که اگر در مواد غیر فرومغناطیسی باشند B را میتوان از رابطه (۹ - ۱) بدست آورد (و بالعکس) .

---

1) Permability 2) Non Ferromagnetic 3) Slope



محور افقی: شدت میدان مغناطیسی
محور عمودی: چگالی شار

شکل ۴ ـ ۱: تغییرات B برحسب H برای مواد غیر فرومغناطیسی (هوا، چوب، پلاستیک و ...)

مثال ۵ ـ ۱ (سیستم ENG): ***Example 1-5 (English)***

در محفظه‌ای پر از هوا شدت میدان مغناطیسی (H) برابر 30 A-turns/in. میباشد مطلوبست محاسبه B (چگالی شار) در این محفظه.

حل:

از رابطه (۹ ـ ۱) استفاده میکنیم و میدانیم برای هوا $\mu = \mu_0$ است (رابطه ۸ a ـ ۱). لذا:

$$B = \mu_0 H$$

$$= 3.19 \times 10^{-3} \frac{\text{kilolines/in}^2}{\text{A-turns/in.}} (30 \text{ A-turns/in.})$$

$$= 95.7 \text{ lines/in}^2$$

مثال ۶ ـ ۱ (سیستم SI): ***Example 1-6 (SI)***

در محفظه‌ای پر از هوا، شدت میدان مغناطیسی (H) برابر 900 A/m میباشد، مطلوبست محاسبه B (چگالی شار) در این محفظه.

حل:

از رابطه (۹ ـ ۱) استفاده میکنیم و میدانیم برای هوا $\mu = \mu_0$ است (رابطه ۸ b ـ ۱). لذا:

$$B = \mu_0 H$$

$$= 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T}}{\text{A/m}} (900 \text{ A/m})$$

$$= 0.113 \times 10^{-2} \text{ T}$$

Example 1-7 (English) مثال ۷ ـ ۱ (سیستم ENG) :

200 000 lines در محفظه‌ای پر از هوا به سطح مقطع ۴ اینچ مربع ، شار معادل
میباشد ، مطلوبست محاسبه H در این محفظه .

حل :

ابتدا از رابطه (۲a ـ ۱) استفاده کرده و B را بدست می‌آوریم :

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

$$= 200{,}000 \text{ lines}/4 \text{ in}^2$$

$$= 50{,}000 \text{ lines/in}^2 = 50 \text{ kilolines/in}^2$$

$$B = \mu_0 H$$

حال بسهولت میتوان گفت :

$$H = \frac{B}{\mu_0}$$

$$= \frac{50 \text{ kilolines/in}^2}{3.19 \times 10^{-3} \dfrac{\text{kilolines/in}^2}{\text{A-turns/in.}}} = 15{,}670 \text{ A-turns/in.}$$

Example 1-8 (SI) مثال ۸ ـ ۱ (سیستم SI) :

در محفظه‌ای پر از هوا به سطح مقطع ۰/۱ متر مربع شار معادل 0.002 Wb میباشد مطلوبست محاسبه H در این محفظه .

حل :

ابتدا از رابطه (۲b ـ ۱) استفاده کرده و B را حساب میکنیم :

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

$$B = \frac{0.002 \text{ Wb}}{0.1 \text{ m}^2} = 0.02 \text{ Wb/m}^2 = 0.02 \text{ T}$$

$$B = \mu_0 H$$

حال بسهولت میتوان گفت :

$$H = \frac{B}{\mu_0}$$

$$= \frac{0.02 \text{ T}}{4\pi \times 10^{-7} \dfrac{\text{T}}{\text{A/m}}}$$

$$= 15.9 \times 10^3 \text{ A/m} = 15{,}900 \text{ A/m}$$

۲ – ۱ رابطه غیر خطی بین B و H در مواد فرومغناطیسی :

1-2 NONLINEAR EFFECTS OF FERROMAGNETIC MATERIALS

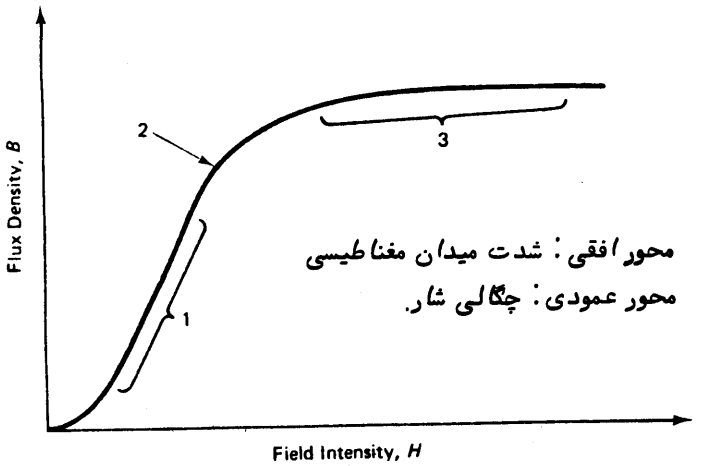
هرگاه با مدارهای مغناطیسی شامل مواد غیر فرومغناطیسی سروکار داشتیم حل این مسائل با توجه به مثالهای قبلی بسیار ساده میباشد . اما هرگاه با مدارهای مغناطیسی شامل مواد فرومغناطیسی برخوردنمودیم ، در این صورت وضعیت قدری پیچیده‌تر میشود ، زیرا پرمابلیته مواد فرو مغناطیسی عدد ثابتی نمیباشد . باید توجه داشت که در مواد فرو مغناطیسی اگر B افزایش یابد ، تحت شرایطی خاص پرمابلیته کاهش پیدا میکند ، علت این امر وجود پدیده اشباع (۱) میباشد . اگر به یک هسته فرومغناطیسی ، MMF اعمال کنیم در این صورت شار در هسته (۲) بوجود می‌آید . هرچه MMF را بیشتر کنیم ، شار نیز بیشتر میشود ، اما بالاخره به نقطه‌ای خواهیم رسید که با افزایش MMF (یا H) شار و بالنتیجه B آن افزایش چشمگیر اولیه را نخواهد داشت . در اینصورت میگوئیم که هسته اشباع شده است .

پدیده اشباع را میتوان با یک مثال ملموس بهتر توضیح داد . فرض کنید در ایستگاهی یک اتوبوس خالی وجود دارد . در ابتدا مسافران بسهولت وارد اتوبوس شده و هر مسافر یک جای خالی برای خود دست و پا میکند . هنگامی که اتوبوس پر از مسافر گردید سوار شدن مسافران بعدی خالی از اشکال نخواهد بود ، در اینصورت اتوبوس نیز اشباع گردیده است (درست مثل هسته فرو مغناطیسی) البته اگر مسافران قدری بهم فشار بیاورند و بصورت فشرده درون اتوبوس قرار گیرند ، همواره برای یک یا دو مسافر دیگر جای خالی باز خواهد شد (درست مثل هسته فرو مغناطیسی) یعنی اگر هسته فرو مغناطیسی ، بحالت اشباع برود و باز H را زیاد کنیم ، شار یا چگالی شار بمیزان ناچیزی افزایش خواهد یافت . شکل (۵– ۱) منحنی تغییرات B برحسب H را برای هسته‌های فرو مغناطیسی متداول نشان میدهد . به این منحنی‌ها ، منحنیهای B–H یا منحنیهای مغناطیس شوندگی (۳) اتلاق میگردد . واضح است که منحنیهای B–H برای مواد فرو مغناطیسی مختلف یکسان نخواهد بود .

با توجه بشکل (۵ – ۱) در مییابیم که منحنی B–H از سه ناحیه متمایز تشکیل شده است .

---

1) Saturation 2) Core 3) Magnetizing-Curve



شکل ۵ – ۱: منحنی مغناطیس شوندگی یک ماده فرو مغناطیسی

الف: ناحیه شماره ۱:

در این ناحیه با افزایش H ، افزایش متناسبی از B خواهیم داشت.

ب: ناحیه شماره ۲:

با افزایش بیشتر H از ناحیه شماره ۱ وارد ناحیه شماره ۲ میشویم و معمولا" این ناحیه به پاشنه منحنی[1] B-H معروف است. در این ناحیه اشباع شدن هسته شروع میشود.

ج: ناحیه شماره ۳:

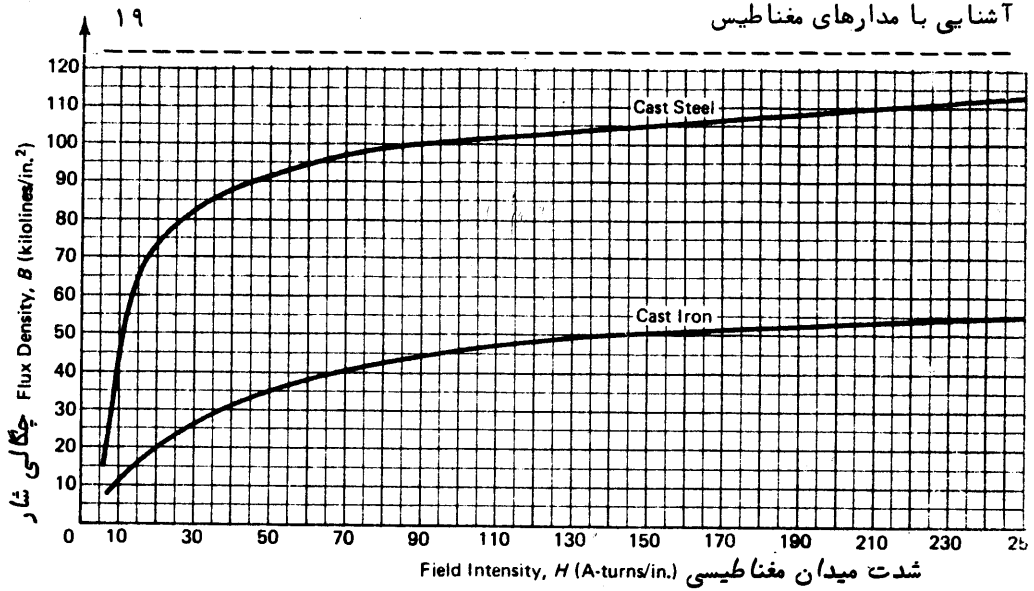
در این ناحیه هسته کاملا" اشباع شده است. توجه نمائید که با افزایش H ، B بمیزان ناچیزی زیاد میشود.

شکلهای (۶–۱) و (۷–۱) منحنیهای B-H را برای چدن[2] و فولاد ریخته‌گری[3] نشان میدهد.

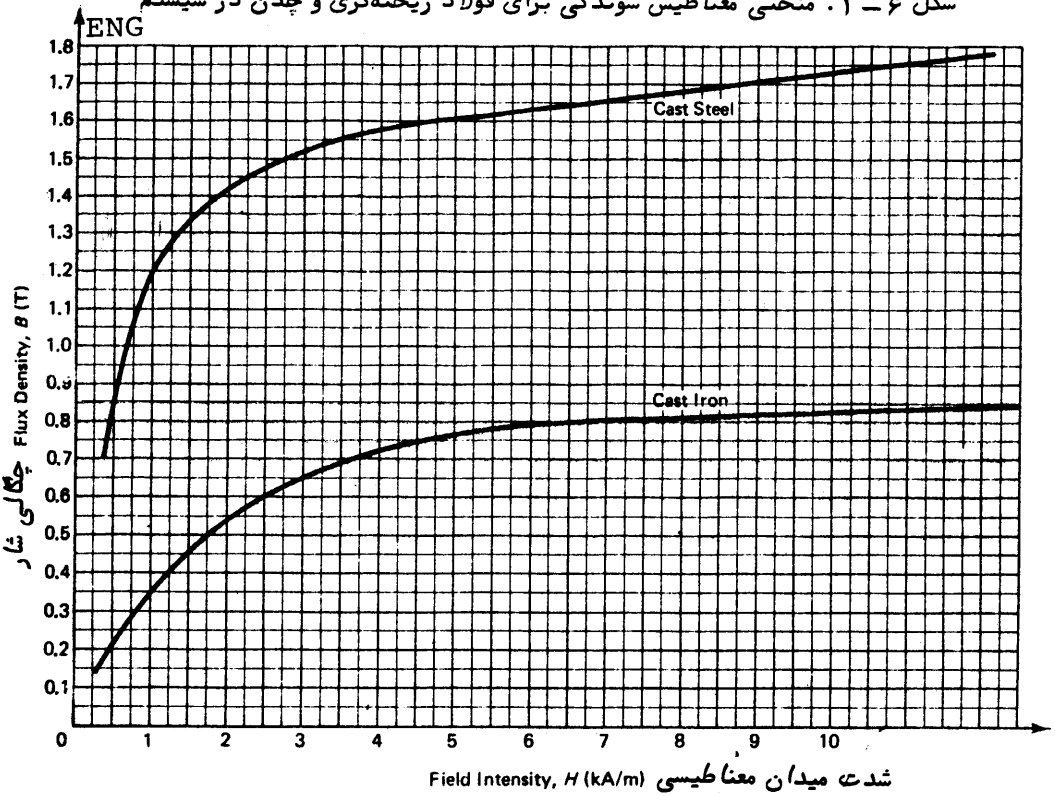
شکل (۶–۱) برای سیستم (ENG) رسم شده و شکل (۷–۱) برای سیستم (SI) ترسیم گردیده است.

---

1) Knee 2) Cast-Iron 3) Cast-Steel



شکل ۶ ـ ۱ : منحنی مغناطیس شوندگی برای فولاد ریخته‌گری و چدن در سیستم ENG



شکل ۷ ـ ۱ : منحنی مغناطیس شوندگی برای فولاد ریخته‌گری و چدن در سیستم SI

مثال ۹ – ۱ (سیستم ENG): ***Example 1-9 (English)***

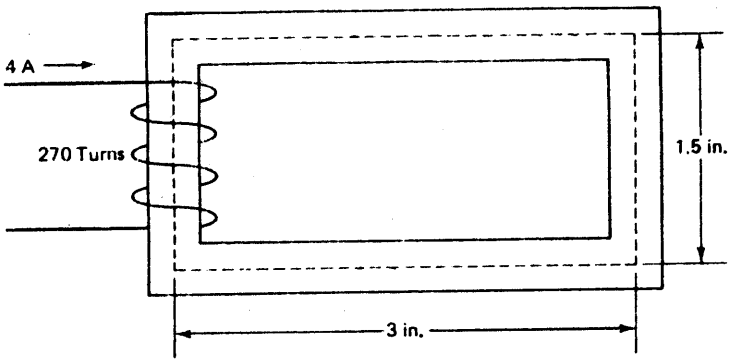
هسته‌ای مطابق شکل (۸ – ۱) مفروض است . جنس هسته از چدن بوده وسطح مقطع آن در کل مسیر یکنواخت است . مطلوبست محاسبه چگالی شار (B) در این هسته :

حل :

$$l = 3 \text{ in.} + 1.5 \text{ in.} + 3 \text{ in.} + 1.5 \text{ in.}$$
$$= 9 \text{ in.}$$

از رابطه (۴a – ۱) داریم :

$$H = \frac{NI}{l}$$
$$= \frac{270(4)}{9} = 120 \text{ A-turns/in.}$$

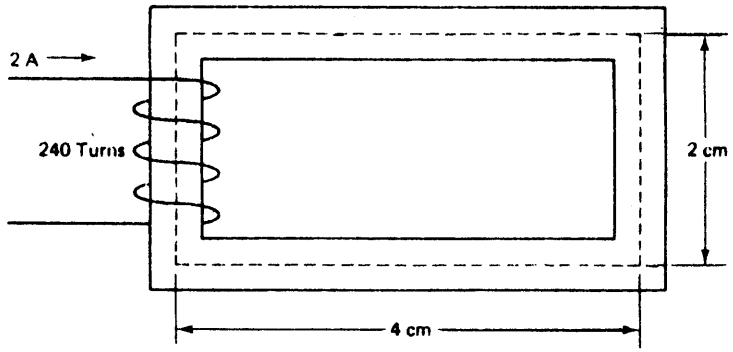


شکل ۸ – ۱ هسته مربوط به مثال ۹ – ۱

از منحنی B–H در شکل (۶ – ۱) استفاده میکنیم . در اینجا H معلوم بوده و B را از روی منحنی میخوانیم (منحنی B–H برای چدن) . در اینحال میبینیم که B معادله 49Kilolines/in^2 خواهد بود . در اینجا متذکر میشویم که دیگر نمیتوان از رابطه (۹ – ۱) استفاده کرد .

مثال ۱۰ – ۱ (سیستم sI): ***Example 1-10 (SI)***

هسته‌ای مطابق شکل (۹ – ۱) مفروض است . جنس هسته از چدن بوده و سطح مقطع آن در کل مسیر یکنواخت است . مطلوبست محاسبه چگالی شار (B) در این هسته .



شکل ۹ ــ ۱ : هسته مربوط به مثال ۱۰ ــ ۱

$$l = 4\text{ cm} + 2\text{ cm} + 4\text{ cm} + 2\text{ cm}$$
$$= 12\text{ cm}$$
$$= 12(0.01) = 0.12\text{ m}$$

از رابطه (۴b ــ ۱) داریم :

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

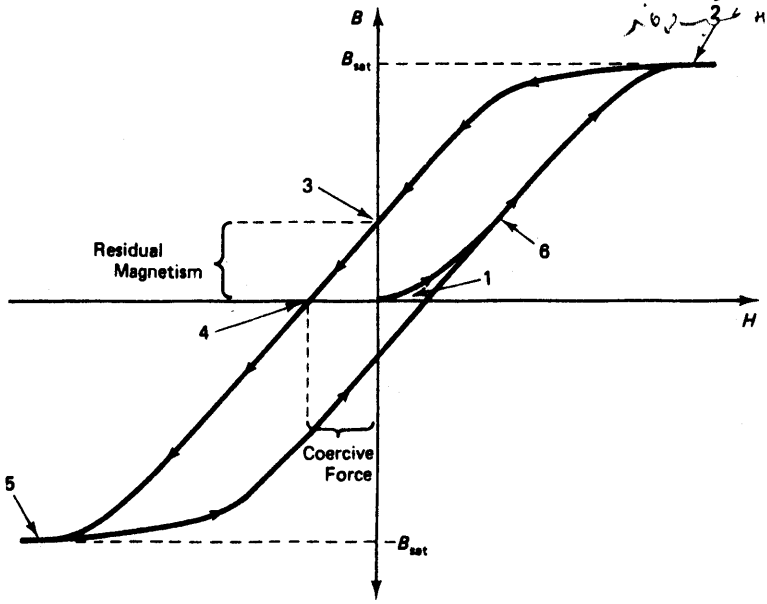
$$H = \frac{240(2)}{0.12}$$
$$= 4000\text{ A/m} = 4\text{ kA/m}$$

حال از منحنی B-H در شکل (۷ ــ ۱) استفاده کرده و با دانستن H ، B را میخوانیم ملاحظه میکنیم B معادل ۰/۷۱ تسلا خواهد بود . توجه کنید که در اینجا دیگر رابطه (۹ ــ ۱) کارساز نخواهد بود .

۱ ــ ۲ ــ ۱ هیسترزیس: 1-2.1 Hysteresis

یکی دیگر از پدیده‌های بسیارمهم و جالب که درمواد فرو مغناطیسی مشاهده میشود همان پدیده هیسترزیس است برای بیان این پدیده بهتر است از منحنی B-H مطابق شکل (۱۰ ــ ۱) کمک گرفت . فرض میکنیم به دور هسته فرو مغناطیسی سیم

پیچی بسته شده باشد و از آن جریان عبور کند . با افزایش MMF (افزایش H) مقدار شار و B نیز افزایش میابد تا اینکه هسته اشباع شود (نقطه ۱ تا ۲ در شکل ۱۰ – ۱) حال اگر جریان سیم پیچ را کاهش دهیم وآنرا به صفر برسانیم در اینصورت MMF و H صفر میشوند ولی B صفر نخواهد شد (نقطه ۲ تا ۳ در شکل ۱۰ – ۱) .



شکل ۱۰ – ۱ : منحنی مغناطیس شوندگی و حلقه هیستر زیس

بعبارت ساده‌تر هسته خاصیت مغناطیسی خود را حفظ میکند . این خاصیت مغناطیسی پدیدار شده در هسته را پسماند مغناطیسی[1] مینامند .

حال اگر جهت جریان را عوض کنیم و بتدریج آنرا افزایش دهیم (در جهت منفی) در اینصورت B صفر خواهد شد . شدت میدان مغناطیسی منفی (H منفی) ، مورد نیاز جهت صفر نمودن B را نیروی Coercive یا نیروی خنثی‌کننده‌نامند. (نقطه ۴ در شکل ۱۰ – ۱) . اگر جریان بیشتر منفی گردد ، دوباره هسته اشباع خواهد شد . در اینصورت پلارتیه B مخالف پلارتیه‌اولیه‌خواهدبود (نقطه۵ در شکل ۱۰ – ۱) حال اگر دوباره‌جریان‌را بسمت‌صفر بیاوریم وآنرا محددا " مثبت نمائیم منحنی

---

1) Residual-Magnetism 2) Coercive-Force

در نقطه ۶ به منحنی اولیه‌ملحق‌خواهد شد . حلقه بسته حاصله از وصل نقاط ۲ ، ۳ ، ۴ ، ۵ ، ۶ ، ۲ ، را حلقه هیسترزیس(۱) مینامند و این پدیده را که هرگاه B_H صفر گردد ، صفر نخواهد شد را نیز پدیده هیسترزیس مینامند .

باید توجه داشت که :

الف: حلقه هیسترزیس نسبت به مرکز مختصات منحنی B-H متقارن است . بعبارت ساده‌تراگر B1 مربوط‌به H_1 باشددراینصورت B_1- مربوط‌به H_1- خواهد بود .

ب: برای شدت میدان مغناطیسی (H) مفروضی دو مقدار B از روی منحنی بدست خواهد آمد و این مورد بستگی به‌آن دارد که‌آیا در مرحله افزایش H هستیم و یا در مرحله کاهش آن :

ج: هرگاه یک ماده فرو مغناطیسی خاصیت مغناطیسی پیدا نمود تنها راه غیر مغناطیسی (۲) کردن آن ماده‌قراردادن آن ماده درون یک سیکل مغناطیس شوندگی (۳) است . بعبارت ساده‌تراگر بخواهیم B و H هر دو صفر شوند ماده فرو مغناطیسی باید درون یک سیکل مغناطیسی شوندگی قرار گیرد .

د: حداکثر چگالی شار (Bmax) (چگالی شار ماکزیمم) در یک ماده فرو مغناطیسی تابعی از درجه حرارت میباشد . با افزایش درجه حرارت ، حداکثر چگالی شار (چگالی شار مربوطبه‌ناحیه‌اشباع) کاهش‌مییابد . باید توجه کرد که در زیر درجه حرارت معینی (موسوم به نقطه‌کوری (۴)) ماده خاصیت فرو مغناطیسی خود را از دست میدهد .

هـ: مواد مختلف دارای چگالی شارهای گوناگون در ناحیه اشباع خواهند بود . از این‌اختلاف چگالی شارها استفاده کرده‌واندازه‌هسته را در دستگاههای الکترو مغناطیسی طراحی میکنند . مثالهای زیر این موضوع را بیشتر روشن میکنند .

مثال ۱۱ ــ ۱ (سیستم ENG) : ***Example 1-11 (English)***

میخواهیم در یک هسته مفروضی ، ماکزیمم شاری (ϕ max) معادل 350,000 lines بوجود آوریم . مطلوبست محاسبه سطح مقطع مینیمم برای این

---

1) Hysteresis-Loop 2) Demagnetizing
3) Magnetization-Cycle 4) Curie-Point

هسته . اگر :

الف : جنس هسته از چدن با حداکثر چگالی شار $50\ \text{kilolines/in}^2$ باشد .

ب : جنس هسته فولاد ریخته‌گری با حداکثر چگالی شار $100\ \text{kilolines/in}^2$ باشد .

حل :

الف : از رابطه (۲ a ــ ۱) داریم :

$$B_{max} = \frac{\phi_{max}}{A_{min}}$$

$$A_{min} = \frac{\phi_{max}}{B_{max}}$$

لذا :
$$A_{min} = \frac{350\ \text{kilolines}}{50\ \text{kilolines/in}^2} = 7\ \text{in}^2$$

ب :
$$A_{min} = \frac{\phi_{max}}{B_{max}} = \frac{350\ \text{kilolines}}{100\ \text{kilolines/in}^2} = 3.5\ \text{in}^2$$

مثال ۱۲ ــ ۱ (سیستم SI) : ***Example 1-12 (SI)***

میخواهیم در یک‌هسته مفروض ماکزیمم شاری (ϕ_{max}) معادل ۰/۰۰۳۵ وبر بوجود آوریم . مطلوبست محاسبه سطح مقطع مینیمم برای این هسته . اگر :

الف : جنس هسته از چدن با حداکثر چگالی شار ۰/۸ تسلا باشد .

(ب) : جنس هسته فولاد ریخته‌گری با حداکثر چگالی شار ۱/۶ تسلا باشد .

حل :

(الف) : : از رابطه (۲ b ــ ۱) داریم :

$$B_{max} = \frac{\phi_{max}}{A_{min}}$$

لذا :
$$A_{min} = \frac{\phi_{max}}{B_{max}} = \frac{3.5 \times 10^{-3}\ \text{Wb}}{0.8\ \text{T}} = 4.375 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$$

(ب) :
$$A_{min} = \frac{\phi_{max}}{B_{max}} = \frac{3.5 \times 10^{-3}\ \text{Wb}}{1.6\ \text{T}} = 2.1875 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$$

۳ ـ ۱ مدارهای مغناطیسی : 1-3 MAGNETIC CIRCUITS

در این بخش چند مثال ساده از مدارهای مغناطیسی سری وموازی را ذکر میکنیم و بیشتر مفاهیم اینگونه مدارها را با مثالهای عددی بیان میداریم . معمولا" مسائل مدارهای مغناطیس را به دو طریق مطرح میسازند .

الف: طریق اول:

"یک مدار مغناطیسی موجود است . اگر بخواهیم در آن شار مفروضی بوجود آید ، MMF مورد نیاز را بدست می‌آوریم .

اینگونه مسائل مشابه مدارهای الکتریکی سری هستند که میخواهیم جریان مفروضی از این مدارها بگذرد ومجهول مساله همان نیروی محرکه الکتریکی یا EmF خواهد بود .

همانطور که میدانیم حل اینگونه مدارهای الکتریکی بسیار ساده است ، یعنی تمامی افتهای RI را در کل مسیر حساب نموده و با یکدیگر جمع میکنیم تا (EMF) مورد نظر بدست آید . در مدارهای مغناطیسی باید عملیات زیر را انجام داد .

۱ ـ با دانستن شار (ϕ) و سطح مقطع باید B را حساب کرد .

۲ ـ با معلوم شدن B و دانستن جنس هسته از روی منحنیهای B-H ، H را حساب میکنیم .

۳ ـ حال افتهای HL (یا همان افتهای MMF [1]) را در دور حلقه حساب کرده و مجموع افتهای HL همان MMF مورد نیاز (MMF کل) خواهد بود .

ب: طریق دوم:

"یک مدار مغناطیسی موجود است . اگر MMF اعمال شده معلوم باشد ، شار در مدار مغناطیسی را بدست آورید .

این گونه مسایل قدری پیچیده است و ما در این کتاب از طرح اینگونه مسائل خودداری میکنیم ، زیراهدف این کتاب ساده نگری نسبت به مسائل مدارهای مغناطیسی است .

---

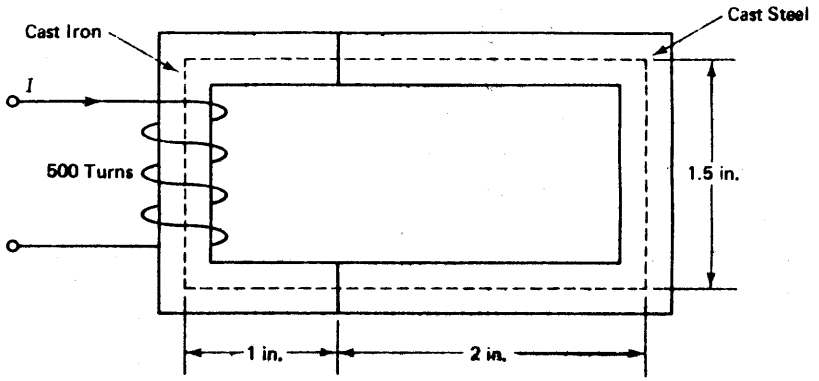
1) MMF – Drops

مثال ۱۳ ــ ۱ (سیستم ENG) : ***Example 1-13 (English)***

هسته‌ای مطابق شکل (۱۱ ــ ۱) مفروض است سطح مقطع در کل هسته یکنواخت بوده و معادل ۱/۲۵ اینچ مربع است . اگر بخواهیم شار در هسته 50 kilolines, باشد ، مطلوبست :

(الف) : MMF مورد نیاز که باید توسط سیم پیچ بوجود آید .

(ب) : جریان در سیم پیچ .



شکل ۱۱ ــ ۱ : هسته مربوط به مثال ۱۳ ــ ۱

حل :

برای حل این مساله خدولی مطابق جدول (۱ ــ ۱) تشکیل میدهیم . هسته مورد نظر در این مساله از دو قسمت تشکیل شده است . قسمت اول از جنس چدن بوده و قسمت دیگر از جنس فولاد ریخته‌گری است .

Table 1-1 **جدول ۱ ــ ۱**

Part	ϕ	A	B	H	l	Hl
Cast iron	50 k	1.25	40 k	68	3.5	238
Cast steel	50 k	1.25	40 k	10	5.5	55
Total MMF						293

حال ببینیم که اعداد این جدول چگونه پر شده است . برای هر دو قسمت هسته داریم :

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{50\text{ k}}{1.25} = 40 \text{ kilolines/in}^2$$

با توجه به شکل (۶ – ۱) میتوان H را برای این دو قسمت پیدا کرد .

برای چدن داریم :

$$l = 1 \text{ in.} + 1.5 \text{ in.} + 1 \text{ in.}$$
$$= 3.5 \text{ in.}$$

برای فولاد ریخته‌گری داریم :

$$l = 2 \text{ in.} + 1.5 \text{ in.} + 2 \text{ in.}$$
$$= 5.5 \text{ in.}$$

حال میتوان HL را برای هر دو قسمت بدست آورد .

(الف) : کل MMF مورد نیاز مجموع افتهای HL است .

$$\text{total MMF} = 238 + 55 = 293 \text{ A-turns}$$

ب :

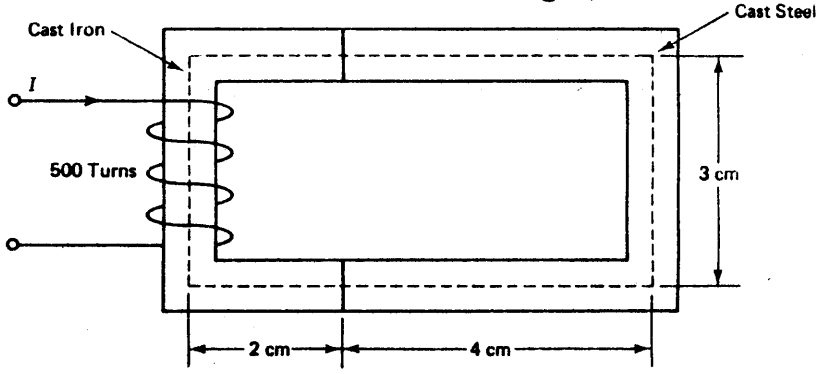
$$\text{Total MMF} = NI$$
$$293 = 500I$$
$$I = \frac{293}{500} = 0.586 \text{ A}$$

مثال ۱۴ – ۱ (سیستم SI) : ***Example 1-14 (SI)***

هسته‌ای مطابق شکل (۱۲ – ۱) مفروض است . سطح مقطع در کل هسته یکنواخت بوده و معادل ۰/۰۰۰۹ متر مربع میباشد . اگر بخواهیم شار در هسته ۰/۰۰۰۷۵ وبر باشد ، مطلوبست :

(الف) : MMF مورد نیاز که باید توسط سیم پیچ تولید شود .

(ب) : جریان سیم پیچ .



شکل ۱۲ – ۱ : هسته مربوط به مثال ۱۴ – ۱

حل :

برای حل این مساله جدولی مطابق جدول (۲ ــ ۱) تشکیل میدهیم . هسته مورد نظر دراین مساله از دو قسمت تشکیل شده است . قسمت اول از جنس چدن بوده و قسمت دیگر از جنس فولاد ریخته‌گری است .

Table 1-2 جدول ۲ ــ ۱

Part	ϕ	A	B	H	l	Hl
Cast iron	0.75×10^{-3}	9×10^{-4}	0.83	9.4 k	0.07	658
Cast steel	0.75×10^{-3}	9×10^{-4}	0.83	0.5 k	0.11	55
Total MMF						713

حال ببینیم که اعداد این جدول چگونه پر شده است . برای هر دو قسمت هسته داریم :

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{0.75 \times 10^{-3}}{9 \times 10^{-4}} = 0.83 \text{ T}$$

از شکل (۷ ــ ۱) میتوان استفاده کرد و H را در هر دو قسمت حساب کرد .

برای چدن داریم :

$$l = 2 \text{ cm} + 3 \text{ cm} + 2 \text{ cm}$$
$$= 7 \text{ cm} = 0.07 \text{ m}$$

برای فولاد ریخته‌گری داریم :

$$l = 4 \text{ cm} + 3 \text{ cm} + 4 \text{ cm}$$
$$= 11 \text{ cm} = 0.11 \text{ m}$$

حال میتوان HL را برای هر دو قسمت بدست آورد .

(الف) : کل MMF مورد نیاز با مجموع افتهای HL برابر است .

$$\text{total MMF} = 658 + 55 = 713 \text{ A}$$

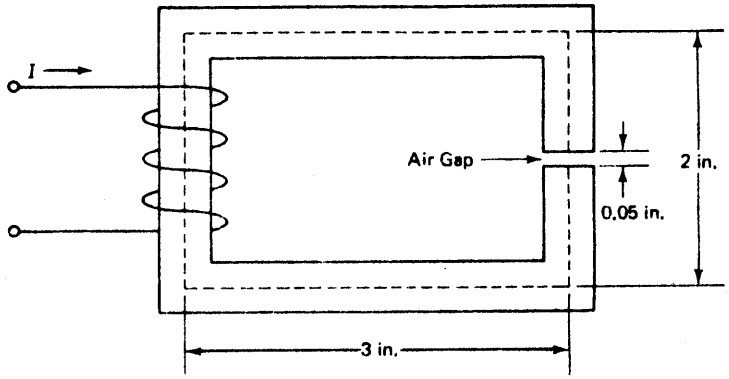
(ب) :

$$\text{Total MMF} = Nl$$
$$713 = 500I$$
$$I = \frac{713}{500} = 1.43 \text{ A}$$

Example 1-15 (English) مثال ۱۵ ــ ۱ (سیستم ENG) :

هسته‌ای مطابق شکل (۱۳ ــ ۱) مفروض بوده و از جنس چدن‌ساخته شده است . اگر بخوهیم شار در این مدار 150-kilolines. باشد ، مطلوبست محاسبه MMF

مورد نیاز فرض بر آن است که سطح مقطع در کل هسته و نیز در فاصله هوائی (۱) یکسان بوده و معادل ۳ اینچ مربع میباشد .



شکل ۱۳ – ۱ : هسته مربوط به مثال ۱۵ – ۱

حل :

این مدار مغناطیسی نیز از دو قسمت تشکیل شده است . یک قسمت از جنس چدن بوده و قسمت دیگر همان فاصله هوائی است . برای حل این مساله نیز جدولی مطابق جدول (۳ – ۱) تشکیل میدهیم

Table 1-3 **جدول ۳ – ۱**

Part	ϕ	A	B	H	l	Hl
Cast iron	150k	3	50k	130	10	1300
Air gap	150k	3	50k	15.67×10^3	0.05	783.5
Total MMF						2083.5

حال ببینیم اعداد این جدول چگونه بدست آمده‌اند . برای B داریم :

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{150k}{3} = 50k$$

H برای هوا اینچنین حساب میشود :

$$B = \mu_0 H$$

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{50 \text{ kilolines/in}^2}{3.19 \times 10^{-3} \frac{\text{kilolines/in}^2}{\text{A-turns/in}}}$$

$$= 15.67 \times 10^3 \text{ A-turns/in.}$$

1) Air-gap

برای آن قسمتی که از جنس چدن است (غیر از فاصله هوائی) داریم:

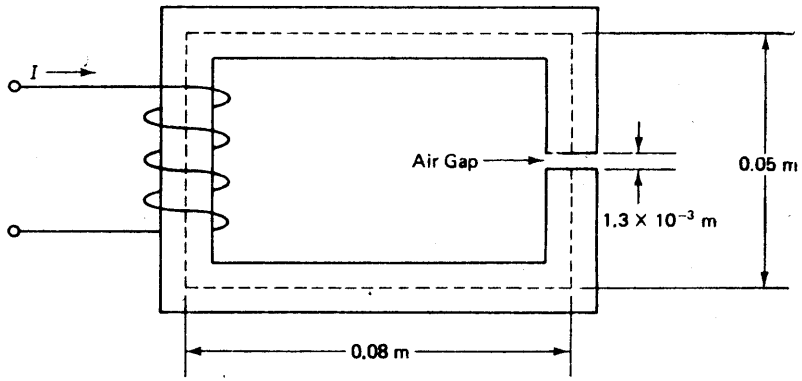
$$l = 3 \text{ in.} + 2 \text{ in.} + 3 \text{ in.} + 2 \text{ in.} = 10 \text{ in.}$$

از شکل (۶ – ۱) استفاده کرده و H را برای چدن بدست می‌آوریم (130 A-turns/in.) کل MMF مورد نیاز مجموع افتهای Hl است. لذا:

$$\text{total MMF} = 1300 + 783.5 = 2083.5 \text{ A-turns}$$

مثال ۱۶ – ۱ (سیستم SI): ***Example 1-16 (SI)***

هسته‌ای مطابق شکل (۱۴ – ۱) مفروض بوده و از جنس چدن ساخته شده است. اگر بخواهیم شار در این مدار ۰/۰۰۱۵ وبر باشد، مطلوبست محاسبه MMF مورد نیاز. فرض بر آن است که سطح مقطع در کل هسته و نیز در فاصله هوائی یکسان بوده و معادل ۰/۰۰۲ متر مربع باشد.



شکل ۱۴ – ۱: هسته مربوط به مثال ۱۶ – ۱

حل:

این مدار مغناطیسی از دو قسمت تشکیل شده است یک قسمت ازجنس چدن بوده و قسمت دیگر همان فاصله هوائی است. برای حل این مساله جدولی مطابق جدول (۴ – ۱) تشکیل میدهیم:

Table 1-4 جدول ۴ – ۱

Part	ϕ	A	B	H	l	Hl
Cast iron	15×10^{-4}	20×10^{-4}	0.75	4.5×10^{3}	0.26	1170
Air gap	15×10^{-4}	20×10^{-4}	0.75	5.97×10^{5}	1.3×10^{-3}	776.1
Total MMF						1946.1

حال ببینیم اعداد این‌جدول چگونه بدست آمده‌اند. برای B داریم:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{15 \times 10^{-4}}{20 \times 10^{-4}} = 0.75 \text{ T}$$

H را در فاصله هوائی اینچنین حساب میکنیم:

$$B = \mu_0 H$$

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0.75 \text{ T}}{4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T}}{\text{A/m}}}$$

$$= 5.97 \times 10^5 \text{ A/m}$$

برای ان قسمت که از چدن ساخته شده داریم:

$$l = 0.08 \text{ m} + 0.05 \text{ m} + 0.08 \text{ m} + 0.05 \text{ m}$$

$$= 0.26 \text{ m}$$

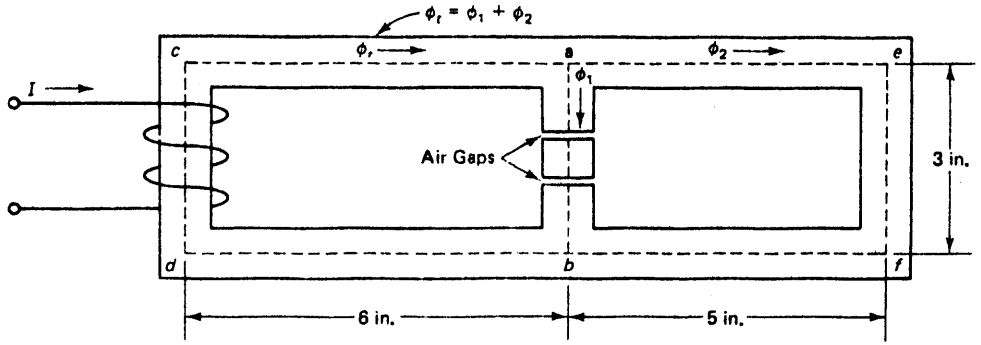
از شکل (۷ – ۱) استفاده کرده، H را بدست می‌آوریم (4.5 kA/m.) کل MMF مورد نیاز برابر مجموع افتهای Hl است. لذا:

$$\text{total MMF} = 1170 + 776.1 = 1946.1 \text{ A}$$

جالب توجه آن است که در مثالهای (۱۵ – ۱) و (۱۶ – ۱) با آنکه طول قسمت فلزی ۲۰۰ برابر طول فاصله هوائی است، اما ۴۰% از کل MMF در قسمت فاصله هوائی افت پیدا میکند. بهمین دلیل در دستگاههای الکترومغناطیسی فاصله هوائی را حتی الامکان کوچک انتخاب میکنند. بعبارت دیگر هرچه فاصله هوائی کمتر باشد، MMF کمتری جهت ایجاد شاری مفروض مورد نیاز خواهد بود. در نتیجه به جریان یا تعداد دور سیم کمتری احتیاج خواهیم داشت. اما نباید این موضوع را فراموش کرد که در موتورها یا ژنراتورها به فاصله هوائی نیاز داریم زیرا در غیر این صورت اصطکاک بین قسمتهای دوار و ساکن اینگونه ماشینها، فلسفه وجودی آنها را نفی خواهد کرد. معمولاً در ماشینهای الکتریکی فاصله هوائی $\frac{1}{20}$ اینچ یا ۱ تا ۲ میلیمتر است.

مثال ۱۷ ــ ۱ (سیستم ENG) : ***Example 1-17 (English)***

هسته‌ای مطابق شکل (۱۵ ــ ۱) مفروض بوده و از جنس فولاد ریخته‌گری ساخته شده است. اگر بخواهیم شار در فاصله هوائی (ϕ_1) معادل 240 kilolines. باشد، MMF مورد نیاز را حساب کنید. فرض بر آن است که سطح مقطع در پایه وسطی هسته (a تا b) و همچنین سطح مقطع فواصل هوائی ۴ اینچ مربع باشد. سطح مقطع قسمت سمت راست هسته ۶ اینچ مربع و سطح مقطع قسمت سمت چپ هسته ۸ اینچ مربع میباشد. طول هر کدام از فواصل هوائی ۰/۰۵ اینچ است.



شکل ۱۵ ــ ۱: هسته مربوط به مثال ۱۷ ــ ۱

حل:

این هسته از سه قسمت متمایز تشکیل شده است،

۱ ــ قسمت مرکزی که شامل دو فاصله هوائی است (a تا b).

۲ ــ قسمت سمت چپ (acdb).

۳ ــ قسمت سمت راست (aefb).

جدول ۱۵ ــ ۱ ***Table 1-5***

Part	ϕ	A	B	H	l	Hl	
Left *acdb*	870k $(\phi_1 + \phi_2)$ →	8	109k	190 →	15	2850	
Center *ab*	240k (ϕ_1) →	4	60k	12 →	3	36	sum of MMFs
Two air gaps	240k (ϕ_1) →	4	60k	18,810 →	0.1	1881	
Right *aefb*	630k ϕ_2 ←	6	105k	147.46 ←	13	1917	

برای حل این مساله جدولی مطابق جدول (۵ ــ ۱) تشکیل میدهیم . حال ببینیم این جدول چگونه پر شده است .

در قسمت مرکزی هسته که شامل دو فاصله هوائی است داریم :

$$B = \frac{\phi}{A} = 60 \text{ kilolines/in}^2$$

از شکل (۶ ــ ۱) داریم :

$$H_{ab} = 12 \text{ A-turns/in.}$$

$$H_{\text{air gap}} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{60}{3.19 \times 10^{-3}} = 18.81 \times 10^3 \text{ A-turns/in.}$$

حال افتهای HL را در قسمت مرکزی حساب کرده و مجموع آنها بمثابه MMF برای قسمت سمت راست (aefb) عمل میکند .

$$Hl = 36 + 1881 = 1917 \text{ A-turns}$$

$$H = \frac{Hl}{l} = \frac{1917}{13} = 147.46$$

از شکل (۶ ــ ۱) داریم :

$$B = 105 \text{ kilolines/in}^2$$

$$\phi_2 = B \times A = 105k(6) = 630 \text{ kilolines}$$

برای قسمت سمت چپ (acdb) داریم :

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2$$

$$= 240k + 630k = 870 \text{ kilolines}$$

$$B = \frac{870k}{8} \approx 109 \text{ kilolines/in}^2$$

از شکل (۶ ــ ۱) داریم :

$$H = 190 \text{ A-turns/in.}$$

$$Hl = 190 \times 15 = 2850 \text{ A-turns}$$

$$\text{total coil MMF} = 2850 + 1917$$

$$= 4767 \text{ A-turns}$$

یا :

$$2850 + 36 + 1881 = 4767 \text{ A-turns.}$$

مثال ۱۸ ــ ۱ (سیستم SI) : ***Example 1-18 (SI)***

هسته‌ای مطابق شکل (۱۶ ــ ۱) مفروض بوده و از جنس فولاد ریخته‌گری میباشد . اگر بخواهیم شار در فاصله هوائی (ϕ_1) معادل ۰/۰۰۲۴ وبر باشد ، MMF مورد نیاز

را حساب کنید . فرض برآن است که سطح مقطع در پایه وسطی هسته (a تا b) و همچنین سطح مقطع فواصل هوائی ۰/۰۰۲۸ متر مربع میباشد . سطح مقطع قسمت سمت راست هسته ۰/۰۰۳۵ متر مربع و سطح مقطع قسمت سمت چپ هسته ۰/۰۰۵ متر مربع میباشد . طول هر کدام از فواصل هوائی ۰/۰۰۱ متر است .

حل:

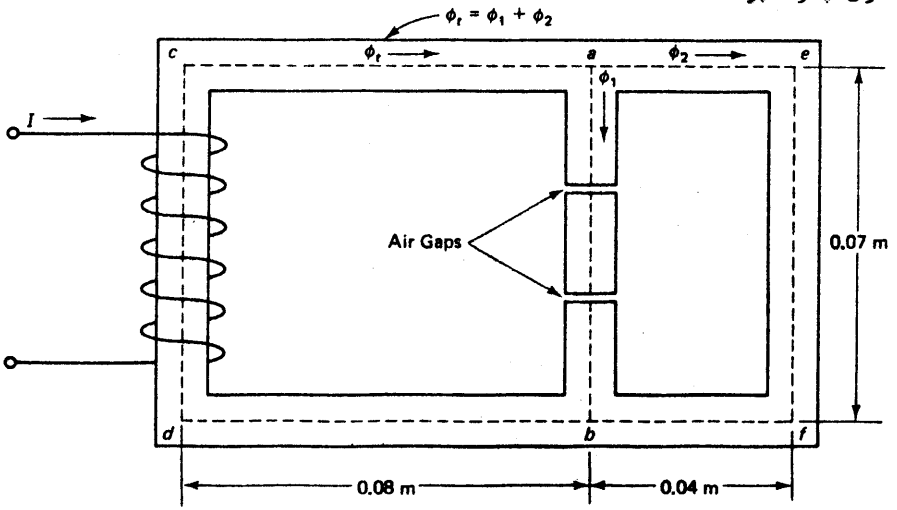
این هسته از سه قسمت متمایز ساخته شده است .

۱ ــ قسمت مرکزی که شامل دو فاصله هوائی است .

۲ ــ قسمت سمت چپ (acdb)

۳ ــ قسمت سمت راست (aefb)

برای حل این مساله جدولی مطابق جدول (۶ ــ ۱) تشکیل میدهیم حال ببینیم این جدول چگونه پر شده است .



شکل ۱۶ ــ ۱ هسته مربوط به مثال ۱۸ ــ ۱

در قسمت مرکز که شامل دو فاصله هوائی است داریم :

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{24 \times 10^{-4}}{28 \times 10^{-4}}$$

$$= 0.86 \text{ T}$$

Table 1-6 جدول ۶ – ۱

Part	ϕ	A	B	H	l	Hl
Left *acdb*	84.2×10^{-4} $(\phi_1 + \phi_2)$	50×10^{-4}	1.68	7.75k	0.23	1782.5
Center *ab*	24×10^{-4} (ϕ_1)	28×10^{-4}	0.86	500	0.07	35
Two air gaps	24×10^{-4} (ϕ_1)	28×10^{-4}	0.86	684k	0.002	1368
Right *aefb*	60.2×10^{-4} (ϕ_2)	35×10^{-4}	1.72	9.35k	0.15	1403

sum of MMFs

از شکل (۷ – ۱) داریم :

$$H_{ab} = 0.5 \text{ kA/m} = 500 \text{ A/m}$$

$$H_{\text{air gap}} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0\ 86}{4\pi \times 10^{-7}} = 684 \text{ kA/m}$$

حال افتهای HL را در بخش مرکزی هسته حساب کرده و مجموع این افتها بمثابه MMF برای قسمت سمت راست (aefb) عمل میکند .

$$Hl = 35 + 1368 = 1403 \text{ A}$$

$$H = \frac{Hl}{l} = \frac{1403}{0.15} = 9.353 \text{ kA/m}$$

از شکل (۷ – ۱) داریم :

$$B = 1.72 \text{ T}$$

$$\phi_2 = B \times A = 1.72 \times 35 \times 10^{-4} = 60.2 \times 10^{-4}$$

برای قسمت سمت چپ (acdb) داریم :

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2$$

$$= 24 \times 10^{-4} + 60.2 \times 10^{-4} = 84.2 \times 10^{-4}$$

$$B = \frac{84.2 \times 10^{-4}}{50 \times 10^{-4}} \approx 1.68 \text{ T}$$

از شکل (۷ – ۱) داریم :

$$H = 7.75 \text{ kA/m}$$

$$Hl = 7.75 \text{ k} \times 0.23 = 1782.5 \text{ A}$$

یا :

$$\text{Total coil MMF} = 1782.5 + 1403 = 3185.5 \text{ A}$$

$$1782.5 + 35 + 1368 = 3185.5 \text{ A.}$$

SYMBOLS INTRODUCED IN CHAPTER 1

	Symbol	Definition	Units	
			English	SI
۱	ϕ	Magnetic flux	lines (or maxwells)	webers (Wb)
۲	B	Flux density	lines/in^2	Wb/m^2 [or tesla (T)]
۳	A	Cross-sectional area	in^2	m^2
۴	U	Magnetomotive force	ampere-turns	amperes (A)
۵	H	Magnetic field intensity	A-turns/in.	A/m
۶	l	Mean length of magnetic circuit	inches	meters
۷	N	Number of turns of wire	turns	turns
۸	$\mathcal{R}$	Reluctance	$\frac{\text{A-turns}}{\text{lines/in}^2}$	A/T
۹	μ	Permeability of magnetic material	$\frac{\text{lines/in}^2}{\text{A-turns/in.}}$	$\frac{\text{T}}{\text{A/m}}$
۱۰	μ_0	Permeability of air	$3.19 \times 10^{-3} \frac{\text{kilolines/in}^2}{\text{A-turns/in.}}$	$4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T}}{\text{A/m}}$

علائم اختصاری بکار برده شده در فصل اول در دو سیستم آحادی انگلیسی و بین‌المللی .

۱ ــ شار مغناطیسی

۲ ــ چگالی شار

۳ ــ سطح مقطع

۴ ــ نیروی محرکه مغناطیسی (MMF)

۵ ــ شدت میدان مغناطیسی

۶ ــ طول متوسط مدار مغناطیسی

۷ ــ تعداد دور سیم پیچ

۸ ــ رلوکتانس (مقاومت مغناطیسی)

۹ ــ نفوذ پذیری مغناطیسی (پرمابلیته) ماده مغناطیسی

۱۰ ــ پرمابلیته (نفوذ پذیری مغناطیسی) هوا