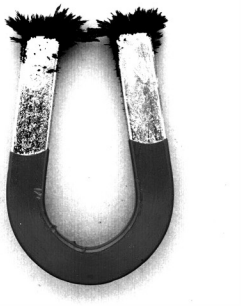


مغناطیس

این فصل عملاً از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول، مباحث مفهومی و قسمت دیگر، مباحث مربوط به حل مسئله‌ها.

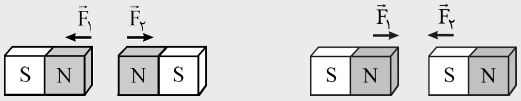
## قسمت اول: مباحث مفهومی

**آهن‌ربا**: هر ماده‌ای که بتواند آهن، نیکل، کبالت و یا آلیاژهای آن‌ها را جذب کند.

**اولین آهن‌ربای طبیعی**: ماده‌ی کانی مگنتیت ($Fe_3O_4$).[1]

**قطب‌های آهن‌ربا**: در هر آهن‌ربا دو ناحیه وجود دارد که خاصیت آهن‌ربایی در آن‌ها بیشتر از قسمت‌های دیگر است؛ این ناحیه‌ها را قطب‌های آهن‌ربا می‌نامند. یکی از این قطب‌ها را قطب شمال (N) و قطب دیگر را قطب جنوب (S) می‌نامند. در خیلی از کتاب‌های رنگی، قطب شمال را با رنگ قرمز و قطب جنوب را با رنگ آبی نمایش می‌دهند. در کتاب‌ها و سؤال‌های آزمون‌های آزمایشی که چاپ رنگی نیستند، معمولاً قطب N را با هاشور (رنگ خاکستری) نشان می‌دهند.

**نیروی بین آهن‌رباها**: دو قطب هم‌نام همدیگر را دفع می‌کنند و دو قطب ناهم‌نام همدیگر را جذب می‌کنند. توجه کنید که نیروهای بین دو آهن‌ربا، عمل و عکس‌العمل هستند و همیشه با هم هم‌اندازه‌اند.



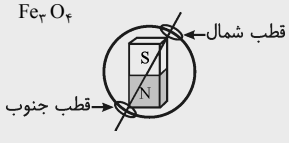

**عقربه‌ی مغناطیسی (قطب‌نما)**: یک آهن‌ربای میله‌ای نازک که بر پایه‌ای سوار است و می‌تواند آزادانه بچرخد و جهت تقریبی شمال را نشان دهد.[2]

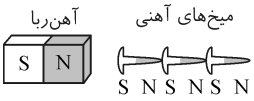
---

۱- ماده‌ای با ترکیب $Fe_3O_4$ عملاً وجود ندارد؛ بلکه منظور از آن یک ترکیب مساوی (با فراوانی برابر) از FeO و $Fe_2O_3$ است. ظاهراً اولین‌بار آهن‌ربا توسط چسبیدن این ماده به عصای آهنی یک چوپان در آسیای صغیر (ترکیه‌ی امروزی) کشف شد.

$$\begin{array}{r} FeO \\ +Fe_2O_3 \\ \hline Fe_3O_4 \end{array}$$

۲- در مرکز زمین، فلزات ذوب‌شده مثل آهن، نیکل و کبالت وجود دارد. با چرخش زمین، این فلزات مذاب یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند؛ گویی که درون زمین یک آهن‌ربای فرضی وجود دارد. محور این آهن‌ربای فرضی، منطبق بر محور چرخش زمین نیست و کمی با آن زاویه دارد.






**القای مغناطیسی:** اگر یک فلز از جنس آهن، نیکل، کبالت و یا آلیاژهای آن‌ها را به یک آهن‌ربا نزدیک کنیم، قطعه‌ی یادشده هم تبدیل به آهن‌ربا می‌شود که ترتیب قطب‌های N و S آن مانند آهن‌ربای اولیه است و توسط آن جذب می‌شود؛ این پدیده را القای مغناطیسی می‌نامند.

## میدان مغناطیسی

در فضای اطراف هر آهن‌ربا خاصیتی وجود دارد که بر اثر آن در قطعه‌های آهنی، نیکلی، کبالتی و یا آلیاژهای آن‌ها خاصیت آهن‌ربایی القا می‌شود و بر قطب‌های آهن‌رباهای دیگر نیرو وارد می‌شود. به‌طور مثال، این خاصیت باعث چرخش عقربه‌ی مغناطیسی می‌شود. این خاصیت را میدان مغناطیسی می‌نامند و آن را با B نمایش می‌دهند. میدان مغناطیسی کمیتی برداری است و واحد آن در SI، تسلا (T) است. در عمل، معمولاً از واحد کوچک‌تری به‌نام گاوس (G) استفاده می‌کنند. $1G = 10^{-4}\,T$

جهت میدان مغناطیسی این‌گونه تعیین می‌شود: هنگامی‌که عقربه‌ی مغناطیسی در نزدیکی آهن‌ربا قرار می‌گیرد، عقربه می‌چرخد تا در امتداد میدان مغناطیسی آهن‌ربا قرار گیرد و قطب N آن، سوی میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.

**خطوط میدان مغناطیسی:**

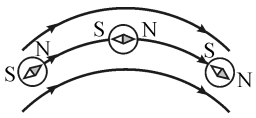
برای تجسم بهتر میدان در اطراف یک آهن‌ربا، از خطوط میدان مغناطیسی استفاده می‌کنیم که دارای ویژگی‌های زیر هستند:

۱) راستای میدان در هر نقطه، مماس بر خطوط میدان است.

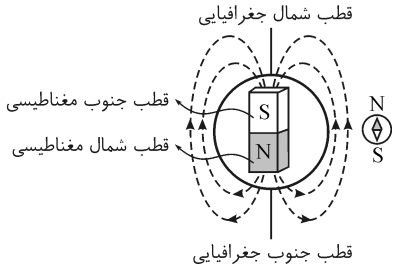
۲) هر چه خطوط متراکم‌تر باشند، میدان در آن ناحیه قوی‌تر است.

۳) خطوط میدان هیچ‌گاه همدیگر را قطع نمی‌کنند.[1]

۴) خطوط میدان مغناطیسی، خطوط بسته‌ای هستند که در خارج از آهن‌ربا، جهت آن‌ها از N به S و در داخل آهن‌ربا، از S به N است.[2]




عقربه‌ی مغناطیسی همواره مماس بر خطوط میدان است و به‌گونه‌ای قرار می‌گیرد که قطب N آن جهت خطوط را نشان دهد.




جهت خطوط میدان مغناطیسی در سطح زمین، همواره از جنوب به شمال است. بنابراین قطب N آهن‌ربای فرضی زمین در قطب جنوب جغرافیایی قرار دارد!

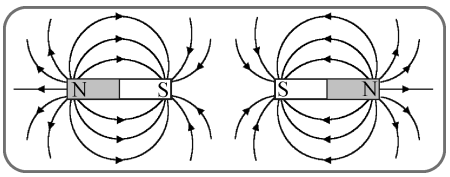
**۱- میله‌ی A، میله‌ی B را دفع و میله‌ی C را جذب می‌کند. کدام گزینه درست است؟**

۱) میله‌ی A می‌تواند آهن‌ربا نباشد.
۲) میله‌ی B می‌تواند آهن‌ربا نباشد.
۳) میله‌ی C می‌تواند آهن‌ربا نباشد.
۴) هر سه میله حتماً آهن‌ربا هستند.

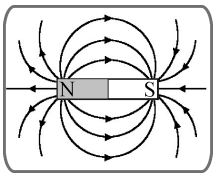
**۲- یک میله‌ی آهنی و یک آهن‌ربای میله‌ای در ظاهر، کاملاً مشابه‌اند. بدون هیچ وسیله‌ی دیگری، .....**

۱) آهن‌ربا قابل تشخیص نیست.
۲) آهن‌ربا قابل تشخیص است ولی محل و نوع قطب‌هایش قابل تشخیص نیست.
۳) آهن‌ربا و محل قطب‌هایش قابل تشخیص است ولی نوع قطب‌ها، قابل تشخیص نیست.
۴) آهن‌ربا و محل و نوع قطب‌هایش قابل تشخیص است.

به خطوط میدان مغناطیسی در اطراف آهن‌ربا، در وضعیت‌های مختلف توجه کنید:




خطوط میدان دو آهن‌ربای مشابه که قطب‌های هم‌نامشان کنار هم قرار گرفته است.

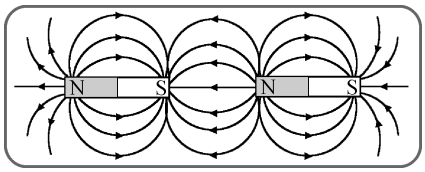



خطوط میدان یک آهن‌ربای تنها

---

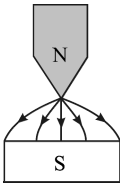
۱- این موضوع، معادل این است که میدان در هر نقطه، کمیتی یکتاست.

۲- این موضوع، معادل این است که آهن‌ربای تک‌قطبی، یعنی آهن‌ربایی که فقط قطب N یا S داشته باشد، نداریم.

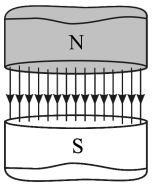



خطوط میدان دو آهن‌ربای مشابه که قطب‌های ناهم‌نامشان کنار هم قرار گرفته است.

**میدان مغناطیسی یکنواخت:** اگر خطوط میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا با یکدیگر موازی و هم‌فاصله باشند، بردار میدان مغناطیسی در همه‌ی نقاط آن ناحیه، بزرگی و جهت ثابتی دارد. چنین میدانی را میدان مغناطیسی یکنواخت می‌نامند.

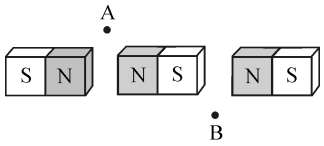



میدان مغناطیسی غیریکنواخت




میدان مغناطیسی یکنواخت

**۳- در نقاط A و B جهت بردار میدان مغناطیسی به چه صورتی است؟ (از اثر آهن‌ربای دورتر، چشم‌پوشی کنید.)**



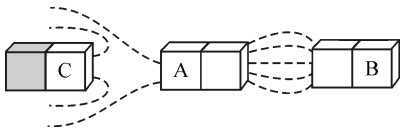

۱) ↘ و ↗

۲) ← و ↑

۳) ↑ و ←

۴) ↗ و ↘

**۴- با توجه به خطوط میدان، قطب‌های A و B به‌ترتیب چه هستند و کدام قطب قوی‌تر است؟ (رنگ خاکستری نمایانگر قطب N است.)**



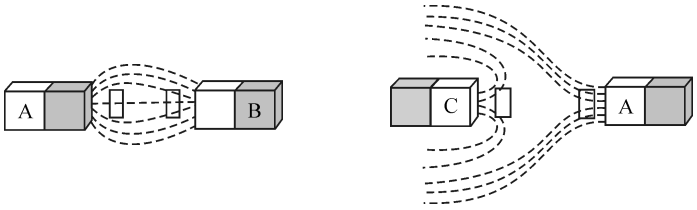

۱) N و S: A از C و B قوی‌تر است.

۲) N و S: A از C قوی‌تر و از B ضعیف‌تر است.

۳) S و N: A از C و B قوی‌تر است.

۴) S و N: A از C قوی‌تر و از B ضعیف‌تر است.

اگر نمی‌توانید تراکم خطوط میدان را در نزدیکی قطب‌ها مقایسه کنید، یک روش جالب به شما یاد می‌دهم. دو مستطیل هم‌اندازه‌ی مشابه را در فاصله‌های یکسان از دو قطب رسم کنید و تعداد خطوط درون هر یک را بشمارید!

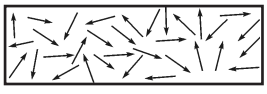



## دوقطبی مغناطیسی

کوچک‌ترین ذرات تشکیل‌دهنده‌ی مواد مغناطیسی یعنی اتم‌ها و مولکول‌های آن‌ها نیز آهن‌ربا هستند و دو قطب N و S دارند. این آهن‌رباهای کوچک را دوقطبی مغناطیسی می‌نامند. دوقطبی مغناطیسی را با یک پیکان نشان می‌دهند که سر آن قطب N است (شکل مقابل).

**محور مغناطیسی:** خطی را که دو قطب یک دوقطبی مغناطیسی را به هم وصل می‌کند، محور مغناطیسی می‌نامند.

**مواد مغناطیسی:** موادی که اتم‌ها و مولکول‌های آن‌ها خاصیت مغناطیسی دارند، مواد مغناطیسی نامیده می‌شوند.[1] مواد مغناطیسی به دو دسته تقسیم می‌شوند: پارامغناطیسی و فرومغناطیسی.

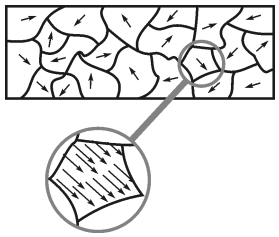


**مواد پارامغناطیسی:**[2] در این‌گونه مواد، دوقطبی‌های مغناطیسی دارای سمت‌گیری مشخص و منظمی نیستند و در جهت کاتوره‌ای قرار دارند. پس این مواد خاصیت مغناطیسی ندارند. اما هنگامی‌که در یک میدان مغناطیسی (مثلاً نزدیک یک آهن‌ربا) قرار گیرند، برخی از دوقطبی‌های مغناطیسی همانند عقربه‌ی

۱- موادی که مغناطیسی نیستند (دوقطبی مغناطیسی ندارند) را دیامغناطیس می‌نامند.

۲- مانند منگنز، پلاتین، آلومینیم، اکسید ازت، عناصر گروه I و II جدول مندلیف.

مغناطیسی تغییر جهت داده و منظم می‌شوند. البته تغییر جهت آن‌ها به‌سادگیِ تغییر جهت عقربه‌ی مغناطیسی نیست. بنابراین فقط تعداد کمی از دوقطبی‌ها تغییر جهت داده و در جهت میدان اصلاح می‌شوند. هر چه میدان قوی‌تر باشد، تعداد بیشتری از این دوقطبی‌ها اصلاح می‌شوند و خاصیت آهن‌ربایی جسم بیشتر می‌شود. با خروج ماده‌ی پارامغناطیسی از میدان، دوقطبی‌ها به‌سرعت به حالت اولیه برمی‌گردند و جسم خاصیت آهن‌ربایی خود را از دست می‌دهد.



**مواد فرومغناطیس**:[1] در این‌گونه مواد، دوقطبی‌های مغناطیسیِ کوچک به‌طور خودبه‌خود، با دوقطبی‌های مجاور خود هم‌خط می‌شوند و تشکیل بخش‌های کوچک به‌نام حوزه‌های مغناطیسی می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که دوقطبی‌های هر حوزه‌ی مغناطیسی با هم هم‌جهت هستند ولی با دوقطبی‌های حوزه‌های مجاور هم‌جهت نیستند. جهت‌گیری و اندازه‌ی حوزه‌ها ممکن است به‌گونه‌ای باشد که اثر هم را خنثی کنند و جسم در کل، خاصیت مغناطیسی نداشته باشد.

با قرار دادن یک فرومغناطیس در یک میدان مغناطیسی، برخی از دوقطبی‌های مغناطیسی با خطوط میدان هم‌جهت می‌شوند؛ بنابراین حوزه‌ی آن‌ها هم تغییر جهت پیدا می‌کند. به این ترتیب حجم حوزه‌های هم‌جهت با میدان افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه حجم حوزه‌هایی که جهت‌گیری آن‌ها نسبت به میدان مناسب نیست، کاهش می‌یابد. هر چه میدان خارجی قوی‌تر باشد، حجم حوزه‌های هم‌سو با آن بزرگ‌تر می‌شود.

**مغناطیس اشباع**: اگر میدان به اندازه‌ی کافی قوی باشد، به‌طوری که تمامی حوزه‌ها هم‌جهت با میدان شوند، دیگر عملاً کل حوزه‌های مغناطیسی تبدیل به یک حوزه می‌شوند. در این حالت، فرومغناطیس به قوی‌ترین آهن‌ربای ممکن (برای خودش) تبدیل شده است و از آن پس، هر چه میدان را قوی‌تر کنیم، خاصیت آهن‌ربایی بیشتر نمی‌شود.

**فرومغناطیس نرم**:[2] برخی از مواد فرومغناطیس با قرار گرفتن در میدان، به‌راحتی آهن‌ربا می‌شوند و با خروج از میدان، به‌راحتی خاصیت آهن‌ربایی خود را از دست می‌دهند. به این‌گونه مواد، فرومغناطیس نرم می‌گویند. این مواد برای ساختن آهن‌ربای موقت (آهن‌ربای الکتریکی) کاربرد دارند.

**فرومغناطیس سخت**:[3] برخی دیگر از مواد فرومغناطیس با قرار گرفتن در میدان، به‌سختی آهن‌ربا می‌شوند و پس از خروج از میدان هم مدت‌ها خاصیت آهن‌ربایی خود را حفظ می‌کنند. به این مواد، فرومغناطیس سخت می‌گویند. این مواد برای ساختن آهن‌ربای دائمی مناسب هستند.

**جمع‌بندی**:

- **مواد**
  - **مغناطیسی**
    - **پارامغناطیس‌ها**: در حالت عادی، آهن‌ربا نیستند. با حضور در میدان، آهن‌ربای ضعیف می‌شوند؛ با خروج از میدان، خاصیت آهن‌ربایی خود را از دست می‌دهند.
    - **فرومغناطیس‌ها**
      - **نرم**: با حضور در میدان، آهن‌ربای قوی می‌شوند و با خروج از میدان، خاصیت آهن‌ربایی خود را از دست می‌دهند.
      - **سخت**: با حضور در میدان، آهن‌ربا می‌شوند و با خروج از میدان، خاصیت آهن‌ربایی خود را برای مدت‌ها حفظ می‌کنند.
  - **غیرمغناطیسی (دیامغناطیس‌ها)**

**۵- کدام جمله‌ی زیر صحیح است؟**

۱) منگنز یک ماده‌ی مغناطیسی است ولی خاصیت مغناطیسی ندارد.

۲) اگر یک آهن‌ربا را به دو قسمت تقسیم کنیم، این دو قسمت در همان حالت، حتماً همدیگر را جذب می‌کنند.

۳) در شرایط مشابه و در حضور میدان، فرومغناطیس سخت آهن‌ربای بهتری است تا فرومغناطیس نرم.

۴) یک قطب‌نما در حضور میدان زمین، به‌گونه‌ای قرار می‌گیرد که قطب N آن، شمال مغناطیسی زمین را نشان می‌دهد.

**۶- کدام‌یک از شکل‌های زیر، نمایشگر یک ماده‌ی فرومغناطیس در حضور میدان خارجی تقریباً قوی است؟**

۱)

۲)

۳)

۴)

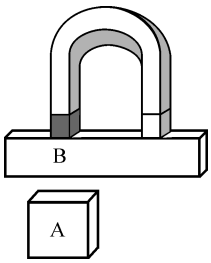
---

۱- مانند آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهای آن‌ها.

۲- مانند آهن، نیکل و کبالت وقتی به‌صورت خالص هستند.

۳- برخی از آلیاژهای آهن، نیکل و کبالت مثل فولاد (آهن + کربن).

**۷- در شکل روبه‌رو، در چه صورتی جسم A توسط جسم B جذب می‌شود؟**




۱) A و B، ماده‌ی مغناطیسی باشند.

۲) A و B، هیچ‌کدام مغناطیسی نباشند.

۳) A مغناطیسی باشد و B مغناطیسی نباشد.

۴) A مغناطیسی نباشد و B مغناطیسی باشد.

## قسمت دوم: مباحث مربوط به حل مسئله‌ها

### میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم بلند نازک مستقیم حامل جریان

در اطراف یک سیم بلند نازک مستقیم حامل جریان، یک میدان مغناطیسی به‌صورت حلقه‌هایی به مرکز سیم و در صفحه‌ای عمود بر سیم به‌وجود می‌آید.

اندازه‌ی این میدان از رابطه‌ی مقابل به‌دست می‌آید:

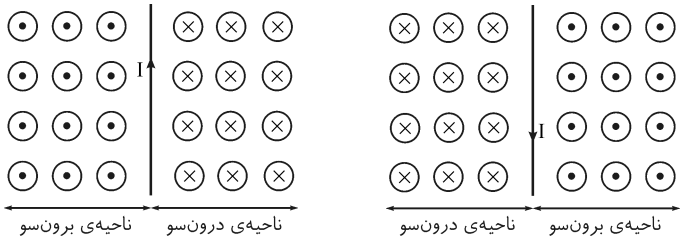
$$B = \frac{\mu_\circ I}{2\pi r}$$

- $\mu_\circ$، تراوایی مغناطیسی خلأ نام دارد و مقدار آن عبارتست از:

$$\mu_\circ = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$$

- جهت میدان مغناطیسی از قانون دست راست مشخص می‌شود. اگر انگشت شست دست راست را در جهت جریان قرار دهیم، جهت خم شدن چهار انگشت دست، جهت خطوط میدان را نشان می‌دهد.

- میدان مغناطیسی یک سیم حامل جریان، روی صفحه‌ی شامل سیم بلند، همواره به دو ناحیه‌ی درون‌سو و برون‌سو تقسیم می‌شود که مرز این دو ناحیه، خود سیم است.




برای مقایسه‌ی میدان حاصل از یک سیم بلند در دو نقطه به فاصله‌های $d_1$ و $d_2$ از آن، می‌توان از رابطه‌ی روبه‌رو استفاده کرد:

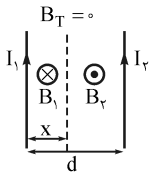
$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{d_1}{d_2}$$

فرض کنید که دو سیم موازی داریم که حامل جریان‌های $I_1$ و $I_2$ هستند $(I_2 > I_1)$. در این صورت:

الف) اگر جریان دو سیم هم‌جهت باشد:

میدان روی یک خط موازی سیم‌ها و بین دو سیم برابر صفر است. این خط به سیمی که جریان کم‌تری دارد، نزدیک‌تر است. اگر فاصله‌ی دو سیم، d و فاصله‌ی خط مذکور تا سیم کم‌جریان‌تر، x باشد، داریم:

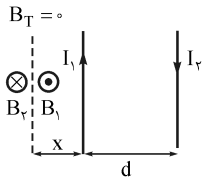
$$x = \frac{d}{\frac{I_2}{I_1} + 1}$$




ب) اگر جریان دو سیم در خلاف جهت هم باشد:

میدان روی یک خط موازی سیم‌ها و خارج دو سیم برابر صفر است. این خط به سیمی که جریان کم‌تری دارد، نزدیک‌تر است. اگر فاصله‌ی دو سیم، d و فاصله‌ی خط مذکور تا سیم کم‌جریان‌تر، x باشد، داریم:

$$x = \frac{d}{\frac{I_2}{I_1} - 1}$$

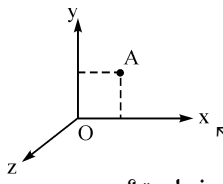



**توجه** در صورتی‌که جریان در دو سیم برابر و در خلاف جهت هم باشد، میدان در هیچ نقطه‌ای صفر نمی‌شود.

**۸- در فاصله‌ی d از یک سیم بلند که از آن جریان I می‌گذرد، بزرگی میدان، ۲ G است. اگر ۱ cm به این سیم نزدیک شویم، بزرگی میدان ۱۲ G می‌شود. d و I به‌ترتیب عبارتند از:**

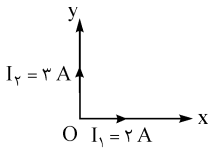
۱) ۱/۲ cm و ۱۲ A ۲) ۱۲ cm و ۱۰ A ۳) ۱/۲ cm و ۱۰ A ۴) ۱۲ cm و ۱۲ A

**۹- نقطه‌ی A روی صفحه‌ی xy و به فاصله‌ی مساوی از دو محور x و y قرار دارد. اگر ۳ سیم بلند روی محور x، y و z قرار داشته باشد که شامل جریان‌های مساوی و هم‌جهت با محورها باشند، میدان برایند در نقطه‌ی A به کدام سمت است؟**




۱) ⊙ ۲) ↘ ۳) ⊗ ۴) ↖

**۱۰- مطابق شکل، دو سیم بلند بر محورهای مختصات منطبق هستند. میدان برایند دو سیم روی کدام خط برابر صفر است؟**



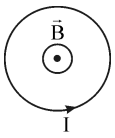

۱) $y = \frac{2}{3}x$ ۲) $y = \frac{3}{2}x$ ۳) $y = -\frac{2}{3}x$ ۴) $y = -\frac{3}{2}x$

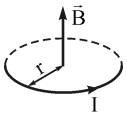
## میدان مغناطیسی در مرکز حلقه‌ی حامل جریان

در مرکز حلقه‌ای به شعاع r که از آن جریان I عبور می‌کند، میدان مغناطیسی عمود بر سطح حلقه است و اندازه‌ی آن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

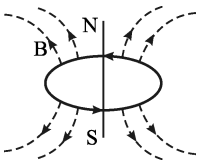
$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}$$

- جهت میدان را به کمک قانون دست راست پیدا می‌کنیم. اگر چهار انگشت دست راست در جهت جریان بچرخند، انگشت شست جهت میدان را نشان می‌دهد.



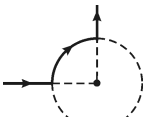

- یک حلقه‌ی حامل جریان، تشکیل یک دوقطبی مغناطیسی (آهن‌ربا) می‌دهد که جهت میدان حلقه از قطب S به قطب N می‌باشد (شکل روبه‌رو).



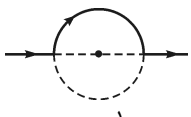

اگر حلقه از N دور تشکیل شده باشد (در این حالت، معمولاً به آن پیچه می‌گویند)، رابطه به‌صورت مقابل درمی‌آید.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2r}$$

N ممکن است عدد صحیح باشد یا نباشد؛ مثلاً:



$N = \frac{1}{4}$

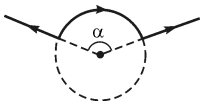


$N = \frac{1}{2}$

- در برخی از مسائل، ممکن است که N از روش‌های خاصی به‌دست آید:

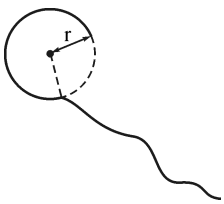
اگر کمانی به زاویه‌ی $\alpha$ درجه داشته باشیم:

$$N = \frac{\alpha}{360}$$



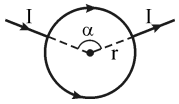

اگر سیمی به طول d متر را تبدیل به پیچه‌ای به شعاع r کنیم:

$$N = \frac{d}{2\pi r}$$




- اگر سیم در امتداد مرکز حلقه، به حلقه وارد و یا از آن خارج نشود، خود سیم قسمت بیرون حلقه یک میدان اضافی در مرکز حلقه ایجاد کرده و سبب ایجاد اختلال می‌شود.

**۱۱- حلقه‌ای مطابق شکل، در مدار قرار می‌گیرد. اندازه‌ی میدان در مرکز حلقه چه‌قدر است؟**



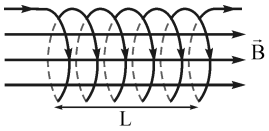

۱) $\frac{\mu_{\circ} I}{2r}(\frac{\alpha}{360})$
۲) $\frac{\mu_{\circ} I}{2r}(\frac{\alpha}{360-\alpha})$
۳) $\frac{\mu_{\circ} I}{2r}(\frac{360-2\alpha}{360})$
۴) صفر

**۱۲- از سیمی به طول L، پیچه‌ای به شعاع $R_1$ می‌سازیم و از آن جریان I عبور می‌دهیم؛ بزرگی میدان در مرکز آن برابر $B_1$ می‌شود. سپس با همان سیم، پیچه‌ای به شعاع $R_2$ می‌سازیم و همان جریان را از آن عبور می‌دهیم؛ بزرگی میدان در مرکز آن برابر $B_2$ می‌شود. نسبت $\frac{B_2}{B_1}$ برابر است با:**

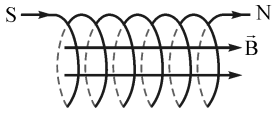
۱) $\frac{R_1}{R_2}$
۲) $\frac{R_2}{R_1}$
۳) $(\frac{R_1}{R_2})^2$
۴) $(\frac{R_2}{R_1})^2$

## میدان درون سیملوله‌ی حامل جریان

اگر سیملوله‌ای به طول L از N دور تشکیل شده باشد و از آن جریان I عبور کند، درون سیملوله یک میدان مغناطیسی یکنواخت به‌وجود می‌آید که موازی با محور سیملوله است و اندازه‌ی آن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

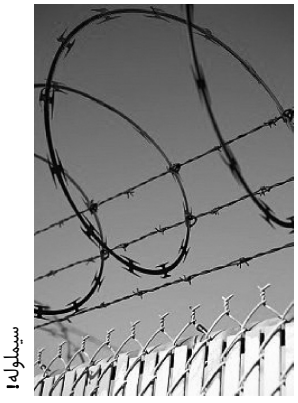



$$B = \mu_{\circ} \frac{N}{L} I$$




- همانند حلقه‌ی حامل جریان، سیملوله‌ی حامل جریان نیز تشکیل یک دوقطبی مغناطیسی می‌دهد که جهت میدان سیملوله از قطب S به قطب N می‌باشد.
- جهت میدان از قانون دست راست به‌دست می‌آید. اگر چهار انگشت دست راست در جهت جریان بچرخند، انگشت شست جهت میدان را نشان خواهد داد.
- $\frac{N}{L}$ بیانگر تعداد حلقه‌ها در واحد طول است که آن را تراکم می‌نامند و با n نشان می‌دهند. $B = \mu_{\circ} nI$
- همان‌طور که از رابطه‌ی میدان درون سیملوله مشخص است، این میدان فقط به تراکم و جریان بستگی دارد و طول سیملوله و یا شعاع حلقه‌ها تأثیری در آن ندارند.
- برای افزایش اندازه‌ی میدان یک سیملوله، درون آن یک فرومغناطیس نرم می‌گذارند که به آن هسته می‌گویند.
- اگر ضریب (مغناطیسی) هسته، k باشد، میدان از رابطه‌ی مقابل به‌دست می‌آید: $B = k\mu_{\circ} \frac{N}{L} I = k\mu_{\circ} nI$
- k به جنس هسته بستگی دارد و برای هوا یا خلأ $k = 1$ در نظر گرفته می‌شود.

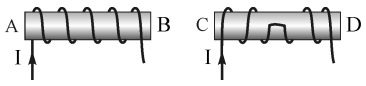
**توجه** به ظاهر، با توجه به رابطه‌ی $B = \mu_{\circ} \frac{N}{L} I$ میدان درون سیملوله به L بستگی دارد؛ ولی ما هر طول $L'$ از سیملوله را که در نظر بگیریم، نسبت تعداد دورهای واقع در آن به طول در نظر گرفته‌شده $(\frac{N'}{L'})$ همواره مقدار ثابتی است. به همین دلیل میدان درون سیملوله به طول سیملوله بستگی ندارد.


سیملوله‌ا

**۱۳- با سیمی به طول $L'$ و قطر $d$، سیملوله‌ی فشرده‌ای به قطر $D$ می‌سازیم و از آن جریان $I$ عبور می‌دهیم. در این صورت، میدان درون سیملوله چه‌قدر است؟**

۱) $\mu_{\circ}\frac{I}{d}$ ۲) $\mu_{\circ}\frac{I}{D}$ ۳) $\mu_{\circ}I\frac{d}{D}$ ۴) $\mu_{\circ}IL'\frac{D}{d}$

**۱۴- نقاط $A$، $B$، $C$ و $D$ به‌ترتیب چه قطب‌هایی هستند؟**



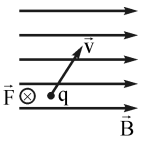

۱) $N$، $S$، $N$، $S$ ۲) $S$، $N$، $S$، $N$
۳) $S$، $S$، $S$، $N$ ۴) $N$، $N$، $N$، $S$

## نیروی وارد بر بار متحرک در میدان مغناطیسی یکنواخت

اگر بار $q$ با سرعت $\vec{v}$ درون میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ حرکت کند، به‌گونه‌ای که راستای حرکت با خطوط میدان زاویه‌ی $\alpha$ بسازد، به آن نیرویی وارد می‌شود که بر $\vec{v}$ و $\vec{B}$ عمود است و اندازه‌ی آن از رابطه‌ی مقابل محاسبه می‌شود:

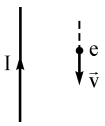
$$F = qvB\sin\alpha$$

جهت نیروی وارد بر بار مثبت (شکل مقابل) از قانون دست راست به‌دست می‌آید. اگر چهار انگشت دست راست در جهت $\vec{v}$ باشد، به‌گونه‌ای که $\vec{B}$ از کف دست خارج شود، انگشت شست جهت $\vec{F}$ را نشان می‌دهد.



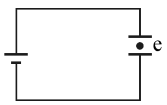

- جهت نیروی وارد بر بار منفی، در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت است.
- اگر ذره، بار نداشته باشد، به آن نیرویی وارد نمی‌شود.
- اگر ذره‌ی باردار، متحرک نباشد، به آن نیرویی وارد نمی‌شود.
- اگر ذره‌ی باردار متحرک، موازی با خطوط میدان (در جهت یا در خلاف جهت میدان) حرکت کند، به ذره نیرویی وارد نمی‌شود.
- اگر ذره‌ی باردار متحرک، عمود بر خطوط میدان حرکت کند، نیروی وارد بر آن بیشینه می‌شود. $\alpha = 90^{\circ} \longrightarrow F_{max} = qvB$
- بردار $\vec{F}$ لزوماً بر هر دو بردار $\vec{v}$ و $\vec{B}$ عمود است؛ ولی دو بردار $\vec{v}$ و $\vec{B}$ می‌توانند هر زاویه‌ای نسبت به هم داشته باشند.
- از آن‌جا که بردار $\vec{F}$ همواره بر $\vec{v}$ و در نتیجه بر مسیر حرکت ذره عمود است، طبق قضیه‌ی کار و انرژی، نیروی مغناطیسی وارد بر ذره هیچ تغییری در اندازه‌ی سرعت ذره ایجاد نمی‌کند و تنها مسیر حرکت ذره را تغییر می‌دهد.

**۱۵- مطابق شکل، الکترون به موازات سیم بلند حامل جریان سقوط می‌کند. در این صورت، نیروی وارد بر الکترون در کدام جهت است؟**




۱) ← ۲) ↑ ۳) → ۴) ↓

**۱۶- در شکل زیر، یک الکترون را با سرعت $v$ به‌صورت درون‌سو و عمود بر صفحه‌ی شکل، بین دو صفحه‌ی خازن شلیک کرده‌ایم و می‌خواهیم با کمک یک میدان مغناطیسی مانع انحراف الکترون شویم. جهت و اندازه‌ی میدان مغناطیسی کدام است؟ (اثر نیروی وزن ناچیز است.)**

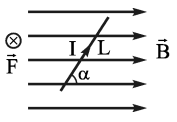



۱) $\frac{E}{v}$ و $\rightarrow$ ۲) $\frac{E}{v}$ و $\leftarrow$
۳) $\frac{v}{E}$ و $\leftarrow$ ۴) $\frac{v}{E}$ و $\rightarrow$

## نیروی وارد بر سیم راست حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواخت

فرض کنید از سیم راستی به طول $L$ جریان $I$ می‌گذرد و این سیم در میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که راستای سیم با خطوط میدان زاویه‌ی $\alpha$ می‌سازد. در این صورت، به سیم نیرویی وارد می‌شود که اندازه‌ی آن از رابطه‌ی مقابل محاسبه می‌شود:

$$F = BIL\sin\alpha$$



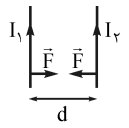
جهت نیرو از قانون دست راست مشخص می‌شود. اگر چهار انگشت دست راست در جهت $I$ قرار گیرند، به‌گونه‌ای که $\vec{B}$ از کف دست خارج شود، انگشت شست جهت نیرو را نشان می‌دهد. $\vec{F}$ لزوماً بر راستای سیم و میدان عمود است؛ اما راستای سیم و میدان می‌توانند هر زاویه‌ای نسبت به هم داشته باشند.

واحد میدان مغناطیسی (تسلا)، به کمک همین رابطه تعریف می‌شود: یک تسلا بزرگی میدان مغناطیسی یکنواختی است که اگر یک سیم حامل جریان $1\,A$ و به طول $1\,m$ عمود بر آن قرار گیرد، به سیم نیروی $1\,N$ وارد شود.

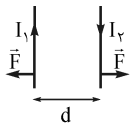
### نیروی بین دو سیم بلندِ مستقیم و موازی حامل جریان

فرض کنید دو سیم بلند و مستقیم در فاصله‌ی $d$ از هم قرار دارند و حامل جریان‌های $I_1$ و $I_2$ هستند؛ در این صورت، از طرف هر سیم به سیم دیگر، نیرو وارد می‌شود که این دو نیروی وارد بر دو سیم، عمل و عکس‌العمل هستند.

اگر جریان دو سیم هم‌سو باشد، دو سیم همدیگر را جذب می‌کنند.




اگر جریان دو سیم ناهم‌سو باشد، دو سیم یکدیگر را دفع می‌کنند.



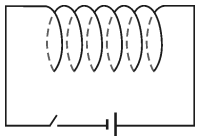

اندازه‌ی نیروی وارد بر $L$ متر از هر سیم، از رابطه‌ی مقابل به‌دست می‌آید.

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d}$$

به کمک این رابطه، واحد جریان (آمپر) را تعریف می‌کنند:[1]

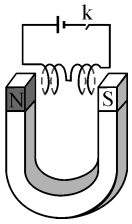
هرگاه از دو سیم نازک، موازی، مستقیم و بسیار دراز که به فاصله‌ی ۱ متر از یکدیگر در خلأ قرار دارند، جریان‌های مساوی عبور کند، به‌گونه‌ای که بر ۱ متر از طول هر یک از سیم‌ها، نیرویی برابر $2\times10^{-7}$ نیوتون وارد شود، جریانی که از هر یک از سیم‌ها می‌گذرد، برابر ۱ آمپر است.

**۱۷- در شکل مقابل، با بستن کلید، .....**



۱) شعاع حلقه‌ها بزرگ‌تر شده و طول سیملوله کوتاه‌تر می‌شود.
۲) شعاع حلقه‌ها کوچک‌تر شده و طول سیملوله بلندتر می‌شود.
۳) شعاع حلقه‌ها و طول سیملوله، هر دو بزرگ‌تر می‌شوند.
۴) شعاع حلقه‌ها و طول سیملوله، هر دو کوچک‌تر می‌شوند.

**۱۸- در شکل مقابل، با بستن کلید $k$، سیملوله .....**




۱) بلندتر می‌شود.
۲) کوتاه‌تر می‌شود.
۳) به سمت راست می‌رود.
۴) به سمت چپ می‌رود.

۱- به این تعریف واحد جریان، تعریف عملیاتی می‌گویند؛ یعنی تعریفی که قابل آزمایش و عمل کردن است. همان‌طور که قبلاً دیدیم، واحد جریان تعریف‌های دیگری هم دارد.

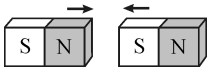
# پاسخ تشریحی فصل ۹

**۱- گزینه‌ی «۳»** وقتی دو میله همدیگر را جذب می‌کنند، نیازی نیست هر دو آهن‌ربا باشند؛ بلکه ممکن است یکی آهن باشد و توسط دیگری که آهن‌رباست، القا و سپس، جذب شده باشد.

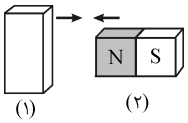
اما وقتی دو میله همدیگر را دفع می‌کنند، حتماً هر دو آهن‌ربا هستند؛ زیرا در اثر القا، فقط جذب صورت می‌گیرد، نه دفع.

بنابراین وقتی میله‌های A و B همدیگر را دفع می‌کنند، حتماً هر دو آهن‌ربا هستند ولی میله‌ی C می‌تواند آهن یا آهن‌ربا باشد.

**۲- گزینه‌ی «۳»** اگر دو میله را از سرهایشان به هم نزدیک کنیم، حتماً همدیگر را جذب می‌کنند. زیرا آهن‌ربا، آهن را القا کرده و هر دو تبدیل به آهن‌ربا با قطب‌های ناهم‌نام می‌شوند. بنابراین نمی‌توان فهمید کدام آهن است و کدام آهن‌ربا؛ اما اگر سر یکی (۲) را به وسط دیگری (۱) نزدیک کنیم، دو حالت پیش می‌آید:



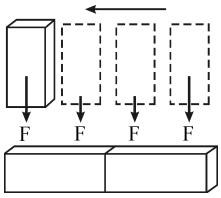

الف) همدیگر را جذب می‌کنند.




در این صورت، میله‌ی (۲)، آهن‌ربا و میله‌ی (۱)، آهن است؛ زیرا وسط یک آهن‌ربا، خاصیت آهن‌ربایی ندارد. پس میله‌ی (۱) نمی‌تواند میله‌ی (۲) را القا کند ولی میله‌ی (۲) می‌تواند میله‌ی (۱) را القا کند.

ب) همدیگر را جذب نمی‌کنند.

در این صورت، میله‌ی (۲) آهن است؛ پس میله‌ی (۱) آهن‌رباست (چون حتماً یکی از این دو، آهن‌رباست). تا این‌جا، آهن‌ربا مشخص شد ولی محل قطب‌های یک آهن‌ربا چگونه توسط یک آهن مشخص می‌شود؟

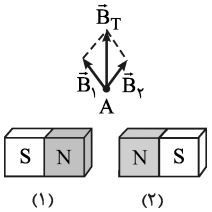


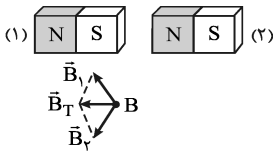

توسط آهن‌ربا به آهن نیرو وارد می‌شود ولی وقتی به قطب‌ها می‌رسیم، این نیرو قوی‌تر است!

پس وقتی آهن را در نزدیکی آهن‌ربا و در سرتاسر آن جابه‌جا می‌کنیم، هر جا نیروی وارد بر دستمان بیشتر بود، آن‌جا قطب است.

چون هیچ وسیله‌ی دیگری نداریم، نوع قطب‌ها مشخص نمی‌شود ولی اگر مثلاً نخ داشتیم، با آویزان کردن آهن‌ربا، آن سری که به سمت شمال می‌ایستاد، قطب شمال و سر دیگر، قطب جنوب می‌شد.

**۳- گزینه‌ی «۳»** میدان مغناطیسی در خارج از آهن‌ربا همیشه از قطب N به قطب S است. در نقطه‌های B و A، میدان ناشی از هر آهن‌ربا و سپس برایند آن‌ها را رسم می‌کنیم (از اثر آهن‌ربای دورتر چشم‌پوشی کرده‌ایم).

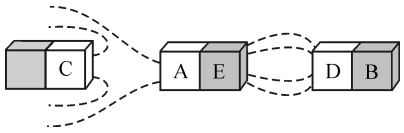



**۴- گزینه‌ی «۳»** از آن‌جا که خاکستری، رنگ قطب N آهن‌رباست، قطب C مشخصاً S است. پس قطب A هم که هم‌نام C است، S است (اگر ناهم‌نام بودند، خطوط از A به C می‌رفتند). قطب D ناهم‌نام با E است؛ پس S است و لذا قطب B، N است.

خطوط میدان قطب A کم‌تر از خطوط قطب C خم شده‌اند و این یعنی قطب A از C قوی‌تر است.

قدرت A و E مثل هم است (شکل مقابل)؛ زیرا دو قطب یک آهن‌ربا هستند. قطب E از D قوی‌تر است؛ زیرا تراکم خطوط در نزدیکی E بیشتر از نزدیکی D است. قدرت قطب‌های D و B مثل هم است؛ زیرا دو قطب یک آهن‌ربا هستند. قدرت E از D بیشتر است؛ پس قدرت A هم از B بیشتر است.



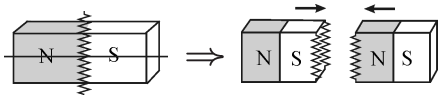

**۵- گزینه‌ی «۱»** برای درک بهتر، هر چهار گزینه را کاملاً بررسی می‌کنیم. اما اول نکته‌ی زیر را ببینید:

ماده‌ی مغناطیسی بودن با خاصیت مغناطیسی داشتن فرق می‌کند. ماده‌ی مغناطیسی یعنی ماده‌ای که **می‌تواند** خاصیت مغناطیسی پیدا کند ولی شاید در حال حاضر (بدون حضور میدان) خاصیت مغناطیسی نداشته باشد. مثلاً آهن یک ماده‌ی مغناطیسی است چون می‌تواند خاصیت مغناطیسی پیدا کند (تبدیل به آهن‌ربا شود)؛ ولی در حالت عادی، خاصیت مغناطیسی ندارد.

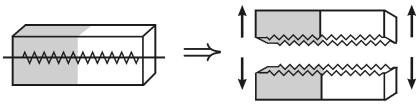
پس دلیلی ندارد که هر ماده‌ی مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی داشته باشد ولی اگر ماده‌ای خاصیت مغناطیسی داشته باشد، حتماً یک ماده‌ی مغناطیسی است.

گزینه‌ی (۱): منگنز یک ماده‌ی پارامغناطیس است. پس یک ماده‌ی مغناطیسی است ولی در شرایط عادی (بدون حضور میدان مغناطیسی قوی)، خاصیت مغناطیسی ندارد.

گزینه‌ی (۲): این‌که دو قطعه‌ی آهن‌ربا همدیگر را جذب می‌کنند یا دفع، به این بستگی دارد که چگونه آهن‌ربا را به دو نیم تقسیم کنیم. اگر مطابق شکل، خط برش عمود بر محور مغناطیسی باشد، دو قطعه‌ی آهن‌ربا همدیگر را جذب می‌کنند.

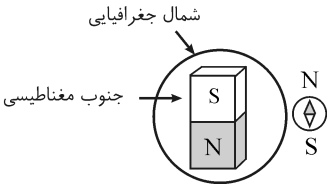



اما اگر خط برش موازی محور مغناطیسی باشد، دو قطعه یکدیگر را دفع می‌کنند.



گزینه‌ی (۳): در شرایط مشابه و در حضور میدان مغناطیسی، در فرومغناطیس نرم، دوقطبی‌ها راحت‌تر با میدان هم‌راستا می‌شوند تا فرومغناطیس سخت. بنابراین فرومغناطیس نرم آهن‌ربای بهتری خواهد بود. اما پس از حذف میدان، فرومغناطیس سخت آهن‌ربای بهتری است.

گزینه‌ی (۴): در حضور میدان مغناطیسی زمین، قطب‌نما به‌گونه‌ای قرار می‌گیرد که قطب N آن شمال جغرافیایی را نشان دهد و می‌دانیم که شمال جغرافیایی زمین، جنوب مغناطیسی آن است. قطب N قطب‌نما، جذبِ قطب S آهن‌ربای زمین می‌شود.




**۶- گزینه‌ی «۴»** گزینه‌های ۱ تا ۴ به‌ترتیب بیانگر یک ماده‌ی فرومغناطیس در:

گزینه‌ی (۱): عدم حضور میدان (برایند بردارها صفر است)؛

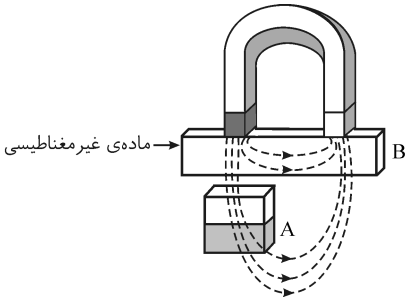
گزینه‌ی (۲): میدان تقریباً ضعیف (برایند بردارها به سمت راست و نسبتاً کوچک است)؛

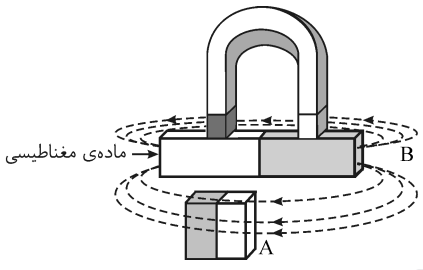
گزینه‌ی (۳): میدان بسیار قوی؛

گزینه‌ی (۴): میدان تقریباً قوی (برایند بردارها به سمت راست و نسبتاً بزرگ است) هستند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، در گزینه‌ی (۴) دوقطبی‌ها تقریباً در یک جهت، جهت‌گیری کرده‌اند.

**۷- گزینه‌ی «۳»** برای این‌که A جذب آهن‌ربا شود، باید در آن القای مغناطیسی صورت گیرد و بدیهی است که باید یک ماده‌ی مغناطیسی باشد و اما B ...

اگر B یک ماده‌ی مغناطیسی باشد، خود تبدیل به یک آهن‌ربا می‌شود و جهت خطوط میدان را عوض می‌کند. بنابراین ماده‌ی A دیگر توسط آهن‌ربا جذب نمی‌شود. زیرا وسط یک آهن‌ربا (وسط B) خاصیت آهن‌ربایی ندارد. به شکل خطوط میدان در دو حالت توجه کنید.



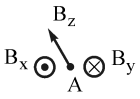




**۸- گزینه‌ی «۱»**

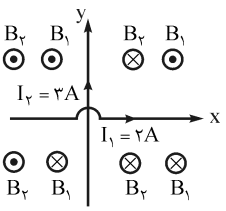
$$\frac{B_۲}{B_۱}=\frac{d_۱}{d_۲} \longrightarrow \frac{۱۲}{۲}=\frac{d}{d-۱} \longrightarrow ۱۲d-۱۲=۲d \longrightarrow ۱۰d=۱۲ \longrightarrow d=۱/۲\,cm$$

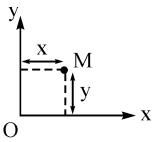
$$B=\frac{\mu_۰ I}{۲\pi d} \longrightarrow ۲\times۱۰^{-۴}=\frac{۴\pi\times۱۰^{-۷}\times I}{۲\pi\times۱/۲\times۱۰^{-۲}} \longrightarrow ۲I=۲۴ \longrightarrow I=۱۲\,A$$

**۹- گزینه‌ی «۴»** میدان ناشی از سیم‌های x و y در نقطه‌ی A به‌ترتیب برون‌سو و درون‌سو هستند و از آن‌جا که جریان سیم‌ها و نیز فاصله‌ی نقطه‌ی A تا دو سیم یکسان است، $B_x = B_y$ می‌باشد. بنابراین اثر هم را خنثی می‌کنند و تنها $\vec{B}_z$ باقی می‌ماند (شکل مقابل).




**۱۰- گزینه‌ی «۱»** نقطه‌ای که در آن، میدان برایند صفر می‌شود، باید در ربع اول یا سوم باشد؛ زیرا در ربع دوم و چهارم میدان‌های ناشی از دو سیم، هم‌جهت هستند و نمی‌توانند همدیگر را خنثی کنند. نقطه‌ی فرضی M را در شکل پایین، در نظر بگیرید که در آن، میدان برایند صفر است. همان‌طور که از شکل هم مشخص است، فاصله‌ی نقطه‌ی M تا محور y را با x و فاصله تا محور x را با y نشان می‌دهیم؛ داریم:



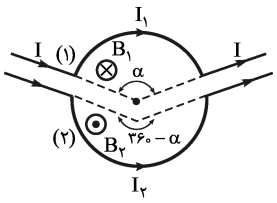

$$B_1 = B_2 \longrightarrow \frac{\mu_\circ I_1}{2\pi y} = \frac{\mu_\circ I_2}{2\pi x} \longrightarrow \frac{2}{y} = \frac{3}{x} \Longrightarrow y = \frac{2}{3}x$$

**۱۱- گزینه‌ی «۴»** جریان به هنگام ورود به حلقه به دو بخش تقسیم می‌شود. یک قسمت از جریان از شاخه‌ی بالایی و مابقی جریان از شاخه‌ی پایینی عبور می‌کند. حلقه عملاً از دو کمان تشکیل شده است که میدان یکی درون‌سو و میدان دیگری برون‌سو است.

اگر مقاومت کل حلقه را R در نظر بگیریم، مقاومت کمان (۱) عبارتست از: $R_1 = \frac{\alpha}{360}R$ و مقاومت کمان (۲) عبارتست از: $R_2 = \frac{360-\alpha}{360}R$.

جریان‌ها به نسبت عکس مقاومت‌ها تقسیم می‌شوند؛ پس: $I_1 = \frac{360-\alpha}{360}I$ و $I_2 = \frac{\alpha}{360}I$ می‌باشند.

حال میدان‌های مغناطیسی را در مرکز حلقه حساب می‌کنیم:




$$B_1 = \frac{\mu_\circ I_1}{2r} \times N_1 = \frac{\mu_\circ \times \frac{360-\alpha}{360}I}{2r} \times \frac{\alpha}{360} = \frac{\mu_\circ I}{2r}\left(\frac{360-\alpha}{360}\right)\left(\frac{\alpha}{360}\right)$$

$$B_2 = \frac{\mu_\circ I_2}{2r} \times N_2 = \frac{\mu_\circ \times \frac{\alpha}{360}I}{2r} \times \frac{360-\alpha}{360} = \frac{\mu_\circ I}{2r}\left(\frac{\alpha}{360}\right)\left(\frac{360-\alpha}{360}\right)$$

بنابراین میدان ناشی از دو کمان، هم‌اندازه و در خلاف جهت هم است؛ پس اثر هم را خنثی می‌کنند و میدان کل در مرکز حلقه، صفر است. بدیهی است که این موضوع، مستقل از زاویه‌ی α یا جریان I و یا شعاع حلقه (r) است.

**۱۲- گزینه‌ی «۳»** بزرگی میدان را در دو حالت حساب می‌کنیم:

میدان پیچه به شعاع $R_1$:

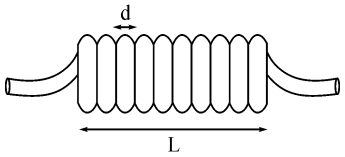
$$B_1 = \frac{\mu_\circ I}{2R_1} \times (N_1) = \frac{\mu_\circ I}{2R_1}\left(\frac{L}{2\pi R_1}\right)$$

میدان پیچه به شعاع $R_2$:

$$B_2 = \frac{\mu_\circ I}{2R_2} \times (N_2) = \frac{\mu_\circ I}{2R_2}\left(\frac{L}{2\pi R_2}\right)$$

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{\frac{\mu_\circ I}{2R_2}\left(\frac{L}{2\pi R_2}\right)}{\frac{\mu_\circ I}{2R_1}\left(\frac{L}{2\pi R_1}\right)} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

**۱۳- گزینه‌ی «۱»** منظور از سیملوله‌ی فشرده، این است که حلقه‌ها به هم چسبیده‌اند و بین آن‌ها فاصله‌ای نیست. در این صورت، اگر سیملوله از N حلقه با سیم‌هایی به قطر d تشکیل شده باشد، داریم:

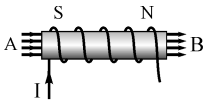



$$L = N \times d$$

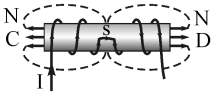
$$B = \mu_\circ \frac{N}{L} I = \mu_\circ \frac{N}{N \times d} I = \frac{\mu_\circ I}{d}$$

همان‌طور که می‌بینید، قطر سیملوله و یا طول سیم و سیملوله تأثیری در میدان سیملوله‌ی فشرده ندارد.

**۱۴- گزینه‌ی «۴»**

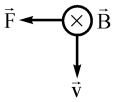



به کمک قانون دست راست، مشخص است که خطوط میدان به A وارد شده و از B خارج می‌شوند؛ پس A قطب S و B قطب N است.

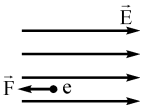



به همین ترتیب، به کمک قانون دست راست، مشخص است که خطوط میدان هم از C و هم از D خارج می‌شوند؛ پس هم C و هم D قطب N هستند و وسط جسم قطب S است. یعنی این آهن‌ربای الکتریکی دو قطب N و یک قطب S قوی‌تر دارد.

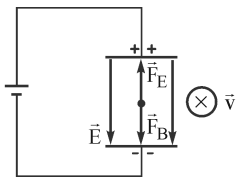
**۱۵- گزینه‌ی «۱»** در نقطه‌ی مورد نظر، میدان مغناطیسی سیم درون‌سو است. طبق قانون دست راست، نیرو باید به سمت راست باشد؛ ولی چون بار ذره‌ی مورد نظر منفی است، نیرو به سمت چپ است. می‌دانیم که سیم بر بار نیروی الکتریکی وارد نمی‌کند و $\vec{F}$ فقط مغناطیسی است.




**۱۶- گزینه‌ی «۲»** می‌دانیم که نیروی وارد بر الکترون در میدان الکتریکی، در خلاف جهت خطوط میدان است و ربطی به نحوه‌ی حرکت آن ندارد؛ در حالی که نیروی وارد بر الکترون در میدان مغناطیسی وابسته به نحوه‌ی حرکت و در خلاف جهت قانون دست راست است.



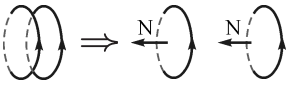

نیروی میدان الکتریکی ($\vec{F}_E$) به سمت بالا است؛ پس نیروی میدان مغناطیسی ($\vec{F}_B$) باید به سمت پایین باشد تا برایند نیروهای وارد بر ذره صفر شود (از نیروی وزن صرف‌نظر شده است). طبق قانون دست راست، $\vec{B}$ باید به سمت راست باشد ولی چون بار ذره منفی است، $\vec{B}$ به سمت چپ است.



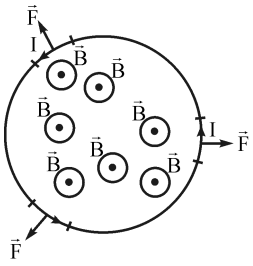

از طرفی، اندازه‌ی $\vec{F}_E$ و $\vec{F}_B$ باید یکسان باشد؛ پس داریم:

$$F_E = F_B \longrightarrow Eq = qvB\underbrace{\sin\alpha}_{1} \longrightarrow E = vB \longrightarrow B = \frac{E}{v}$$

**۱۷- گزینه‌ی «۱»**




جریان در حلقه‌ها به‌صورت روبه‌رو است؛ پس روی سمت چپ همه‌ی حلقه‌ها N و روی سمت راست همه‌ی حلقه‌ها S است. پس قطب N هر حلقه در کنار قطب S حلقه‌ی مجاور است و لذا حلقه‌ها همدیگر را جذب می‌کنند؛ در نتیجه، طول سیملوله کوتاه‌تر می‌شود.

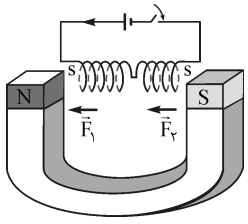



این موضوع را این‌گونه نیز می‌توان توجیه کرد: جریان حلقه‌ها هم‌سو است و می‌دانیم دو سیم که جریان هم‌سو دارند، همدیگر را جذب می‌کنند.

و اما در مورد شعاع حلقه‌ها:

هر قطعه‌ی کوچک (المان) از یک حلقه را که در نظر بگیریم، تحت اثر میدان قوی‌ترِ درون سیملوله، یک نیرو به سمت بیرون به آن وارد می‌شود؛ پس در اثر این نیروها، حلقه‌ها اندکی بازتر می‌شوند و شعاع آن‌ها اندکی بزرگ‌تر می‌شود.

**۱۸- گزینه‌ی «۴»** ابتدا نوع قطب‌های دو سر سیملوله را به کمک قانون دست راست تعیین می‌کنیم:




بنابراین در سمت چپ یک نیروی جاذبه ($\vec{F}_1$) و در سمت راست یک نیروی دافعه ($\vec{F}_2$) به سیملوله وارد می‌شود. در نتیجه، سیملوله به سمت چپ حرکت می‌کند.