فهرست

فصل اول

بخش اول (بار الکتریکی) ۸

بخش دوم (نیروی الکتریکی) ۱۶

بخش سوم (میدان الکتریکی) ۲۲

بخش چهارم (انرژی پتانسیل الکتریکی) ۳۶

بخش پنجم (توزیع بار الکتریکی در ...) ۴۹

بخش ششم (خازن) ۵۷

پرسش‌های تستی ۶۸

پاسخ پرسش‌های تستی ۷۱

فصل دوم

بخش اول (جریان الکتریکی و ...) ۷۶

بخش دوم (مدار الکتریکی ساده) ۹۶

بخش سوم (توان الکتریکی در مدار) ۱۱۱

بخش چهارم (به هم بستن مقاومت‌ها) ۱۲۱

پرسش‌های تستی ۱۴۰

پاسخ پرسش‌های تستی ۱۴۲

فصل سوم

بخش اول (الفبای مغناطیس) ۱۴۷

بخش دوم (نیروی مغناطیسی) ۱۵۴

بخش سوم (میدان مغناطیسی ...) ۱۶۶

بخش چهارم (ویژگی‌های مغناطیسی مواد) ۱۷۹

پرسش‌های تستی ۱۸۴

پاسخ پرسش‌های تستی ۱۸۷

فصل چهارم

بخش اول (پدیدهٔ القای الکترومغناطیس) ۱۹۰

بخش دوم (القاگر) ۲۰۹

بخش سوم (جریان متناوب) ۲۱۶

پرسش‌های تستی ۲۲۴

پاسخ پرسش‌های تستی ۲۲۷

ضمائم

فرمول‌ها ۲۳۰

بخش ۱

الفبای مغناطیس

۱- آهن‌ربا

آهن‌ربا قطعه‌ای از یک مادهٔ کانی به نام مگنتیت (Fe_3O_4) است که به طور طبیعی در پوستهٔ کرهٔ زمین وجود دارد.

- **قطب‌های آهن‌ربا:** در هر آهن‌ربا با هر شکلی که باشد، **دو** ناحیه وجود دارد که در آن‌ها خاصیت مغناطیسی خیلی بیشتر از قسمت‌های دیگر است، به این دو ناحیه، **قطب‌های آهن‌ربا** می‌گوییم. یکی قطب N (شمال) و دیگری قطب S (جنوب). در شکل روبه‌رو، مقدار زیادی از براده‌های آهن، جذب قطب‌های آهن‌ربا شده‌اند.

- آهن‌رباها، به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند که برخی از آن‌ها را در شکل‌های زیر می‌بینید:

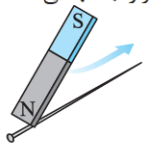
آهن‌ربای میله‌ای

آهن‌ربای نعل‌اسبی

آهن‌ربای تخت دایره‌ای

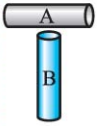
آهن‌ربای C شکل

- قطب‌های هم‌نام یکدیگر را **دفع** و قطب‌های ناهم‌نام یکدیگر را **جذب** می‌کنند.
- وقتی یکی از قطب‌های یک آهن‌ربا را **چندین بار** و در **یک جهت** به یک میلهٔ آهنی کوچک (مثل یک سوزن ته‌گرد در شکل روبه‌رو) بکشیم، میلهٔ آهنی برای مدتی خاصیت مغناطیسی پیدا کرده و تبدیل به یک آهن‌ربا می‌شود.



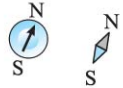
مثال

دو میلهٔ کاملاً مشابه، یکی از جنس آهن و دیگری آهن‌ربا در اختیار داریم. چگونه می‌توان بدون استفاده از هیچ وسیلهٔ دیگری میلهٔ آهن‌ربایی را مشخص کرد؟

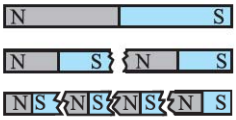


پاسخ کافی است یکی از میله‌ها را مثل شکل روبه‌رو دقیقاً به وسط میلهٔ دیگر نزدیک کنیم:
اگر دو میله یکدیگر را جذب کنند، A آهنی و B آهن‌ربا است.
اگر دو میله نیرویی به هم وارد نکنند، A آهن‌ربا و B آهنی است.

■ **عقربهٔ مغناطیسی (قطب‌نما):** عقربهٔ مغناطیسی (یا قطب‌نما) یک آهن‌ربای میله‌ای بسیار کوچک و سبک است. از عقربهٔ مغناطیسی برای پیداکردن جهت‌های جغرافیایی استفاده می‌شود. عقربهٔ مغناطیسی را به شکل‌های مقابل نشان می‌دهیم:



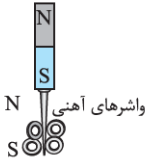
■ **دوقطبی مغناطیسی:** اگر یک آهن‌ربا را به شکل زیر، به دو قسمت تقسیم کنیم، هر قسمت به طور مستقل به یک آهن‌ربا با قطب‌های N و S تبدیل می‌شود، به طوری که در محل برش، قطب‌های **ناهم‌نام** ایجاد می‌شود.



■ اگر روند برش‌دادن آهن‌ربا، در شکل بالا را ادامه دهیم، به کوچک‌ترین آهن‌ربای ممکن می‌رسیم که به آن **دوقطبی مغناطیسی** می‌گوییم. دوقطبی‌های مغناطیسی همان مولکول‌ها یا اتم‌های مادهٔ سازندهٔ آهن‌ربا است.

■ قطب‌های N و S آهن‌ربا شبیه بارهای الکتریکی مثبت و منفی هستند، اما یک تفاوت بزرگ وجود دارد. بارهای + و − می‌توانند به تنهایی وجود داشته باشند، ولی قطب‌های N و S نه. به عبارتی تک‌قطبی مغناطیسی وجود **ندارد!**

■ **القای مغناطیسی:** اگر یک جسم آهنی به شکل روبه‌رو، در فاصلهٔ کمی از یک آهن‌ربا یا در تماس با آن باشد، آهن‌ربا در جسم آهنی خاصیت آهن‌ربایی القا کرده و آن را به آهن‌ربا تبدیل می‌کند. به این پدیده، القای مغناطیسی می‌گوییم.

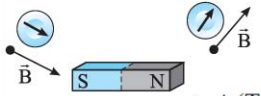


- در پدیدهٔ القای مغناطیسی همیشه آهن‌ربا جسم آهنی را **جذب** می‌کند. یعنی همان‌طور که در شکل‌های زیر می‌بینید، در قسمت نزدیک‌تر جسم آهنی، قطب **ناهم‌نام** ایجاد می‌شود.

۲- میدان مغناطیسی

- هر آهن‌ربا در اطراف خود خاصیتی ایجاد می‌کند که به سبب آن به اجسام آهنی اطراف خود (مثل شکل‌های زیر) و آهن‌رباهای دیگر اطرافش نیرو وارد می‌کند، به این خاصیت **میدان مغناطیسی** می‌گوییم. میدان مغناطیسی کمیتی برداری و نماد آن $\vec{B}$ است.

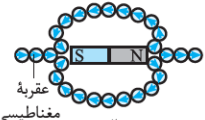
- بردار میدان مغناطیسی در یک نقطه از فضا، در جهتی است که **قطب** N عقربهٔ مغناطیسی، در آن نقطه نشان می‌دهد.



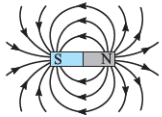
- یکای میدان مغناطیسی در SI، تسلا (T) است.
- بزرگی میدان مغناطیسی در نزدیکی یک اهن‌ربای میله‌ای حدود ۰/۰۱T تا ۰/۱T است.
- میدان مغناطیسی یکای کوچک‌تر دیگری به نام گاوس (G) هم دارد، که $1\,T = 10^4\,G$ است.

۳- خطوط میدان مغناطیسی

- شبیه میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی را هم با خطوطی نشان می‌دهیم. برای رسم خطوط میدان مغناطیسی در قسمتی از فضا کافی است عقربه‌های مغناطیسی را در چند نقطه از فضا به شکل (الف) قرار داده و با تعیین جهت بردار میدان مغناطیسی در این نقاط، خطوط میدان را تجسم کنیم (شکل (ب)).

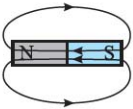


(الف)

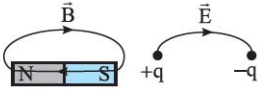


(ب)

ویژگی خطوط میدان مغناطیسی



۱ جهت خطوط میدان مغناطیسی در **خارج از آهن‌ربا** از قطب N **به** S و در **داخل** آن از قطب S **به** N **است.**



۲ برخلاف خطوط میدان الکتریکی، خطوط میدان مغناطیسی **بسته** هستند.

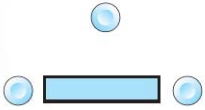
۳ هر چه تراکم خطوط میدان مغناطیسی در نقطه‌ای بیشتر باشد، میدان مغناطیسی در آن نقطه قوی‌تر است.

۴ در هر نقطه از فضا، بردار میدان مغناطیسی، برداری است مماس بر خط میدان و هم‌جهت با آن.

۵ خطوط میدان مغناطیسی یکدیگر را قطع نمی‌کنند و از هر نقطه از فضا تنها یک خط میدان می‌گذرد.

مثال

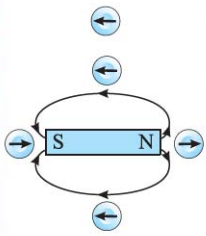
شکل روبه‌رو، یک آهن‌ربای میله‌ای و تعدادی عقربهٔ مغناطیسی را نشان می‌دهد.



الف) کدام سر آهن‌ربا قطب N و کدام سر قطب S است؟

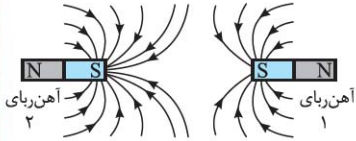
ب) جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی را در دیگر مکان‌های روی شکل تعیین کنید.

پاسخ با توجه به جهت میدان مغناطیسی در عقربهٔ داده‌شده، قطب‌های آهن‌ربا، خطوط میدان و جهت‌گیری سه عقربهٔ مغناطیسی دیگر به شکل روبه‌رو خواهد بود. دقت کنید که جهت خطوط میدان در خارج از آهن‌ربا از قطب N به قطب S است.



مثال

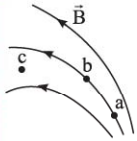
خط‌های میدان مغناطیسی بین دو آهن‌ربا در شکل مقابل نشان داده شده است. اندازهٔ میدان مغناطیسی را در نزدیکی قطب‌های آهن‌رباها با هم مقایسه کنید.



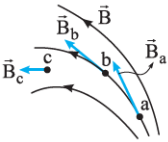
پاسخ چون تراکم خطوط در نزدیکی آهن‌ربای (۲) بیشتر است، اندازهٔ میدان در نزدیکی این آهن‌ربا بزرگ‌تر است.

مثال

شکل روبه‌رو، خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا را نشان می‌دهد. بردار میدان مغناطیسی را در هر یک از نقطه‌های روی شکل رسم کنید. (به اندازه و جهت بردار میدان در هر نقطه توجه کنید.)

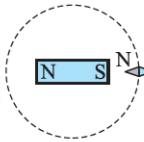


پاسخ بردار میدان در هر نقطه، برداری مماس بر خط میدان عبوری از آن نقطه و هم‌جهت با آن است. هم‌چنین تراکم خطوط میدان، نشان‌دهندهٔ اندازهٔ میدان در هر نقطه است. پس: $B_a > B_b > B_c$



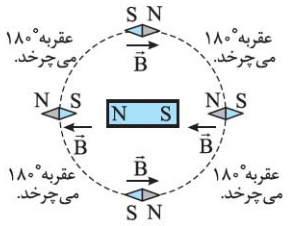
تست

یک آهن‌ربای میله‌ای مطابق شکل روبه‌رو، روی یک میز قرار دارد. یک عقربهٔ مغناطیسی که آزادانه می‌تواند حول محور قائم بچرخد، به آرامی روی مسیر دایره‌ای‌شکل به دور آهن‌ربا یک دور می‌چرخد. در این مسیر عقربه چند درجه دوران می‌کند؟ (ریاضی ۹۶)



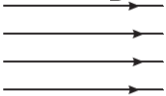
۱) ۱۸۰ ۲) ۲۷۰ ۳) ۳۶۰ ۴) ۷۲۰

پاسخ| گزینهٔ ۴ مطابق شکل روبه‌رو جهت‌گیری عقربهٔ مغناطیسی را در ۴ نقطه مشخص می‌کنیم. همان‌طور که می‌بینید، در هر ربع دایره عقربه 180° می‌چرخد، پس در کلِ دایره 720° می‌چرخد.

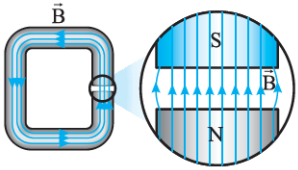


۴- میدان مغناطیسی یکنواخت

- هرگاه در نقاط مختلف ناحیه‌ای از فضا **جهت** و **اندازهٔ** میدان مغناطیسی یکسان باشد، به میدان مغناطیسی در این ناحیه، میدان مغناطیسی یکنواخت می‌گوییم.

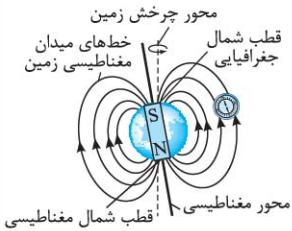


- خطوط میدان مغناطیسی یکنواخت، **راست**، **موازی**، **هم‌جهت** و **هم‌فاصله** هستند. مثل شکل مقابل:
- ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت در ناحیهٔ بزرگی از فضا بسیار دشوار و در عمل غیرممکن است. با این وجود، می‌توان در ناحیهٔ کوچکی از فضا، مانند ناحیهٔ بین قطب‌های یک آهن‌ربای Cشکل، میدان مغناطیسی یکنواخت ایجاد کرد.



۵- میدان مغناطیسی زمین

- زمین مثل یک آهن‌ربای میله‌ای بزرگ است و خطوط میدان مغناطیسی اطراف آن به شکل زیر است:
- همان‌طور که در شکل می‌بینید، قطب شمال مغناطیسی (N) زمین در نزدیکی قطب جنوب جغرافیایی و قطب جنوب مغناطیسی (S) زمین در نزدیکی قطب شمال جغرافیایی زمین قرار دارد.



- اگر در نقطه‌ای از سطح کرهٔ زمین یک قطب‌نما (عقربهٔ مغناطیسی) به حال خود رها شود، همواره در حالتی می‌ایستد که قطب N آن، جهت شمال جغرافیایی را نشان دهد.
- جهت میدان مغناطیسی در سطح کرهٔ زمین (به‌جز قطب شمال و جنوب) تقریباً به سمت **شمال جغرافیایی** است.
- قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق **نیستند** و فاصلهٔ نسبتاً زیادی از هم دارند، به همین دلیل عقربهٔ مغناطیسی قطب‌نما در جهت شمال واقعی جغرافیایی قرار **نمی‌گیرد** و تا حدودی انحراف دارد.
- اندازهٔ میدان مغناطیسی زمین در نزدیکی سطح زمین، در قطب‌ها **بیشینه** (۰/۶۵ G) و در استوا **کمینه** (۰/۲۵ G) است.
- **شیب مغناطیسی**: اگر یک عقربهٔ مغناطیسی سبک را از وسط آن آویزان کنیم، در بیشتر نقاط زمین، به طور افقی قرار نمی‌گیرد و امتداد آن با سطح افقی زمین زاویه می‌سازد. به این زاویه شیب مغناطیسی می‌گوییم.

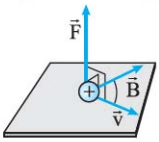
بخش ۲

نیروی مغناطیسی

۱- جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی متحرک

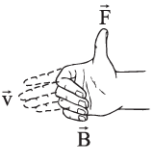
■ اگر ذرهٔ باردار q با سرعت $\vec{v}$ در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ حرکت کند (به شرط آن‌که راستای حرکت آن با خطوط میدان مغناطیسی موازی نباشد) بر آن نیرویی وارد می‌شود. به این نیرو، **نیروی مغناطیسی** $(\vec{F})$ می‌گوییم.

■ نیروی مغناطیسی $\vec{F}$ **بر هر دو بردار** $\vec{B}$ و $\vec{v}$ **عمود** است. به عبارت دیگر، نیروی مغناطیسی بر صفحه‌ای که توسط بردار سرعت و بردار میدان مغناطیسی تشکیل می‌شود، عمود است.

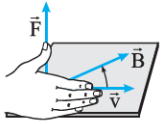


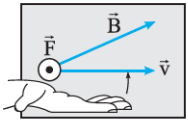
■ برای تعیین جهت نیروی $\vec{F}$ به شکل زیر عمل می‌کنیم:

الف اگر بار ذره مثبت باشد: طبق قاعدهٔ دست راست، اگر چهار انگشت دست راست را در جهت $\vec{v}$ نگه داریم به طوری که جهت چرخش انگشتان در جهت $\vec{B}$ قرار گیرد، انگشت شست جهت $\vec{F}$ را نشان می‌دهد.



به عنوان مثال به شکل‌های زیر نگاه کنید:





ب اگر بار ذره منفی باشد: دو روش وجود دارد: **۱** از همان قاعدهٔ دست راست استفاده کرده و در آخر، جهت بردار خواسته‌شده را قرینه کنیم.

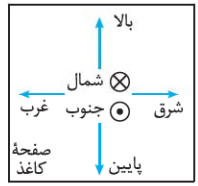
۲ قاعدهٔ دست راست را با دست چپ انجام دهیم.

- دو نوع بردار عمود بر صفحه وجود دارد:

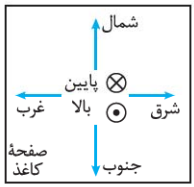
بردار	نماد	توضیح
درون‌سو	⊗	عمود بر صفحهٔ کاغذ و به طرف داخل
برون‌سو	⊙	عمود بر صفحهٔ کاغذ و به طرف بیرون

- جهت‌های جغرافیایی را روی صفحهٔ کاغذ به دو روش زیر می‌توانیم نشان دهیم:

روش اول

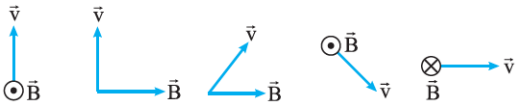


روش دوم

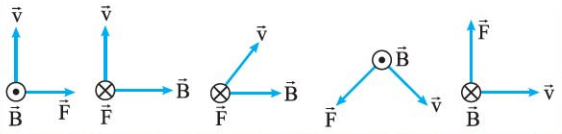


مثال

جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هر یک از حالت‌های نشان داده در شکل زیر تعیین کنید.

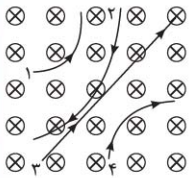


پاسخ چون بار مثبت است، با استفاده از قاعدهٔ دست راست در هر حالت جهت نیروی واردشده بر بار را مشخص می‌کنیم:

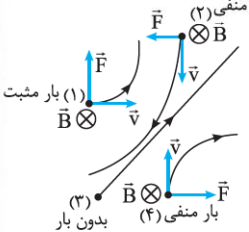


مثال

چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون‌سو مسیرهایی مطابق شکل روبه‌رو می‌پیمایند. دربارهٔ نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟

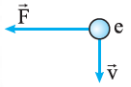


پاسخ لحظهٔ ورود هر ذره به میدان را در نظر می‌گیریم. در این لحظه بردار سرعت، مماس بر مسیر و بردار نیرو در جهت انحراف ذره است، پس جهت سه بردار $\vec{F}$، $\vec{v}$ و $\vec{B}$ را داریم. اگر این سه جهت با قاعدهٔ دست راست جور در بیایند، بار مثبت و در غیر این صورت منفی است.

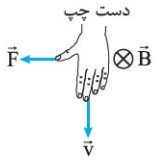


تست

الکترونی عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. با توجه به شکل، جهت میدان $\vec{B}$ کدام است؟

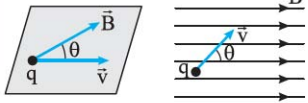


۱) بالا
۲) راست
۳) درون‌سو
۴) برون‌سو



پاسخ| گزینهٔ ۳ چون بار الکترون منفی است، مطابق شکل روبه‌رو از دست چپ خود برای تعیین میدان استفاده می‌کنیم. همان‌طور که می‌بینید میدان مغناطیسی باید درون‌سو باشد.

۲- اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی متحرک

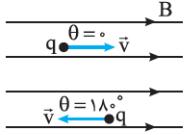


- نیروی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک در میدان مغناطیسی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

بزرگی میدان مغناطیسی (تسلا: T) تندی (متربرثانیه: m/s)

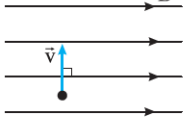
زاویهٔ بین جهت حرکت ذره و میدان مغناطیسی ← $F = |q| v B \sin\theta$ ← نیروی مغناطیسی (نیوتن: N)

بار الکتریکی (کولن: c)



- اگر ذرهٔ باردار، مثل شکل روبه‌رو، **موازی** خطوط میدان حرکت کند، به آن نیروی مغناطیسی وارد نمی‌شود:

$$\theta = 0 \text{ یا } 180^\circ \Rightarrow \sin\theta = 0 \Rightarrow F = 0$$



- اگر ذرهٔ باردار، مثل شکل روبه‌رو **عمود** بر خطوط میدان حرکت کند، نیروی مغناطیسی وارد بر آن بیشینه می‌شود:

$$\theta = 90^\circ \Rightarrow \sin\theta = 1 \Rightarrow F_{max} = qvB$$

- نیروی مغناطیسی همیشه بر بردار سرعت ذره، یعنی جهت حرکت آن عمود است. پس:

اولاً: کار انجام‌شده توسط این نیرو بر روی ذره **همواره** برابر **صفر** است.

دوماً: طبق قضیهٔ کار ـ انرژی جنبشی، انرژی جنبشی و در نتیجه تندی جسم تغییر **نمی‌کند** (یعنی فقط جهت حرکت بار عوض می‌شود).

- اگر بار الکتریکی در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بدون انحراف به مسیرش ادامه دهد:

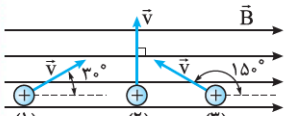
اولاً: باید نیروهای الکتریکی و مغناطیسی در خلاف جهت هم باشند.

ثانیاً: اندازهٔ این دو نیرو باید برابر باشد، یعنی:

$$|q|vB\sin\theta = E|q| \Rightarrow \text{نیروی الکتریکی} = \text{نیروی مغناطیسی}$$

مثال

سه ذره، هر کدام با بار $q = 6\,\mu C$ و تندی $v = 40\,m/s$، در میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازهٔ $B = 0/1\,T$ در حرکت‌اند (شکل روبه‌رو). اندازهٔ نیروی وارد بر هر ذره را حساب کنید.



پاسخ برای هر ذره، داده‌های مسئله را در فرمول زیر جای‌گذاری می‌کنیم:

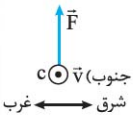
$$F = |q|vB\sin\theta$$

$$\Rightarrow \begin{cases} (۱)\text{ذرهٔ}: F_1 = (6\times10^{-6})\times40\times0/1\times\sin(30) = 1/2\times10^{-5}\,N \\ (۲)\text{ذرهٔ}: F_2 = (6\times10^{-6})\times40\times0/1\times\sin(90) = 2/4\times10^{-5}\,N \\ (۳)\text{ذرهٔ}: F_3 = (6\times10^{-6})\times40\times0/1\times\sin(150) = 1/2\times10^{-5}\,N \end{cases}$$

مثال

الکترونی با تندی $2/4\times10^{5}\ m/s$ درون میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. اندازهٔ نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند. ($e=1/6\times10^{-19}\ C$)

الف) اگر جهت این نیروی بیشینه، رو به بالا و اندازهٔ آن برابر $9/6\times10^{-14}\ N$ باشد، اندازه و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید.



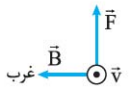
ب) اندازهٔ میدان الکتریکی چه‌قدر باشد تا همین نیرو را ایجاد کند؟

پاسخ الف) به ازای $\theta=90^{\circ}$ در فرمول $F=|q|vB\sin\theta$، اندازهٔ نیروی مغناطیسی بیشینه می‌شود، پس:

$$F_{max}=|q|vB\Rightarrow 9/6\times10^{-14}=1/6\times10^{-19}\times2/4\times10^{5}\times B$$

$$\Rightarrow B=2/5\ T$$

جهت میدان مغناطیسی هم در شکل روبه‌رو، طبق قاعدهٔ دست راست (البته با دست چپ) به دست می‌آید که به طرف غرب است.



ب) به سراغ فرمول $F=E|q|$ می‌رویم:

$$F=E|q|\ \Rightarrow\ 9/6\times10^{-14}=E\times1/6\times10^{-19}$$

$$\Rightarrow E=6\times10^{5}\ N/C$$

تست

ذره‌ای به جرم ۵۰۰ میلی‌گرم با سرعت $10^{3}\,m/s$ به طور عمود وارد میدان مغناطیسی یکنواخت ۴ میلی‌تسلا می‌شود. اگر بار الکتریکی ذره، $50\,\mu C$ باشد، شتابی که ذره تحت تأثیر میدان می‌گیرد، چند متر بر مربع ثانیه است؟ (ریاضی ۹۲)

۱) ۰/۴۰ ۲) ۰/۰۴ ۳) ۰/۲۰ ۴) ۰/۰۲

پاسخ| گزینهٔ ۱ نیروی وارد بر ذره را در رابطهٔ $F = ma$ قرار می‌دهیم. یعنی:

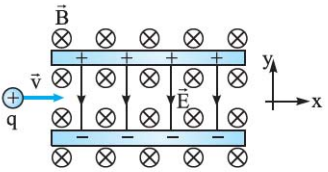
$$F = ma \Rightarrow |q|vB\sin\theta = ma$$

$$\xrightarrow{\theta=90^\circ} \underbrace{(50\times10^{-6})}_{\text{تبدیل میلی‌گرم به کیلوگرم}}\times10^{3}\times\underbrace{(4\times10^{-3})}_{\text{تبدیل میکروکولن به کولن}} = 500\times10^{-6}\times a$$

$$\Rightarrow a = 0/4\ m/s^{2}$$

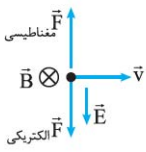
تست

ذرهٔ باردار مثبتی با جرم ناچیز و با سرعت $\vec{v}$ در امتداد محور x وارد فضایی می‌شود که میدان‌های یکنواخت $\vec{E}$ و $\vec{B}$ وجود دارد (شکل زیر). اندازهٔ این میدان‌ها برابر $E = 450\ N/C$ و $B = 0/18\ T$ است. تندی ذره چند کیلومتر بر ثانیه باشد تا در همان امتداد محور x به حرکت خود ادامه دهد؟



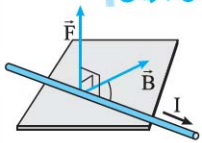
۱) ۲/۵
۲) ۴
۳) $2/5\times10^{3}$
۴) 4×10^{3}

پاسخ| گزینهٔ ۱ شرط این‌که ذره منحرف نشود، این است که دو نیروی الکتریکی و مغناطیسی وارد بر آن هم‌اندازه و در خلاف جهت هم باشند. پس: $F_{\text{الکتریکی}} = F_{\text{مغناطیسی}}$

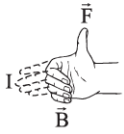


$$|q|vB\sin\theta = E|q| \xrightarrow{\theta=90^\circ} vB = E$$
$$\Rightarrow v\times 0/18 = 450 \Rightarrow v = 2500\,m/s = 2/5\,km/s$$

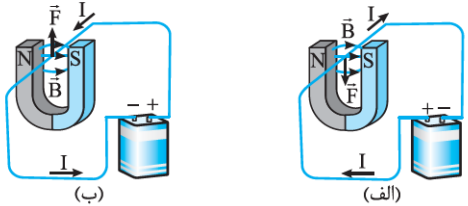
۳- جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان



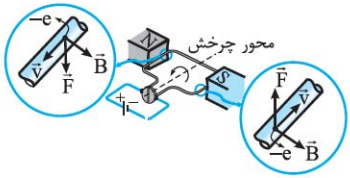
- اگر سیم حامل جریان I در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ قرار داشته باشد، از طرف میدان به سیم نیروی مغناطیسی ($\vec{F}$) وارد می‌شود. این نیرو هم بر راستای سیم و هم بر راستای میدان مغناطیسی **عمود** است.
- برای تعیین جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان از قاعدهٔ دست راست استفاده می‌کنیم. یعنی: چهار انگشت دست راست را در جهت جریان (I) نگه می‌داریم، به طوری که جهت چرخش انگشتان دیگر در جهت $\vec{B}$ قرار گیرد. در این صورت انگشت شست جهت $\vec{F}$ را نشان می‌دهد.



این قاعده را در شکل‌های زیر برای خودتان به کار ببرید.

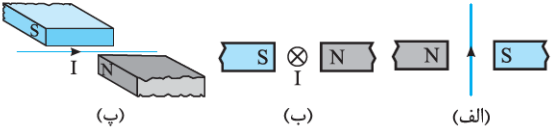


موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. شکل زیر طرحی ساده از اجزای اصلی یک موتور الکتریکی را نشان می‌دهد. در این شکل بر هر جزء از حلقهٔ حامل جریان، نیروی مغناطیسی وارد می‌شود و این نیروها حلقه را می‌چرخاند.

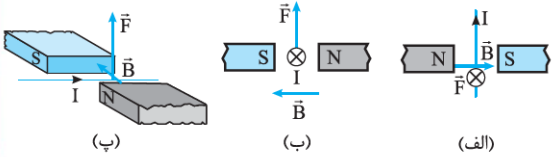


مثال

جهت نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های (الف)، (ب) و (پ) بیابید.

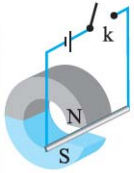


پاسخ در هر شکل ابتدا جهت میدان مغناطیسی را، که از N به S است، مشخص کرده و سپس با استفاده از قاعدهٔ دست راست جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را مشخص می‌کنیم.

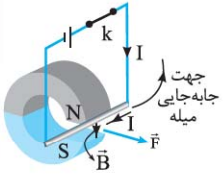


مثال

یک میلهٔ رسانا به پایانه‌های یک باتری وصل شده و مطابق شکل در فضای بین قطب‌های یک آهن‌ربای Cشکل آویزان شده است و می‌تواند آزادانه نوسان کند. با بستن کلید k، چه اتفاقی برای میلهٔ رسانا رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.

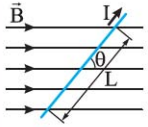


پاسخ جهت میدان ناشی از آهن‌ربا روی سیم، از قطب N به قطب S، یعنی رو به پایین است. با توجه به قاعدهٔ دست راست، نیروی مغناطیسی‌ای به سمت راست به سیم وارد می‌شود. سیم در جهت نشان داده شده کمی جابه‌جا می‌شود.



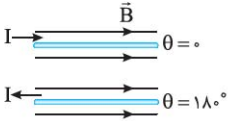
۴- اندازهٔ نیروی وارد بر سیم حامل جریان

■ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواخت از فرمول زیر به دست می‌آید:



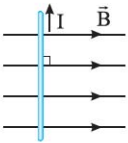
$$F = B\, I\, \ell \sin\theta$$

- F: نیروی مغناطیسی (نیوتن: N)
- B: میدان مغناطیسی (تسلا: T)
- I: جریان عبوری از سیم (آمپر: A)
- ℓ: طول سیم در میدان (متر: m)
- θ: زاویهٔ بین امتداد سیم با میدان



■ اگر سیم حامل جریان، **موازی** خطوط میدان مغناطیسی باشد، به آن نیرویی وارد نمی‌شود:

$\theta = ۰$ یا $۱۸۰^\circ \Rightarrow \sin\theta = ۰ \Rightarrow F = ۰$



■ اگر سیم حامل جریان، **عمود** بر خطوط میدان مغناطیسی باشد، نیروی وارد بر آن بیشینه می‌شود:

$\theta = ۹۰^\circ \Rightarrow \sin\theta = ۱ \Rightarrow F_{max} = BI\ell$

■ اگر یک سیم حامل جریان تحت نیروهای وزن و مغناطیسی در تعادل باشد:

اولاً: چون نیروی وزن رو به پایین است، نیروی مغناطیسی وارد بر سیم باید رو به بالا باشد.

ثانیاً: اندازهٔ نیروی مغناطیسی و وزن باید برابر باشد:

نیروی مغناطیسی = نیروی وزن $\Rightarrow BI\ell\sin\theta = mg$

مثال

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی ۴۰۰ G در راستایی قرار دارد که با جهت میدان زاویهٔ ۳۰° می‌سازد. اگر جریان عبوری از سیم، ۵ A باشد، بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر ۱m از این سیم را حساب کنید.

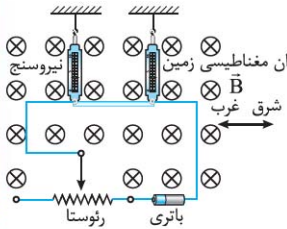
پاسخ بعد از تبدیل یکای میدان به تسلا، مقدارهای داده‌شده را در فرمول زیر جاگذاری می‌کنیم:

$$F = BI\ell\sin\theta = (۴۰۰\times۱۰^{-۴})\times۵\times۱\times\frac{۱}{۲} = ۰/۱\,N$$

(تبدیل گاوس (G) به تسلا (T))

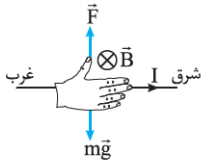
مثال

یک سیم حامل جریان مطابق شکل زیر با دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به طور افقی و در راستای غرب ـ شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین، یکنواخت، به طرف شمال و با اندازهٔ $0/05\ mT$ است. اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور کند؟ (جرم هر متر از طول این سیم ۸ گرم است و $g = 10\ N/kg$).



پاسخ برای این‌که نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، نیروی مغناطیسی وارد بر سیم باید نیروی وزن را خنثی کند، پس:

اولاً: چون نیروی وزن به طرف پایین است، نیروی مغناطیسی باید به طرف بالا و طبق قاعدهٔ دست راست، جریان عبوری از سیم به طرف شرق باشد.



ثانیاً: اندازهٔ دو نیروی مغناطیسی و وزن وارد بر یک متر سیم باید برابر باشد:

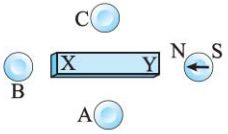
$$F_{\text{مغناطیسی}} = mg \Rightarrow BI\ell\sin\theta = mg$$

$$\xrightarrow{\theta=90^\circ} (0/05\times10^{-3})\times I\times1\times1 = (8\times10^{-3})\times10$$

$$\Rightarrow I = 1600\ A$$

پرسش های تستی

۱- شکل روبه‌رو، یک آهن‌ربای میله‌ای معمولی را نشان می‌دهد که در اطراف آن ۴ عقربهٔ مغناطیسی قرار دارند. جهت قرار گرفتن عقربه‌های A، B و C به ترتیب کدام است؟ (خارج ریاضی ۹۶)



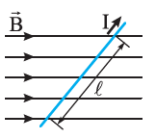
۱) ←، ← و →
۲) ←، ← و ←
۳) ←، → و →
۴) ←، ← و ←

۲- پروتونی تحت زاویهٔ 90° نسبت به یک میدان مغناطیسی یکنواخت به بزرگی $20\ mT$ حرکت می‌کند و نیروی مغناطیسی $1/28\times10^{-16}\ N$ به آن وارد می‌شود. انرژی جنبشی پروتون چند ژول است؟ (ریاضی ۹۵)

$(m_p = 1/7\times10^{-27}\ kg\ ,\ e = 1/6\times10^{-19}\ C)$

۱) 4×10^{-19}
۲) 8×10^{-19}
۳) $13/6\times10^{-19}$
۴) $27/2\times10^{-19}$

۳- در شکل زیر، میدان مغناطیسی به صورت افقی در جهت غرب به شرق است و مقدار آن ۵۰۰ گاوس است. سیم، افقی است و جریان $I = 25\ A$ در جهت شمال شرقی از آن عبور می‌کند. اگر $\ell = 80\ cm$ و زاویهٔ بین سیم و میدان 37° باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر این قسمت از سیم، چند نیوتون و به کدام جهت است؟ $(\sin 37^\circ = 0/6)$ (خارج تجربی ۹۶)

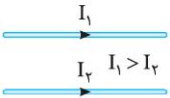


۱) ۰/۸، قائم رو به پایین
۲) ۰/۶، قائم رو به پایین
۳) ۰/۸، قائم رو به بالا
۴) ۰/۶، قائم رو به بالا

۴- یک الکترون مطابق شکل زیر، به موازات سیم دراز حامل جریان الکتریکی در حرکت است. در این لحظه نیروی الکترومغناطیسی وارد بر الکترون به کدام جهت است؟ (خارج تجربی ۸۷)

۱) $\odot$ ۲) $\otimes$ ۳) ↓ ۴) ↑

۵- در شکل زیر دو سیم بلند (۱) و (۲) موازی هم در این صفحه قرار دارند و بر هم نیروی الکترومغناطیسی وارد می‌کنند. اگر نیروی وارد بر هر متر سیم (۱)، $\vec{F}_1$ و نیروی وارد بر هر متر سیم (۲)، $\vec{F}_2$ باشد، $\vec{F}_1$ و $\vec{F}_2$ به ترتیب از راست به چپ در چه جهتی هستند و اندازهٔ آن‌ها چگونه است؟ (خارج ریاضی ۹۲)



۱) $F_1 = F_2, \uparrow, \downarrow$ ۲) $F_1 = F_2, \downarrow, \uparrow$

۳) $F_1 > F_2, \uparrow, \downarrow$ ۴) $F_1 < F_2, \downarrow, \uparrow$

۶- یکای μ_0 (تراوایی مغناطیسی خلأ) در SI کدام است؟ (خارج ریاضی ۹۷)

۱) $\frac{\text{تسلا} \times \text{متر}}{\text{آمپر}}$ ۲) $\frac{\text{آمپر} \times \text{تسلا}}{\text{متر}}$

۳) $\frac{\text{آمپر}}{\text{تسلا} \times \text{متر}}$ ۴) $\frac{\text{تسلا}}{\text{آمپر} \times \text{متر}}$

۷- از پیچهٔ مسطحی به شعاع ۱۰ سانتی‌متر که از ۲۵۰ دور سیم نازک درست شده است، جریان ۸ آمپر می‌گذرد. میدان مغناطیسی در مرکز پیچه چند گاوس است؟ $(\mu_0 = 12 \times 10^{-7} \frac{T.m}{A})$ (ریاضی ۹۱)

۱) ۰/۶ ۲) ۱/۲

۳) ۶۰ ۴) ۱۲۰

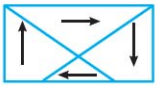
۸- طول سیم‌لوله‌ای $20\ cm$ است و دارای ۲۰۰ حلقه است که به صورت منظم پیچیده شده است. اگر از آن جریان الکتریکی ۵ آمپر عبور کند، میدان مغناطیسی در داخل آن چند گاوس می‌شود؟ $(\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \frac{T.m}{A})$ (تجربی ۹۳)

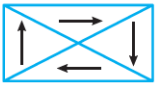
۱) 2π
۲) 4π
۳) 20π
۴) 40π

۹- تعداد حلقه‌های پیچهٔ مسطحی با تعداد حلقه‌های یک سیم‌لوله برابر است و از آن‌ها جریان الکتریکی یکسان می‌گذرد. اگر میدان مغناطیسی یکنواخت ایجادشده در داخل سیم‌لوله برابر با میدان مغناطیسی در مرکز پیچه باشد، طول سیم‌لوله چند برابر قطر پیچه است؟ (ریاضی ۹۴)

۱) ۱
۲) ۲
۳) $\frac{1}{2}$
۴) $\frac{1}{4}$

۱۰- کدام‌یک از شکل‌های زیر یک مادهٔ فرومغناطیس را وقتی در یک میدان مغناطیسی خارجی قوی قرار گرفته است، درست نشان می‌دهد؟ (خارج ریاضی ۹۳)

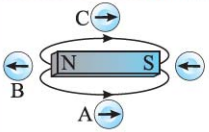
۱)


۲)


۳)

۴)

پاسخ پرسش‌های تستی



۱- گزینهٔ «۱» با توجه به جهت‌گیری عقربهٔ رسم‌شده، قطب‌ها و خطوط میدان اطراف آهن‌ربا به شکل روبه‌رو خواهند بود:

۲- گزینهٔ «۳» ابتدا سرعت حرکت پروتون را حساب می‌کنیم.

$$F = qvB\sin\theta \Rightarrow ۱/۲۸\times۱۰^{-۱۶} = (۱/۶\times۱۰^{-۱۹})\times v\times(۲۰\times۱۰^{-۳})\times۱$$

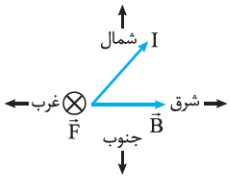
$$\Rightarrow v = ۴\times۱۰^{۴}\ m/s$$

حالا انرژی جنبشی پروتون را به دست می‌آوریم:

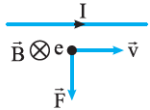
$$K = \frac{۱}{۲}mv^{۲} = \frac{۱}{۲}\times(۱/۷\times۱۰^{-۲۷})\times(۴\times۱۰^{۴})^{۲} = ۱۳/۶\times۱۰^{-۱۹}\ J$$

۳- گزینهٔ «۲» اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را به شکل زیر حساب می‌کنیم:

$$F = BI\ell\sin\theta = (۵۰۰\times۱۰^{-۴})\times۲۵\times\frac{۸}{۱۰}\times\frac{۶}{۱۰} = ۰/۶\ N$$



طبق قاعدهٔ دست راست، نیروی وارد بر سیم درون‌سو یعنی قائم رو به پایین است.



۴- گزینهٔ «۳» جهت میدان ناشی از سیم در محل الکترون درون‌سو است. طبق قاعدهٔ دست چپ!!! جهت نیروی وارد بر الکترون به شکل روبه‌رو است:

۵- گزینهٔ «۱» چون جریان عبوری از دو سیم هم‌سو است، دو سیم یکدیگر را جذب می‌کنند، پس $\vec{F}_1$ به سمت پایین و $\vec{F}_2$ به سمت بالا است. در درس‌نامه دیدید که $F_1 = F_2$ است.

۶- گزینهٔ «۱» در فرمول $B = \frac{\mu_0 NI}{\ell}$ به جای هر کمیت، یکای آن را قرار می‌دهیم:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\ell} \Rightarrow \mu_0 = \frac{B\ell}{NI}$$

$$\Rightarrow \mu_0 \text{ یکای } = \frac{T \times m}{A} = \frac{\text{متر} \times \text{تسلا}}{\text{آمپر}}$$

۷- گزینهٔ «۴» کافی است داده‌های مسئله را در فرمول زیر جای‌گذاری کنیم:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{(12 \times 10^{-7}) \times 250 \times 8}{2 \times (0/1)} = 12 \times 10^{-3} T = 120\, G$$

۸- گزینهٔ «۳» خیلی ساده!

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\ell} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 200 \times 5}{0/2} = 2\pi \times 10^{-3}\ T = 20\pi\, G$$

۹- گزینهٔ «۱» میدان‌های درون سیم‌لوله و مرکز پیچه را در دو طرف یک تساوی قرار می‌دهیم:

$$B_{\text{سیم‌لوله}} = B_{\text{پیچه}} \Rightarrow (\mu_0 \frac{N}{\ell} I)_{\text{سیم‌لوله}} = (\frac{\mu_0 NI}{2R})_{\text{پیچه}} \Rightarrow \ell = 2R$$

بنابراین طول سیم‌لوله با قطر پیچه برابر است.

۱۰- گزینهٔ «۱» در یک مادهٔ فرومغناطیس، در حضور میدان مغناطیسی حجم حوزه‌های مغناطیسی همسو با میدان خارجی زیاد می‌شود، اما تمام حوزه‌ها با میدان خارجی همسو نمی‌شوند.
بنابراین گزینهٔ (۱) درست است.

ضمائم

فرمول‌ها

فصل ۱

۱ بار الکتریکی:

$$q = \pm n e \qquad n = 0, 1, 2, \ldots$$

تعداد الکترون‌های گرفته‌شده یا از دست‌رفته

بار بنیادی (کولن: C) بار الکتریکی (کولن: C)

علامت +: اگر الکترون از دست رود، علامت −: اگر الکترون گرفته شود.

۲ رابطهٔ قانون کولن:

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2} \leftarrow \text{نیروی الکتریکی (نیوتون: N)}$$

بار الکتریکی دو ذره (کولن: C)

فاصلهٔ دو ذره (متر: m) $\rightarrow r^2$

۳ میدان الکتریکی حاصل از ذرهٔ باردار:

$$E = k\frac{|q|}{r^2} \leftarrow \text{میدان الکتریکی} \left(\frac{\text{نیوتون}}{\text{کولن}} : \frac{N}{C}\right)$$

بار الکتریکی ذره (کولن: C) $\rightarrow |q|$

فاصلهٔ نقطه تا ذره (متر: m) $\rightarrow r^2$

۴ نیروی وارد بر بار در میدان الکتریکی:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

نیروی الکتریکی (نیوتون: N)

میدان الکتریکی $\left(\frac{\text{نیوتون}}{\text{کولن}} : \frac{N}{C}\right)$ بار الکتریکی (کولن: C)

علامت بار الکتریکی باید لحاظ شود.

۵ کار انجام‌شده توسط میدان الکتریکی یکنواخت:

$$W_E = \pm E|q|d$$

- W_E: کار میدان (ژول: J)
- q: بار الکتریکی (کولن: C)
- d: جابه‌جایی بار در راستای میدان (متر: m)
- E: اندازهٔ میدان $\left(\frac{\text{نیوتون}}{\text{کولن}} : \frac{N}{C}\right)$

علامت +: بار در جهت نیروی میدان حرکت می‌کند.

علامت −: بار در خلاف جهت نیروی میدان حرکت می‌کند.

۶ تغییرات انرژی پتانسیل الکتریکی بار:

$$\Delta U_E = -W_E$$

- ΔU_E: تغییر انرژی پتانسیل بار (ژول: J)
- W_E: کار انجام‌شده توسط میدان (ژول: J)

۷ اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

- ΔV: اختلاف پتانسیل الکتریکی (ولت: V)
- ΔU: تغییرات انرژی پتانسیل الکتریکی (ژول: J)
- q: بار الکتریکی (کولن: C)

$$\Delta V = V_{\text{مقصد}} - V_{\text{مبدأ}}$$

علامت بار باید لحاظ شود.

بار انرژی بگیرید: $\Delta U > 0$، بار انرژی از دست دهد (آزاد شود): $\Delta U < 0$

۸ رابطهٔ اختلاف پتانسیل دو نقطه در میدان یکنواخت:

$$|\Delta V| = Ed$$

- ΔV: اختلاف پتانسیل (ولت: V)
- d: فاصلهٔ دو نقطه در راستای میدان (متر: m)
- E: اندازهٔ میدان یکنواخت $\left(\frac{\text{نیوتون}}{\text{کولن}} : \frac{N}{C}\right)$

۹ چگالی سطحی:

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

Q: بار الکتریکی (کولن: C)

A: مساحت (متر مربع: m^2)

σ: چگالی سطحی (کولن بر متر مربع: C/m^2)

یادتان باشد که مساحت کره از فرمول $A = 4\pi r^2$ به دست می‌آید.

۱۰ تعریف ظرفیت خازن:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Q: بار ذخیره‌شده در خازن (کولن: C)

V: اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ خازن (ولت: V)

C: ظرفیت خازن (فاراد: F)

ظرفیت خازن مقدار ثابتی است و با تغییر V و Q تغییر نمی‌کند.

۱۱ عوامل مؤثر بر ظرفیت خازن:

$$C = \kappa \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

C: ظرفیت خازن (فاراد: F)

A: مساحت صفحات (متر مربع: m^2)

d: فاصلهٔ دو صفحه (متر: m)

κ: ضریب دی‌الکتریک (κ یا k یکا ندارد.)

یادتان باشد که: $\kappa_{\text{خلأ}} = 1$ و $\kappa_{\text{هوا}} \simeq 1$ و $\kappa > 1$ عایق‌های دیگر

۱۲ میدان الکتریکی بین صفحات:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{Q}{\kappa \varepsilon_0 A}$$

V: اختلاف پتانسیل (ولت: V)

E: میدان الکتریکی ($\frac{\text{نیوتون}}{\text{کولن}}$: $\frac{N}{C}$)

Q: بار ذخیره‌شده (کولن: C)

A: مساحت صفحه‌ها (متر مربع: m^2)

κ: ضریب دی‌الکتریک (یکاندارد.)

d: فاصلهٔ دو صفحه (متر: m)