

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# فیزیک (۳) و آزمایشگاه

## سال سوم آموزش متوسطه

### رشته علوم تجربی

وزارت آموزش و پرورش  
سازمان پژوهش و برنامه ریزی آموزشی

برنامه ریزی محتوا و نظارت بر تألیف : دفتر برنامه ریزی و تألیف کتاب های درسی

نام کتاب : فیزیک (۳) و آزمایشگاه - ۲۵۶/۳

شورای برنامه ریزی و تألیف : احمد احمدی، اعظم پورقاضی، روح الله خلیلی بروجنی، ابوالقاسم زالپور،

سیدمهدی شیوائی، شیرین فراهانی، حسن عزیزی، غلامعلی محمودزاده و منصور وصالی

آماده سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : اداره کل چاپ و توزیع کتاب های درسی

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۹۲۶۶۰۸۸۳، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وبسایت: [www.chap.sch.ir](http://www.chap.sch.ir)

رسم : هدیه بندار

صفحه آرا : فائزه محسن شیرازی

طراح جلد : علیرضا رضائی کر

ناشر : شرکت چاپ و نشر کتاب های درسی ایران: تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

تلفن: ۵ - ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹

چاپخانه : شرکت افست «سهامی عام» ([www.Offset.ir](http://www.Offset.ir))

سال انتشار و نوبت چاپ : چاپ دوازدهم ۱۳۹۱

حق چاپ محفوظ است.

---

شابک ۵-۹۹۶-۰۵-۰۹۶۴ ISBN 964-05-0996-5

---



هر کاری را که انسان باورش این است که نسبت به آن کار ضعیف است، نمی‌تواند آن کار را انجام بدهد. . . . هر کشوری که اعتقادش این باشد که نمی‌تواند خودش صنعتی را ایجاد کند این ملت محکوم به این است که تا آخر نتواند، و این اساس نقشه‌هایی بوده است که برای ملل ضعیف دنیا قدرت‌های بزرگ کشیده‌اند.

امام خمینی

# فهرست

## پیشگفتار

۲	فصل ۱- الکتریسیته‌ی ساکن
۲	۱-۱- قانون کولن
۱۶	۲-۱- میدان الکتریکی
۱۸	۳-۱- تعریف کمی میدان الکتریکی
۱۹	۴-۱- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره‌ی باردار
۲۳	۵-۱- تجسم میدان الکتریکی
۲۴	۶-۱- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی
۲۵	۷-۱- توزیع بار الکتریکی در یک جسم
۳۱	۸-۱- انرژی پتانسیل الکتریکی
۳۳	۹-۱- اختلاف پتانسیل الکتریکی
۳۵	۱۰-۱- خازن
۳۷	۱۱-۱- ظرفیت خازن
۳۸	۱۲-۱- عامل‌های مؤثر بر ظرفیت خازن تخت
۴۲	۱۳-۱- انرژی خازن
۴۳	۱۴-۱- به هم بستن خازن‌ها
۴۹	تمرین‌های فصل اول
۵۳	فصل ۲- جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم
۵۳	۱-۲- جریان الکتریکی
۵۵	۲-۲- قانون اهم
۵۵	۳-۲- عوامل مؤثر در مقاومت رساناهای فلزی
۶۲	۴-۲- اثر دما بر مقاومت رساناهای فلزی
۶۴	۵-۲- محاسبه‌ی انرژی الکتریکی مصرف شده در یک مقاومت
۶۸	۶-۲- نیروی محرکه‌ی مولد

۶۹	۷-۲- مدارهای تک حلقه
۷۶	۸-۲- به هم بستن مقاومت ها
۸۴	۹-۲- قانون کیرشهف
۸۸	تمرین های فصل دوم
۹۲	<b>فصل ۳- مغناطیس</b>
۹۳	۱-۳- آهنربا
۹۷	۲-۳- میدان مغناطیسی
	۳-۳- تعریف میدان مغناطیسی با استفاده از نیروی وارد بر سیم حامل جریان
۱۰۱	در میدان مغناطیسی
۱۰۷	۴-۳- نیروی وارد بر ذره ی باردار متحرک در میدان مغناطیسی
۱۱۰	۵-۳- آثار مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی
۱۱۷	۶-۳- نیروی بین سیم های موازی حامل جریان
۱۲۰	۷-۳- خاصیت مغناطیسی مواد
۱۲۶	تمرین های فصل سوم
۱۳۲	<b>فصل ۴- القای الکترومغناطیسی</b>
۱۳۲	۱-۴- پدیده ی القای الکترومغناطیسی
۱۳۵	۲-۴- شار مغناطیسی
۱۳۷	۳-۴- قانون القای الکترومغناطیسی فارادی
۱۴۱	۴-۴- محاسبه ی جریان القایی
۱۴۳	۵-۴- خودالقایی
۱۵۰	۶-۴- انرژی ذخیره شده در القاگر
۱۵۱	۷-۴- جریان متناوب
۱۵۵	تمرین های فصل چهارم
۱۵۹	<b>واژه نامه ی فارسی - انگلیسی</b>
۱۶۱	<b>فهرست مراجع</b>

## پیشگفتار

در قرن بیست و یکم بشر وارد دوره‌ی جدیدی از توسعه‌ی علم و فناوری شده است. حجم اطلاعات علمی بشر طبق تخمین دانشمندان در چند سال آینده در هر چند ماه دو برابر می‌شود. شیوه‌های زندگی نیز به دنبال این تحولات در علم و تکنولوژی خیلی سریع تغییر می‌کنند. بنابراین نیازهای فردای دانش‌آموزان امروز برای ما خیلی آشکار نیست. به دنبال این تحولات شیوه‌های آموزش علوم (فیزیک) به تبع نیازهای مجهول آینده فرزندانمان تغییر چشمگیری در جهان داشته است. در این شیوه‌ها تلاش زیادی می‌شود تا دانش‌آموز «چگونگی آموختن» را بیاموزد و مهارت برخورد با مطلب یا مسئله جدید و طی مراحل‌ی که منجر به حل آن مسئله می‌شود را فرا گیرد.

کتاب فیزیک (۳) و آزمایشگاه براساس روش فعال تألیف شده است. یعنی دانش‌آموز در ساخت مفاهیم نقش دارد و نقش دبیران محترم، طرح مسئله و سپس راهنمایی دانش‌آموزان برای رسیدن به حل مسئله است. در این کتاب سعی شده سه هدف نگرشی، دانشی و مهارتی مورد توجه کامل قرار گیرد و حجم و تعداد مفاهیم با توجه به اختصاصی بودن درس برای دانش‌آموزان رشته علوم ریاضی و تجربی انتخاب شده است.

انتظار می‌رود همکاران گرامی با تکیه بر تجربه و توانایی‌های خود، فعالیت یا آزمایشی را که در یادگیری می‌تواند کمک کند طراحی کرده و دانش‌آموزان را بر انجام آن‌ها ترغیب کنند و از آنان بخواهند که نتایج آن فعالیت‌ها را در دفتر گزارش کار خود ثبت کنند. این دفتر و عملکرد دانش‌آموزان در حین انجام فعالیت می‌تواند به عنوان یکی از ملاک‌های ارزشیابی مورد توجه

قرار گیرد. لازم به تذکر است که عناوین و مباحث این کتاب براساس سن دانش‌آموزان و زمان تخصیص داده به این درس تدارک دیده شده است و همکاران محترم بایستی از پیرایه‌های اضافی به این مباحث، پرهیزند.

گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی همواره از دریافت نظرهای ارزشمند دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان جهت رفع نارسایی‌ها و لغزش‌های احتمالی به گرمی استقبال می‌کند. نظرهای اصلاحی خود را به نشانی تهران - صندوق پستی ۱۵۸۵۵/۳۶۳ - گروه فیزیک و یا نشانی الکترونیک [physics-dept@talif.sch.ir](mailto:physics-dept@talif.sch.ir) ارسال نمایید.

گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی

<http://physics-dept.talif.sch.ir>





شکل بالا یک مولد وان دوگراف را در موزه‌ی علوم بوستون نشان می‌دهد. این مولد یک تخلیه‌ی الکتریکی عظیم ایجاد می‌کند. اما همان‌طور که در شکل دیده می‌شود شخص درون قفس فلزی (اتاقک فارادی) از اثرهای این تخلیه حفاظت شده است.

## الکتریسیته ی ساکن

در کتاب‌های علوم دوره ی راهنمایی و نیز کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، با بارالکتریکی و نحوه ی باردار کردن اجسام آشنا شدید و آموختید که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد. بار الکترون را بار منفی و بار پروتون را مثبت نام‌گذاری کرده‌اند. علاوه بر این، دیدید که بار الکتریکی به وجود نمی‌آید و نیز از بین نمی‌رود و فقط از یک جسم به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این بیان، پایداری بار الکتریکی گفته می‌شود. هم‌چنین آموختید اجسام باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. این نیروها ممکن است رانشی یا رانشی باشند. بیش‌تر نیروهایی که شما با آن‌ها آشنا هستید و با آن‌ها سرو کار دارید، منشأ الکتریکی دارند. به کمک این نیروها می‌توان ساختار اجسام، پیوند بین ذره‌ها و بسیاری از پدیده‌هایی را که در طبیعت رخ می‌دهند، توصیف کرد. دامنه ی کاربرد دانش الکتریسیته در فناوری و صنعت به قدری گسترده است که نیازی به بیان ندارد.

در این فصل، ضمن یادآوری مطالبی که قبلاً آموخته‌اید، به شرح و توصیف دقیق‌تر کمیت‌های الکتریکی و رابطه ی بین آن‌ها می‌پردازیم.

### ۱-۱- قانون کولن

همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندید، دو جسم باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. نیرویی که دو جسم باردار بر یک‌دیگر وارد می‌کنند، نیروی الکتریکی نام دارد. نیروهای الکتریکی ممکن است رانشی (جاذبه‌ای) یا رانشی (دافعه‌ای) باشند. دیدیم که اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، یعنی هر دو مثبت یا هر دو منفی باشند، نیروهای بین دو جسم، رانشی است. در حالی که اگر بار الکتریکی یک جسم مثبت و بار الکتریکی دیگری منفی باشد، نیروی الکتریکی بین دو جسم، رانشی خواهد بود.

نیروی الکتریکی بین دو جسم، به چه عامل‌هایی بستگی دارد و اندازه ی این نیروها را از چه رابطه‌ای می‌توان محاسبه کرد؟

شارل کولن، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای



توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آن‌ها بستگی دارند، شناسایی کند. شما هم می‌توانید با انجام دادن آزمایش‌های ساده‌ای، با این عامل‌ها آشنا شوید.

## آزمایش ۱-۱

وسایلهای آزمایش: میله‌ی پلاستیکی – پارچه‌ی پشمی – ورقه‌ی نازک آلومینیومی و مقداری نخ خشک

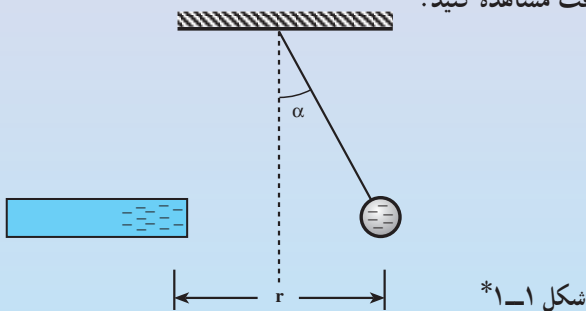
شرح آزمایش:

۱- کمی ورقه‌ی آلومینیومی را فشرده کنید و آن را به‌صورت کره‌ی کوچکی در آورید. این کره‌ی کوچک را به کمک یک تکه نخ خشک آویزان کنید. این وسیله را آونگ الکتریکی می‌نامیم و از آن در آزمایش‌های الکتریسته‌ی ساکن استفاده می‌کنیم.

۲- به آونگ الکتریکی به روش القا یا با تماس به جسمی که بار منفی دارد، بار الکتریکی منفی بدهید.

۳- میله را باردار کرده و آن را به آونگ الکتریکی نزدیک کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟

۴- میله را در فاصله‌ی معینی از آونگ و نزدیک آن نگاه دارید و زاویه‌ی انحراف آونگ را از وضع قائم با دقت مشاهده کنید.



۵- مرحله‌ی ۴ را تکرار کنید و هر بار فاصله‌ی میله را از آونگ تغییر دهید. مراقب باشید که در مراحل ۴ و ۵، میله با آونگ تماس پیدا نکند. نتیجه‌ی آزمایش را بنویسید و به کلاس گزارش دهید.

\* اجسام باردار با بار منفی را، با رنگ آبی و با بار مثبت را با رنگ قرمز نشان می‌دهیم.

کولن نیز با انجام دادن آزمایش و اندازه‌گیری‌های دقیق به این نتیجه رسید که :  
نیروهای الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار با مجذور فاصله‌ی آن‌ها از یک‌دیگر نسبت

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

وارون دارد؛ یعنی :

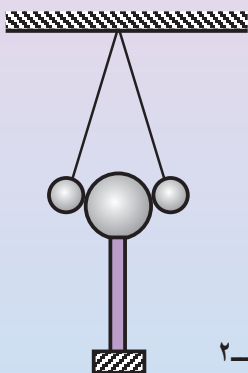
برای آن‌که معلوم شود نیروی الکتریکی به چه عامل یا عامل‌های دیگری بستگی دارد،  
آزمایش ۱-۲ را انجام دهید.

## آزمایش ۱-۲

وسيله‌های آزمایش: برای انجام دادن این آزمایش، علاوه بر وسیله‌های آزمایش  
۱-۱ به دو کره‌ی فلزی کوچک و هم‌اندازه که روی پایه‌های عایق نصب شده باشند، نیاز  
دارید.

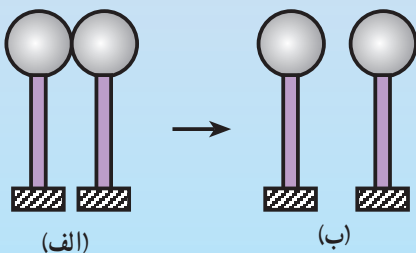
شرح آزمایش:

- ۱- دو آونگ الکتریکی کاملاً مشابه بسازید و آن‌ها را از یک نقطه آویزان کنید.
- ۲- یک کره را باردار کنید و آن را هم‌زمان به دو آونگ تماس دهید. سپس آن  
را از آونگ‌ها دور کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟ زاویه‌ی  
بین دو نخ آونگ‌ها را بعد از دور شدن کره‌ی فلزی  
اندازه‌گیری کنید.



شکل ۱-۲

- ۳- کره‌ی دیگر را که بدون بار است به کره‌ی باردار تماس دهید و آن‌ها را از  
یک‌دیگر جدا کنید. با انجام دادن این عمل، بار الکتریکی به‌طور مساوی بین دو کره  
تقسیم می‌شود.



شکل ۱-۳

۴- ابتدا با تماس دست به آونگ‌ها، بار آن‌ها را تخلیه کنید. سپس یکی از کره‌های باردار را مانند مرحله‌ی ۲ به دو آونگ تماس دهید. این بار نیز زاویه‌ی بین دو آونگ را اندازه‌گیری کنید.

۵- نتیجه‌ی مرحله‌های ۲ و ۴ را با یک‌دیگر مقایسه کنید. نتیجه را بنویسید و به کلاس گزارش دهید.

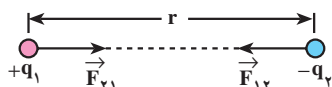
کولن نیز با انجام دادن آزمایش و اندازه‌گیری‌های دقیق به این نتیجه رسید که : نیروی الکتریکی با حاصل ضرب اندازه‌ی بار دو ذره نسبت مستقیم دارد ؛ یعنی :

$$F \propto q_1 \cdot q_2$$

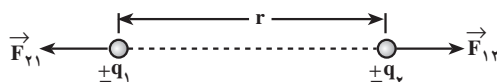
کولن، نتیجه‌ی آزمایش‌های خود را که امروزه به نام قانون کولن شناخته شده است ، به صورت زیر بیان کرد :

نیروی الکتریکی ربایشی یا رانشی بین دو ذره‌ی باردار  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله‌ی  $r$  از یک‌دیگر قرار دارند، با حاصل ضرب بار دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصله‌ی دو ذره از یک‌دیگر نسبت وارون دارد.

$$F \propto \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$



(ب) نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی غیرهمنام، ربایشی است.



(الف) نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی همنام، رانشی است.

#### شکل ۴-۱

در شکل ۴-۱ به معنای نیروی است که ذره‌ی اول به ذره‌ی دوم وارد می‌کند و  $\vec{F}_{21}$  نیروی است که ذره‌ی دوم به ذره‌ی اول وارد می‌کند.

نیروهای الکتریکی که دو ذره‌ی باردار به یک‌دیگر وارد می‌کنند، هم‌اندازه و در جهت‌های مخالف یک‌دیگرند (قانون سوم نیوتون). اگر اندازه‌ی این نیروها را با  $F$  نشان دهیم، داریم :

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$

قانون کولن را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (۱-۱)$$

در این رابطه،  $q_1$  و  $q_2$  برحسب کولن،  $r$  برحسب متر و  $F$  برحسب نیوتون است.  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

ضریب تناسب است که در آن ضریب  $\epsilon_0$  یک ثابت جهانی است و ضریب گذردهی الکتریکی خلأ نام دارد.

$$\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N.m^2}$$

برای سادگی در نوشتن، می توان ضریب قانون کولن را با نماد  $k$  نشان داد.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \frac{N.m^2}{C^2}$$

به کمک قانون کولن (رابطه ی ۱-۱) می توان اندازه ی نیروی الکتریکی ای را که دو ذره ی باردار به یک دیگر وارد می کنند، محاسبه کرد. در محاسبه ها، علامت مثبت یا منفی بارهای الکتریکی را در رابطه ی ۱-۱ وارد نمی کنیم و ربایشی یا رانشی بودن نیروها را به کمک نوع بارها مشخص می کنیم.

### مثال ۱-۱

دو ذره با بارهای الکتریکی  $q_1 = 2\mu C$  و  $q_2 = 5\mu C$  در فاصله ی ۳cm از یک دیگر ثابت شده اند. اندازه ی نیرویی که دو ذره به یک دیگر وارد می کنند و نوع آن را مشخص کنید.

حل: با استفاده از رابطه ی ۱-۱ داریم:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{(2 \times 10^{-6}) \cdot (5 \times 10^{-6})}{9 \times 10^{-4}}$$

$$F = 100N$$

چون بارهای الکتریکی دو ذره همنام اند، نیرویی که دو ذره به یک دیگر وارد می کند، رانشی است.

اگر تعدادی ذره ی باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برآیند نیروهایی است که هر یک از ذره های دیگر در غیاب سایر ذره ها، بر آن ذره وارد می کنند.

## مثال ۲-۱

سه ذره با بارهای الکتریکی  $q_1 = 2/5 \mu C$ ،  $q_2 = 1 \mu C$  و  $q_3 = 4 \mu C$  در نقطه‌های A و B و C مطابق شکل ۱-۵ ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی وارد بر  $q_3$  را محاسبه کنید.  $AC = 6 \text{ cm}$  و  $BC = 2 \text{ cm}$ .



شکل ۱-۵

**حل:** نیرویی که بر  $q_3$  وارد می‌شود، برآیند دو نیرویی است که از طرف  $q_1$  و  $q_2$  بر آن وارد می‌شوند. برای محاسبه‌ی این نیرو، نیرویی را که هریک از بارهای  $q_1$  و  $q_2$  در غیاب دیگری، بر  $q_3$  وارد می‌کند، محاسبه می‌کنیم. نیروی الکتریکی وارد بر  $q_3$ ، برآیند این دو نیروست (شکل ۱-۶). با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱ داریم:

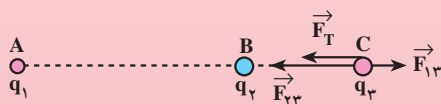
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \times \frac{2/5 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{13} = 25 \text{ N} \quad \text{نیرویی که } q_1 \text{ بر } q_3 \text{ وارد می‌کند، رانشی است.}$$

$$F_{23} = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 4 \times 10^{-12}}{4 \times 10^{-4}}$$

$$F_{23} = 90 \text{ N} \quad \text{نیرویی که } q_2 \text{ بر } q_3 \text{ وارد می‌کند، ربایشی است.}$$



شکل ۱-۶

مطابق شکل ۱-۶ نیروهای  $F_{13}$  و  $F_{23}$  در جهت‌های مخالف یکدیگرند. اندازه‌ی برآیند آن‌ها،  $F_T$ ، برابر تفاضل اندازه‌های آن‌ها و در جهت نیروی بزرگ‌تر (در جهت  $F_{23}$ ) است.

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{23} + \vec{F}_{13}$$

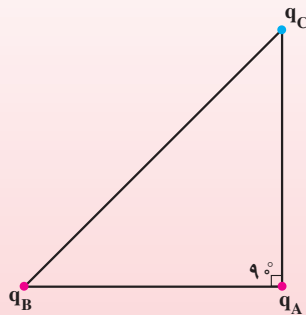
$$F_T = F_{23} - F_{13} = 65 \text{ N}$$

## تمرین ۱-۱

در مثال ۲-۱، نیروی وارد بر  $q_1$  را به دست آورید.

## مثال ۳-۱

سه ذره‌ی باردار مطابق شکل ۷-۱ در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ی  $ABC$  ثابت شده‌اند. بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر ذره‌ی باردار واقع در رأس زاویه‌ی قائمه را محاسبه کنید؛ در صورتی که  $q_A = 2\mu C$ ،  $q_B = 4\mu C$ ،  $q_C = 4\mu C$ ،  $AB = 3\text{ cm}$  و  $AC = 2\sqrt{3}\text{ cm}$  باشد.



شکل ۷-۱

**حل:** نیروی بین  $q_A$  و  $q_B$  را نشتی و بین  $q_A$  و  $q_C$ ، ربایشی است. با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱ داریم:

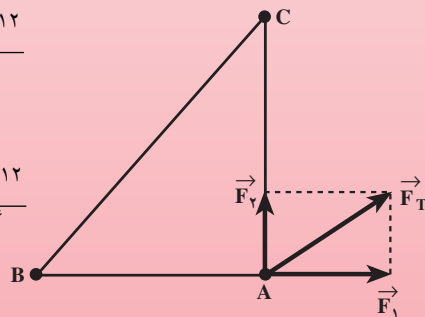
$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F_{BA} = F_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 2 \times 10^{-12}}{9 \times 10^{-4}}$$

$$F_1 = 8 \text{ N}$$

$$F_{CA} = F_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 2 \times 10^{-12}}{12 \times 10^{-4}}$$

$$F_2 = 6 \text{ N}$$



شکل ۸-۱



نیروهای  $\vec{F}_1$  و  $\vec{F}_2$  در شکل ۸-۱ نشان داده شده‌اند. این دو نیرو بر یک دیگر عمودند و  $\vec{F}_T$  برآیند آن‌هاست. داریم :

$$\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$F_T^2 = F_1^2 + F_2^2$$

$$F_T^2 = (3)^2 + (4)^2$$

$$F_T = 5 \text{ N}$$

## یادداشت ریاضی

برای حل کردن مسأله‌های فیزیک به محاسبه‌هایی نظیر محاسبه‌های برداری نیازمندیم که شما در کتاب‌های ریاضی سال‌های گذشته با آن‌ها آشنا شده‌اید. در این جا این محاسبه‌ها را صرفاً جهت حل مسأله‌های فیزیکی آورده‌ایم و جزء درس فیزیک منظور نمی‌شوند.

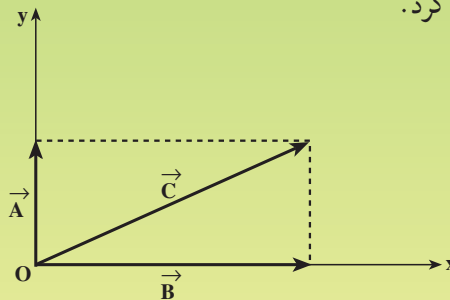
در کتاب ریاضی سال سوم راهنمایی و کتاب ریاضی ۲ دبیرستان با مؤلفه‌های یک بردار روی محورهای مختصات و نیز نمایش یک بردار بر حسب مؤلفه‌ها و بردارهای یکّه و نیز محاسبه‌های برداری به کمک بردارهای یکّه آشنا شدید. در این جا با نحوه‌ی استفاده از آن‌ها در مبحث‌های فیزیک آشنا می‌شوید. مرور این مبحث، از کتاب ریاضی ۲ شما را در حل مسأله‌های فیزیکی یاری می‌دهد.

### مؤلفه‌های یک بردار روی محورهای مختصات

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در محاسبه‌ها می‌توان به جای دو بردار، مثلاً بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  در شکل ۱-۹- برآیند آن‌ها، یعنی بردار  $\vec{C}$  را جایگزین کرد.

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$$

$$C^x = A^x + B^x$$



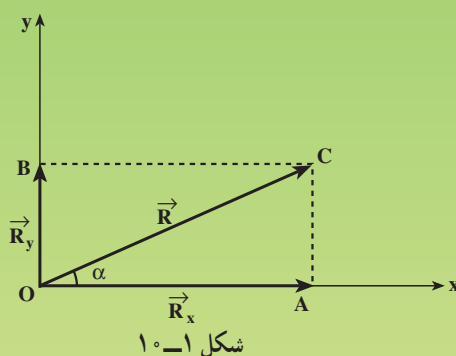
شکل ۱-۹- بردار  $\vec{C}$  برآیند بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  است.

به‌طور وارون و هر جا که مناسب باشد، می‌توان به جای بردار  $\vec{C}$ ، دو بردار  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  را به کار برد. در این صورت، به بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$ ، مؤلفه‌های بردار  $\vec{C}$  در امتداد محورهای  $x$  و  $y$  گفته می‌شود.

معمولاً مؤلفه‌ی یک بردار روی یک محور را با نام آن بردار و زیرنویس نام

محور، مشخص می‌کنند؛ مثلاً مؤلفه‌ی بردار  $\vec{C}$  در راستای محور  $x$  را  $\vec{C}_x$  و مؤلفه‌ی آن در راستای محور  $y$  را  $\vec{C}_y$  می‌نامیم.

برای تعیین مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور  $x$  و  $y$  به روش زیر عمل می‌کنیم. مطابق شکل ۱-۱ از انتهای بردار  $\vec{R}$ ، خط‌هایی موازی هر یک از دو محور  $Ox$  و  $Oy$  رسم می‌کنیم تا محورها را در نقطه‌های  $A$  و  $B$  قطع کنند. بردارهای  $\vec{OA}$  و  $\vec{OB}$  مؤلفه‌های بردار  $\vec{R}$  روی دو محورند که آن‌ها را  $\vec{R}_x$  و  $\vec{R}_y$  می‌نامیم.



اگر زاویه‌ی  $\vec{R}$  با محور  $x$  برابر  $\alpha$  باشد، اندازه‌ی مؤلفه‌های آن روی دو محور به روش زیر محاسبه می‌شود.

$$\cos \alpha = \frac{R_x}{R}$$

$$R_x = R \cos \alpha \quad (۲-۱)$$

$$\sin \alpha = \frac{R_y}{R}$$

$$R_y = R \sin \alpha \quad (۳-۱)$$

مثال ۱: بردار  $\vec{A}$  به بزرگی ۵ واحد با محور  $x$  زاویه‌ی  $۳۷^\circ$  درجه می‌سازد. اندازه‌ی مؤلفه‌های آن را روی محورهای  $x$  و  $y$  به دست آورید.  
حل: با استفاده از رابطه‌های ۲-۱ و ۳-۱ داریم:

$$A_x = A \cos \alpha$$

$$A_x = ۵ \cos ۳۷^\circ$$

$$A_x = 5 \times 0.8 = 4 \text{ واحد}$$

$$A_y = A \sin \alpha$$

$$A_y = 5 \sin 37^\circ$$

$$A_y = 5 \times 0.6 = 3 \text{ واحد}$$

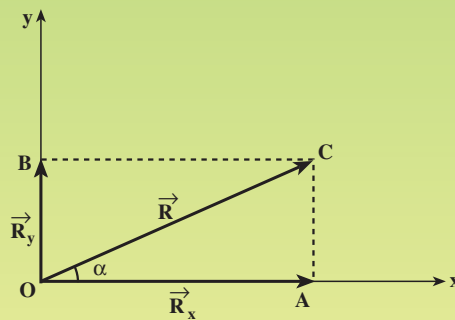
به طور وارون، با معلوم بودن اندازه‌ی مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور  $x$  و  $y$ ، می‌توان اندازه و جهت بردار را معلوم کرد. جهت هر بردار را با تعیین زاویه‌ی آن بردار با جهت محور  $x$  مشخص می‌کنیم.

مثال ۲: بزرگی مؤلفه‌های بردار  $\vec{R}$  روی محورهای  $x$  و  $y$  مطابق شکل ۱۱-۱ به ترتیب برابر ۸ و  $13/9$  واحد است. بزرگی این بردار و زاویه‌ی آن با محور  $x$  (جهت بردار  $\vec{R}$ ) را تعیین کنید.

حل: با استفاده از شکل ۱۱-۱ در مثلث قائم‌الزاویه‌ی  $OAC$ ، داریم:

$$\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_y \quad (4-1)$$

$$R = (\vec{R}) = (\vec{R}_x + \vec{R}_y) \rightarrow R = 16 \text{ واحد}$$



شکل ۱۱-۱

اگر در شکل ۱۱-۱ تانژانت زاویه‌ی  $\alpha$  را حساب کنیم، نتیجه می‌شود:

$$\tan \alpha = \frac{R_y}{R_x} \quad (5-1)$$

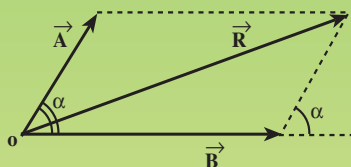
$$\tan \alpha = \frac{13/9}{8} \approx 1/73$$

$$\alpha \approx 6^\circ$$

## محاسبه‌ی برآیند دو بردار به روش متوازی‌الاضلاع

محاسبه‌ی برآیند بردارها به روش متوازی‌الاضلاع، روش ساده‌ای است برای محاسبه‌ی اندازه‌ی برآیند و نیز مشخص کردن جهت برآیند دو بردار که در یک صفحه قرار دارند. این نوع محاسبه، در فیزیک کاربرد فراوان دارد.

این روش، در واقع همان روش ترسیمی (چند ضلعی) است. همان‌گونه که شکل ۱۲-۱ نشان می‌دهد، ابتدا دو بردار را از یک نقطه رسم می‌کنیم. این دو بردار را دو ضلع یک متوازی‌الاضلاع می‌گیریم و متوازی‌الاضلاع را با رسم دو ضلع دیگر آن کامل می‌کنیم. آن قطر متوازی‌الاضلاع که از محل تلاقی دو بردار می‌گذرد، نشان‌دهنده‌ی برآیند دو بردار است.



شکل ۱۲-۱- برآیند دو بردار، منطبق بر قطر متوازی‌الاضلاع است که روی دو بردار ساخته می‌شود.

اگر زاویه‌ی بین دو بردار برابر  $\alpha$  باشد، اندازه‌ی برآیند از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned}\vec{R} &= \vec{A} + \vec{B} \\ R^2 &= A^2 + B^2 + 2A \cdot B \cdot \cos \alpha\end{aligned}\quad (۶-۱)$$

**مثال ۳:** برآیند دو بردار به بزرگی ۳ و ۵ واحد را که با یک‌دیگر زاویه‌ی  $60^\circ$  درجه می‌سازند، محاسبه کنید.

**حل:** با استفاده از رابطه‌ی ۶-۱ داریم:

$$\begin{aligned}R^2 &= A^2 + B^2 + 2A \cdot B \cdot \cos \alpha \\ R^2 &= 9 + 25 + 2 \times 3 \times 5 \cos 60^\circ \\ R^2 &= 49 \\ R &= 7 \text{ واحد}\end{aligned}$$

در حالت خاصی که دو بردار  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  هم‌اندازه باشند، رابطه‌ی ۶-۱ به صورت

زیر ساده می شود.

$$A = B \rightarrow R^2 = 2A^2(1 + \cos \alpha)$$

در درس ریاضی دیده اید که « $2 \cos^2 \frac{\alpha}{2} = 1 + \cos \alpha$ » است. در نتیجه، خواهیم

داشت :

$$R^2 = 2A^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$R = 2A \cos \frac{\alpha}{2}$$



اکنون به مثال‌های دیگری از نیروهای الکتریکی توجه کنید.

### مثال ۴-۱

سه ذره ی باردار، مطابق شکل ۱۳-۱ در سه رأس مثلث متساوی‌الاضلاعی به ضلع ۶cm ثابت شده‌اند. بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر بار  $q_3$  را محاسبه کنید.  
**حل:** نیروهای وارد بر بار  $q_3$  و برآیند این نیروها در شکل ۱۴-۱ نشان داده شده است. با استفاده از رابطه ی ۱-۱ داریم :

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \times \frac{2/5 \times 10^{-8} \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{13} = 5N \text{ رایشی}$$

$$F_{23} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-8} \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{23} = 8N \text{ رانشی}$$

اکنون با استفاده از رابطه ی ۱-۶، برآیند دو نیرو را حساب می‌کنیم.

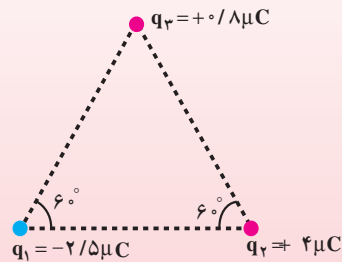
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$$

$$F_T^2 = F_{13}^2 + F_{23}^2 + 2F_{13} \cdot F_{23} \cdot \cos \alpha$$

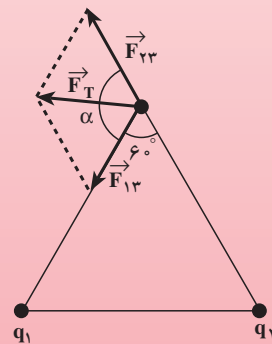
$$\alpha = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$$

$$F_T^2 = 25 + 64 + 2 \times 5 \times 8 \times \cos 120^\circ$$

$$F_T^2 = 49 \rightarrow F_T = 7N$$



شکل ۱۳-۱



شکل ۱۴-۱

### تمرین ۲-۱

نیروهای وارد بر بارهای الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  را در مثال ۴-۱ محاسبه کنید.

رابطه ی ۱-۱ برای محاسبه ی نیروی الکتریکی بین دو ذره ی باردار به کار می رود. محاسبه ی نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار به چگونگی آرایش (یا توزیع) بار در دو جسم بستگی دارد و محاسبه ی آن نیازمند ریاضیات پیشرفته تری است. در این کتاب، همواره نیروهای بین دو ذره ی باردار را محاسبه می کنیم. روشن است که اگر فاصله ی جسم باردار از ذره ی باردار (یا جسم باردار دیگر) آن قدر زیاد باشد که ابعاد جسم در مقابل فاصله ی بین آن ها قابل چشم پوشی باشد، می توان جسم را مانند یک ذره ی باردار در نظر گرفت و از رابطه ی ۱-۱ برای محاسبه ی نیروی الکتریکی استفاده کرد.

### فعالیت ۱-۱

اکنون که با قانون کولن و محاسبه ی نیروی الکتریکی آشنا شده اید، شایسته است آزمایش های کولن و چگونگی کار او را بیش تر بشناسید. در سال ۱۷۸۰ میلادی شارل کولن، دانشمند فرانسوی، با استفاده از وسیله ای که «ترازوی پیچشی» نام دارد، آزمایش هایی انجام داد. نتیجه ی آن ها به بیان قانون کولن منجر شد. در مورد آزمایش های کولن تحقیق کنید و شرح آزمایش ها و نتیجه گیری های او را به کلاس گزارش دهید.

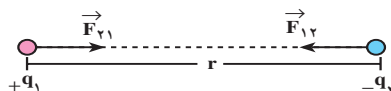


شکل ۱-۱۵- ترازوی پیچشی کولن

### ۱-۲- میدان الکتریکی

در بخش ۱-۱ دیدید که دو بار الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله ی  $r$  از یک دیگر واقع اند (شکل ۱-۱۶)، بر هم نیروی الکتریکی وارد می کنند. اگر دو آهن ربا در فاصله ی کمی از یک دیگر قرار گیرند، بر هم نیرو وارد می کنند. زمین و

خورشید نیز با وجود آن که میلیون‌ها کیلومتر از یک‌دیگر دورند، بر هم نیروی جاذبه‌ی گرانشی وارد می‌کنند.

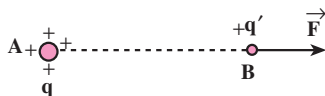


شکل ۱۶-۱ دو بار الکتریکی از فاصله‌ی  $r$  بر هم نیرو وارد می‌کنند.

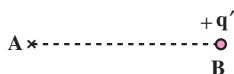
## فعالیت ۲-۱

- ۱- یک آونگ الکتریکی بسازید و آن را از نقطه‌ای بیاویزید.
- ۲- آونگ را به روش القای الکتریکی یا تماس با جسم باردار دیگری باردار کنید.
- ۳- به یک میله‌ی پلاستیکی (یا شیشه‌ای) به کمک مالش با پارچه پشمی (یا ابریشمی) بار الکتریکی بدهید.
- ۴- میله را بدون تماس با آونگ از جهت‌های مختلف به آونگ نزدیک کنید و نتیجه‌ی آنچه را که مشاهده می‌کنید، به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید کره‌ی باردار کوچکی با بار  $+q$  مطابق شکل ۱۷-۱ در نقطه‌ی A قرار دارد. اگر ذره‌ای با بار الکتریکی  $+q'$  را در نقطه‌ی B قرار دهیم، از طرف بار  $+q$  بر آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌شود (می‌دانید که بار  $q'$  نیز بر بار  $q$  نیرو وارد می‌کند که واکنش نیروی  $\vec{F}$  است اما در شکل نشان داده نشده است).

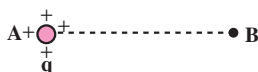


شکل ۱۷-۱



شکل ۱۸-۱

اکنون به این پرسش و نیز پاسخ آن بیندیشید: «اگر کره‌ی باردار  $q$  را از نقطه‌ی  $A$  برداریم (شکل ۱۸-۱) آیا در نقطه‌ی  $B$  بر بار  $q'$  نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟ پاسخ شما چیست؟ آیا قبول دارید که وجود بار  $q$  در نقطه‌ی  $A$  باعث می‌شود که بر بار  $q'$  در نقطه‌ی  $B$  نیروی الکتریکی وارد شود؟ آیا می‌توانیم بگوییم که وقتی بار  $q$  را در نقطه‌ی  $A$  قرار می‌دهیم، در نقطه‌ی  $B$  خاصیتی ایجاد می‌شود که اگر بار  $q$  در  $A$  نباشد، این خاصیت نیز در  $B$  وجود نخواهد داشت؟ آیا وجود بار  $q$  در نقطه‌ی  $A$ ، این خاصیت را فقط در نقطه‌ی  $B$  ایجاد کرده است یا اگر بار  $q'$  را در هر نقطه‌ی دیگری در مجاورت نقطه‌ی  $A$  قرار دهیم، باز هم بر آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟ مثلاً در فعالیتی که انجام دادید، اگر آونگ الکتریکی باردار را در هر نقطه‌ای مجاور میله‌ی باردار قرار دهید، آیا به آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟



شکل ۱۹-۱

با توجه به آنچه گفته شد، یک بار الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف خود، خاصیتی ایجاد می‌کند که به آن میدان الکتریکی می‌گویند. اگر یک بار الکتریکی را در نقطه‌ای از میدان الکتریکی قرار دهیم، از طرف میدان بر آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود. میدان الکتریکی به طور کمی در بخش ۳-۱ تعریف شده است.

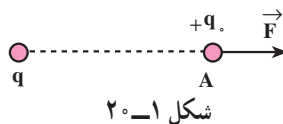
### ۳-۱- تعریف کمی میدان الکتریکی

میدان الکتریکی به طور کمی را به کمک نیرویی که میدان بر یک بار الکتریکی واقع در میدان وارد می‌کند، به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

نیروی وارد بر یکای بار الکتریکی مثبت را در هر نقطه، میدان الکتریکی در آن نقطه می‌نامیم.

اگر بار الکتریکی نقطه‌ای  $+q$  مطابق شکل ۲۰-۱ در میدان الکتریکی حاصل از بار  $q$  قرار گیرد، از طرف میدان حاصل از بار  $q$  بر آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌شود. بر اساس تعریف بالا، میدان بار  $q$  در محل قرار گرفتن بار  $+q$  که آن را با نماد  $\vec{E}$  نشان می‌دهیم، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{+q} \quad (۷-۱)$$



شکل ۱-۲۰

میدان الکتریکی کمیتی برداری است و در محاسبه‌ها باید به این نکته توجه کرد. یکای میدان الکتریکی، نیوتون بر کولن ( $\frac{N}{C}$ ) نام دارد.

### مثال ۱-۵

بر بار الکتریکی  $+2 \mu C$  در یک نقطه از میدان بار  $q$ ، نیروی  $5 \times 10^{-2} N$  وارد می‌شود. اندازه‌ی میدان الکتریکی را در این نقطه محاسبه کنید.  
 حل: از رابطه‌ی ۱-۷ می‌توان اندازه‌ی میدان الکتریکی را محاسبه کرد.

$$E = \frac{F}{q_0}$$

$$E = \frac{5 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-7}}$$

$$E = 2.5 \times 10^5 \frac{N}{C}$$

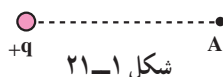
### ۱-۴- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره‌ی باردار

می‌خواهیم میدان الکتریکی حاصل از بار ذره‌ای  $q$  را در نقطه‌ی  $A$  که به فاصله‌ی  $r$  از بار  $q$  است، محاسبه کنیم (شکل ۱-۲۱). برای این محاسبه از رابطه‌ی ۱-۷ استفاده می‌کنیم. اگر بار ذره‌ای  $+q_0$  در نقطه‌ی  $A$  قرار گیرد، از طرف بار  $q$  به آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌شود. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی  $F$  را محاسبه می‌کنیم و با جای‌گذاری در رابطه‌ی ۱-۷، بزرگی میدان الکتریکی بار  $q$  را در نقطه‌ی  $A$  به دست می‌آوریم.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_0}{r^2}$$

$$E = \frac{F}{q_0}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$



شکل ۱-۲۱

(۱-۸)

رابطه‌ی ۱-۸ عامل‌های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از بار ذره‌ای  $q$  را مشخص

می‌کند. بنابراین رابطه، میدان با اندازه‌ی بار  $q$  نسبت مستقیم و با مجذور فاصله از آن، نسبت وارون دارد.

برای مشخص کردن جهت بردار میدان در یک نقطه — مثلاً نقطه‌ی A در شکل ۱-۲۱، فرض می‌کنیم که بار الکتریکی مثبتی را در آن نقطه قرار داده‌ایم. میدان در آن نقطه، در جهت نیروی وارد بر این بار فرضی خواهد بود. بنابراین، میدان الکتریکی در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت واقع در آن نقطه است.

## مثال ۱-۶

بزرگی میدان الکتریکی بار ذره‌ای  $2\mu\text{C}$  را در نقطه‌ی M به فاصله‌ی الف)  $2\text{ mm}$  و ب)  $20\text{ cm}$  از این بار الکتریکی محاسبه کنید و بردار میدان را در این نقطه برای یک حالت رسم کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱-۸ اندازه‌ی میدان را در نقطه‌های خواسته شده، به‌دست می‌آوریم:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad \text{الف)}$$

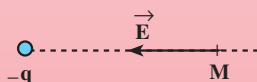
$$E_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-6}}$$

$$E_1 = 4/5 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{C}} \quad \text{ب)}$$

$$E_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-2}} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_2 = 4/5 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

برای نشان دادن میدان، فرض می‌کنیم بار مثبتی در نقطه‌ی M، در  $2$  میلی‌متری بار  $q$  واقع باشد. چون بار  $q$  منفی است، بار مثبت فرضی را جذب می‌کند. میدان بار  $q$  در جهت همین نیروست که در شکل ۱-۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲۲ — میدان بار منفی  $q$  در نقطه‌ی M



همان‌طور که مثال‌های ۱-۵ و ۱-۶ نشان می‌دهند در محاسبه‌ی اندازه‌ی میدان الکتریکی، علامت بار را در رابطه‌ی ۱-۷ یا ۱-۸ وارد نمی‌کنیم و جهت میدان در هر نقطه را به کمک جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت فرضی واقع در آن نقطه، تعیین می‌کنیم.

**میدان الکتریکی حاصل از مجموعه‌ی ذره‌های باردار:** اگر در یک ناحیه از فضا چند ذره‌ی باردار قرار داشته باشند، در هر نقطه یک میدان الکتریکی وجود دارد. این میدان، بر ایند میدان‌هایی است که هر ذره‌ی باردار در غیاب سایر بارهای الکتریکی در آن نقطه ایجاد می‌کند.

### مثال ۱-۷

دو بار الکتریکی ذره‌ای  $q_1 = 4\mu\text{C}$  و  $q_2 = 6\mu\text{C}$  در فاصله‌ی ۸ cm از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به دست آورید.

الف - در وسط خط واصل دو ذره‌ی باردار،

ب - در نقطه‌ای به فاصله‌ی ۲ cm از بار  $q_2$  و ۱۰ cm از بار  $q_1$  و روی خط واصل دوبار.

**حل:** در غیاب هر یک از دو ذره، میدان حاصل از بار دیگر را محاسبه می‌کنیم. میدان حاصل از مجموعه‌ی دوبار، بر ایند این دو میدان خواهد بود.

الف - اگر بار مثبتی را در نقطه‌ی A قرار دهیم، بار  $q_1$  آن را می‌راند و بار  $q_2$  آن را می‌ریاید. بنابراین،  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  در نقطه‌ی A هم جهت و به سوی بار  $q_2$  هستند (شکل ۱-۲۳ الف و ب).

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۸ داریم:

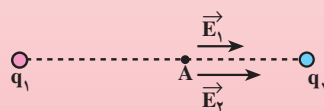
$$E = k \frac{q}{r^2}$$

$$E_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{16 \times 10^{-4}}$$

$$E_1 = 2 / 25 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6}}{16 \times 10^{-4}} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_2 = 3 / 375 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$



الف



ب

شکل ۱-۲۳

چون  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  هم جهت اند، اندازه‌ی برآیند آن‌ها برابر مجموع اندازه‌ی آن‌هاست.  
توجه داشته باشید که در نقطه‌ی A تنها میدان  $\vec{E}_A$  وجود دارد.

$$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$E_A = E_1 + E_2$$

$$E_A = 5/625 \times 10^7 \frac{N}{C}$$

ب- اگر بار الکتریکی مثبتی در نقطه‌ی B قرار گیرد، بار  $q_1$  آن را می‌راند و بار  $q_2$  آن را می‌رباید. در نتیجه،  $\vec{E}'_2$  به طرف بار  $q_2$  و  $\vec{E}'_1$  در خلاف جهت  $\vec{E}'_2$  است (شکل ۲۴-۱ الف و ب).

$$E'_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{10^{-2}}$$

$$E'_1 = 3/6 \times 10^6 \frac{N}{C}$$

$$E'_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-4}}$$

$$E'_2 = 1/35 \times 10^8 \frac{N}{C}$$



الف



ب

شکل ۲۴-۱

چون  $\vec{E}'_1$  و  $\vec{E}'_2$  در خلاف جهت یکدیگرند، برآیند آن‌ها برابر تفاضل اندازه‌های  $E'_1$  و  $E'_2$  است.

$$\vec{E}_B = \vec{E}'_2 + \vec{E}'_1$$

$$E_B = E'_2 - E'_1 = 131/4 \times 10^6 \frac{N}{C}$$

## ۱-۵- تجسم میدان الکتریکی

میدان الکتریکی را در اطراف یک جسم باردار با خط‌هایی نشان می‌دهیم که به آن‌ها خط‌های میدان الکتریکی می‌گویند.

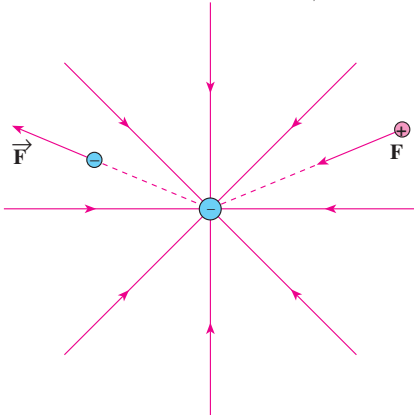
این خط‌ها دارای ویژگی‌های زیرند:

۱- خط‌های میدان در هر نقطه، هم‌جهت با نیروی وارد بر بار مثبت واقع در آن نقطه‌اند. در نتیجه، جهت این خط‌ها از بار مثبت رو به خارج و به سوی بار منفی است (بر بار منفی، نیرو در خلاف جهت میدان وارد می‌شود).

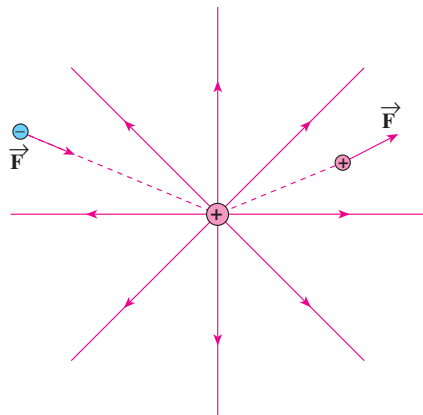
۲- خط میدان در هر نقطه، جهت میدان را در آن نقطه نشان می‌دهد و میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن هم‌جهت است.

۳- در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خط‌های میدان به یک‌دیگر نزدیک‌تر و فشرده‌ترند.

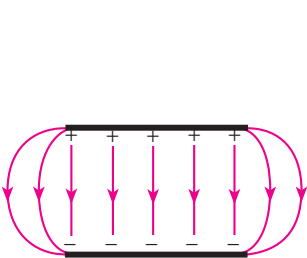
۴- خط‌های میدان یک‌دیگر را قطع نمی‌کنند، یعنی از هر نقطه فقط یک خط میدان می‌گذرد. به بیان دیگر، در هر نقطه‌ی فضا فقط یک میدان الکتریکی وجود دارد که همان میدان الکتریکی برابند است. در شکل ۱-۲۵ خط‌های میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



(ب) بار منفی منفرد

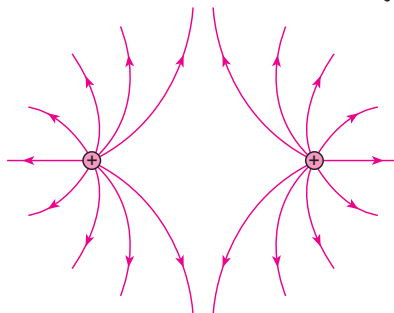


(الف) بار مثبت منفرد

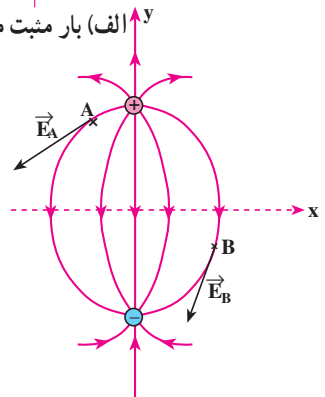


(ث) میدان بین دو صفحه‌ی رسانای موازی  
با بارهای هم‌اندازه (میدان یکنواخت)

۲۳



(ت) دوبار الکتریکی مثبت و هم‌اندازه



(ب) دوقطبی الکتریکی

شکل ۱-۲۵ - میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار

### فعالیت ۳-۱

- ۱- میدان الکتریکی را در اطراف دو بار الکتریکی منفی و هم اندازه رسم کنید.
- ۲- با توجه به ویژگی های خط های میدان الکتریکی، خط های میدان را در اطراف دو بار الکتریکی نقطه ای مثبت  $q_1$  و منفی  $q_2$  با فرض  $|q_2| > |q_1|$ ، رسم کنید.
- ۳- بردار میدان الکتریکی را در چند نقطه روی شکلی که در مرحله ی ۲ رسم کرده اید، نشان دهید.
- ۴- نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت  $q'$  و نیز بار منفی  $q''$  را که روی یک خط میدان واقع اند روی شکل مرحله ی ۲ رسم کنید.
- ۵- با توجه به تعریف میدان الکتریکی و ویژگی خط های میدان و با رجوع به شکل ۱-۲۵ ث برای میدان الکتریکی یکنواخت، تعریفی بیان کنید.

### ۱-۶- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی

اگر بار الکتریکی  $q$  در میدان الکتریکی  $\vec{E}$  قرار گیرد، از طرف میدان بر آن نیرو وارد می شود. این نیرو از رابطه ی ۱-۹ به دست می آید.

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

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (۱-۹)$$

اگر  $q$  مثبت باشد،  $\vec{F}$  و  $\vec{E}$  هم جهت اند اما اگر  $q$  منفی باشد،  $\vec{F}$  در خلاف جهت  $\vec{E}$  خواهد

بود.

### مثال ۱-۸

ذره ای به جرم  $2g$  و بار الکتریکی  $2\mu C$  را در میدان الکتریکی خارجی  $4 \times 10^4 \frac{N}{C}$  قرار می دهیم. شتاب حاصل از نیروی الکتریکی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه ی ۱-۹ داریم:

$$F = qE$$

$$F = 2 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^4$$

$$F = 8 \times 10^{-2} \text{ N}$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$a = \frac{8 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-3}}$$

$$a = 40 \text{ m/s}^2$$

مثال‌های حل شده نشان می‌دهند که میدان الکتریکی در یک نقطه، به عامل‌های مختلفی بستگی دارد. اندازه‌ی بار الکتریکی، نحوه‌ی توزیع بار الکتریکی و فاصله‌ی نقطه‌ی مورد نظر از جسم باردار، از جمله‌ی این عامل‌ها هستند.

## ۷-۱- توزیع بار الکتریکی در یک جسم

**الف – جسم نارسانا:** وقتی به یک جسم نارسانا بار الکتریکی داده می‌شود، بار در محل داده شده به جسم باقی می‌ماند و در جسم جابه‌جا نمی‌شود.

**ب – جسم رسانا:** بر خلاف جسم نارسانا، وقتی به یک جسم رسانا بار الکتریکی داده می‌شود، آن بار الکتریکی در محل داده شده ساکن نمی‌ماند و در جسم رسانا توزیع می‌شود. برای پی‌بردن به چگونگی توزیع بار در جسم رسانا، آزمایش ۳-۱ را انجام دهید.

### آزمایش ۳-۱

**هدف:** نحوه‌ی توزیع بار در جسم رسانا

وسایله‌های آزمایش: ظرف فلزی دردار با پایه‌ی نارسانا (شکل ۲۶-۱ الف)، گوی فلزی، نخ، الکتروسکوپ، چسب نواری، واندوگراف و یا میله‌ی پلاستیکی و پارچه‌ی پشمی.

**شرح آزمایش:**

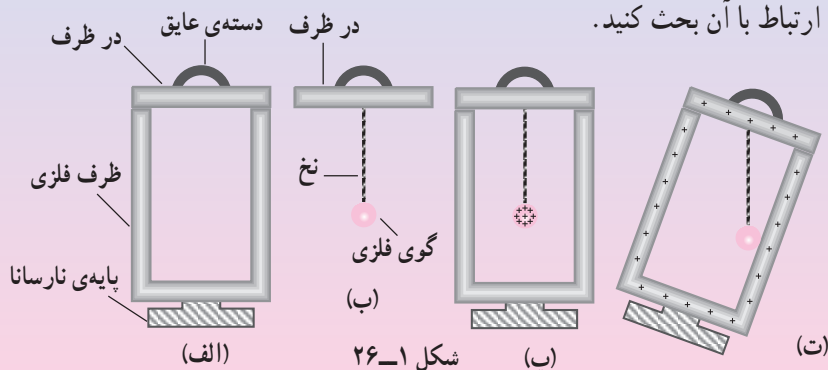
- ۱- به کمک چسب نواری یک سر نخ را به گوی فلزی و سر دیگر آن را به در ظرف وصل کنید به طوری که طول نخ باقیمانده از عمق ظرف کم‌تر باشد (شکل ۲۶-۱ ب).
- ۲- گوی فلزی را توسط واندوگراف یا روش القا و یا روش‌های دیگر باردار

کنید و از باردار شدن آن پس از نزدیک کردن به کلاهک یک الکتروسکوپ بدون بار مطمئن شوید (در این جا بار گوی فلزی را مثبت فرض کرده ایم).

۳- بدون آن که گوی باردار با دست شما یا بدنه ی ظرف تماس یابد در ظرف را به آرامی بر روی ظرف قرار دهید (شکل ۱-۲۶ پ).

۴- پایه ی نارسانای ظرف را بگیرید و آن را به نحوی کج کنید تا گوی فلزی باردار برای لحظه ای کوتاه با درون ظرف تماس یابد (شکل ۱-۲۶ ت).

۵- در ظرف را برداشته و گلوله و همچنین ظرف را دوباره به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک کنید. نتیجه ی مشاهده ی خود را به کلاس گزارش کرده و در ارتباط با آن بحث کنید.



آزمایش هایی مانند آنچه شما انجام دادید، نشان می دهد که بار الکتریکی درون جسم رسانا باقی نمی ماند. تمام بار الکتریکی داده شده به جسم رسانا به سطح خارجی آن می رود و در آن جا توزیع می شود.

## ۴-۱ فعالیت

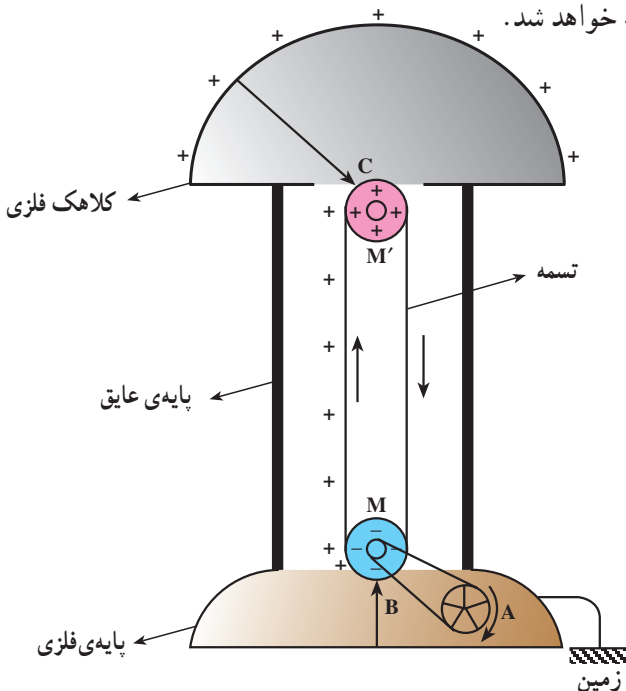
در جسم رسانا، الکترون های آزاد می توانند جابه جا شوند. با بحث در گروه خود برای پرسش زیر، پاسخ مناسبی تهیه کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.  
با توجه به این که در جسم جامد بارهای الکتریکی مثبت جابه جا نمی شوند، در این باره توضیح دهید: وقتی به یک جسم رسانا بار الکتریکی مثبت یا منفی داده می شود، این بارهای الکتریکی چگونه در جسم جابه جا شده و به سطح خارجی آن می روند؟



## مولد وان دوگراف

مولد وان دوگراف دستگاهی است که بار الکتریکی روی کلاهک فلزی آن انباشته می‌شود. اگر یک جسم رسانا با کلاهک این دستگاه تماس پیدا کند، دارای بار الکتریکی می‌شود.

در نمونه‌ی ساده‌ی مولد وان دوگراف، غلتک  $M$  توسط موتور  $A$  می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود. غلتک  $M$  از جنس پلی‌تن و  $M'$  از جنس پرسیکس است. شانه‌ی فلزی  $B$  به پایه‌ی فلزی متصل است. در اثر مالش تسمه با غلتک‌ها، غلتک  $M$  بار منفی و غلتک  $M'$  بار مثبت پیدا می‌کند. غلتک  $M$  که بار منفی دارد، در شانه‌ی فلزی  $B$  (که به زمین اتصال دارد)، بار مثبت القا می‌کند. بار مثبت توسط شانه‌ی  $B$  روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می‌شود. این بارهای مثبت، توسط تسمه که عایق است به کمک شانه‌ی فلزی  $C$  به کلاهک منتقل شده و به سطح خارجی کلاهک می‌روند. به این ترتیب، بار الکتریکی مثبت روی سطح خارجی کلاهک انباشته می‌شود. اگر جای غلتک‌های  $M$  و  $M'$  با هم عوض شود، بار منفی در سطح خارجی کلاهک انباشته خواهد شد.



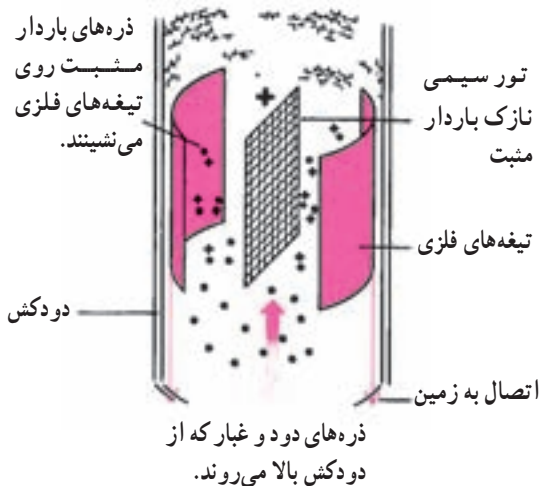
شکل ۱-۲۷

## رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی

رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی، دود و غبار را از گازهای زایدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌رود، جدا می‌سازد. شکل زیر چگونگی کار یک رسوب دهنده را نشان می‌دهد. توری سیمی را به مقدار زیاد باردار می‌کنند، به گونه‌ای که تخلیه‌ی الکتریکی پیوسته‌ای بین توری و تیغه‌های فلزی متصل به زمین روی دهد. این تخلیه، جریان پیوسته‌ای از یونها را به همراه دارد که خود را به ذره‌های غبار در گازی که از دودکش بالا می‌رود، متصل می‌کنند.

سپس ذره‌های باردار غبار از تور سیمی دفع شده و به سوی تیغه‌های متصل به زمین رانده می‌شوند و در آنجا رسوب می‌کنند. پس از مدتی این تیغه‌ها را با زدن ضربه می‌تکانند تا ذره‌های غبار و دود از دودکش پایین بریزد و در آنجا این ذره‌ها را جمع می‌کنند.

دودکش این کارخانه در هر دو عکس مورد بهره‌برداری است ولی در عکس پایین دستگاه رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی کار می‌کند.



شکل ۲۸-۱

**چگالی سطحی بار الکتریکی:** دیدیم که بار الکتریکی داده شده به یک جسم رسانا، در سطح خارجی آن توزیع می‌شود. بنا به تعریف، بار الکتریکی موجود در واحد سطح جسم را چگالی سطحی بار الکتریکی می‌نامند.

اگر بار الکتریکی جسم برابر  $q$  و مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده برابر  $A$  باشد، چگالی سطحی بار - که با نماد  $\sigma$  (سیگما) نشان داده می‌شود - از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (۱-۱)$$

در S.I. بار الکتریکی بر حسب کولن و مساحت بر حسب مترمربع است. در نتیجه، یکای چگالی سطحی بار، کولن بر مترمربع خواهد بود.

### مثال ۹-۱

الف - به یک کره‌ی رسانا به قطر  $۲\text{ cm}$  بار الکتریکی  $۱۲۵\text{ }\mu\text{C}$  داده شده است. چگالی سطحی بار کره را حساب کنید.

ب - اگر همین بار به کره‌ای به قطر  $۲\text{ m}$  داده شود، چگالی سطحی بار آن چه قدر می‌شود؟

حل:

الف - مساحت سطح خارجی کره‌ای به شعاع  $R$  از رابطه‌ی  $A = 4\pi R^2$  به دست می‌آید.

$$A = 4\pi R^2$$

$$R = \frac{d}{2} = 1\text{ cm} = 10^{-2}\text{ m}$$

$$A = 4\pi (10^{-2})^2 = 1.256 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱ داریم:

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

$$\sigma = \frac{125 \times 10^{-6}}{1.256 \times 10^{-3}} = 10^{-1} \frac{\text{C}}{\text{m}^2} = 10^{-5} \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

ب -

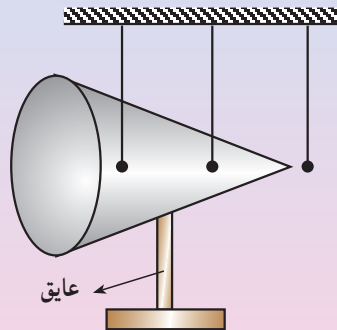
$$\frac{\sigma_2}{10^{-5}} = \left(\frac{1}{100}\right)^2$$

$$\sigma = 10^{-9} \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2}$$

## آزمایش ۴-۱

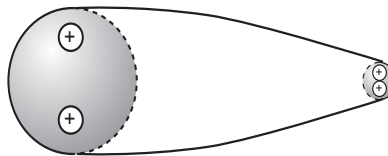
وسایله‌های آزمایش: مولد وان دوگراف یا دستگاه مشابه دیگر، مخروط فلزی روی پایه‌ی نارسانا، چند آونگ الکتریکی.

شرح آزمایش: مطابق شکل زیر، چند آونگ الکتریکی را در اطراف مخروط فلزی و در تماس با آن قرار دهید. با اتصال وان دوگراف به مخروط، به آن بار الکتریکی بدهید. انحراف آونگ‌ها را مشاهده کرده و با هم مقایسه کنید.



شکل ۱-۲۹

در جسمی مانند کره که سطح خارجی آن متقارن است، چگالی سطحی بار در همه‌جای آن یکسان است اما در جسم‌هایی که سطح خارجی متقارن ندارند، چگالی سطحی بار در همه‌جای سطح خارجی یکسان نیست. تجربه نشان می‌دهد که در مکان‌های برجسته و نوک‌تیز جسم رسانا، چگالی سطحی بار از سایر مکان‌های دیگر جسم بیش‌تر است. یعنی، فاصله‌ی بارهای داده شده به جسم، در مکان‌های نوک‌تیز کم‌تر از فاصله‌ی آن‌ها در مکان‌های پهن است. شکل ۱-۳۰ به‌گونه‌ای طرح‌وار نشان دهنده‌ی این مطلب است.



شکل ۱-۳۰

## ۸-۱- انرژی پتانسیل الکتریکی

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه با انرژی پتانسیل گرانشی آشنا شدید و دیدید که با صرف انرژی و انجام کار، می‌توان جسمی به جرم  $m$  را از سطح زمین تا ارتفاع  $h$  بالا برد. انرژی‌ای که صرف بالا بردن جسم (با سرعت ثابت) شده است، به صورت انرژی پتانسیل گرانشی ( $U = mgh$ ) در آن ذخیره می‌شود. با انرژی پتانسیل کشسانی نیز آشنا شدید و دیدید که وقتی فنری را به آرامی فشرده می‌کنیم یا می‌کشیم، کار انجام شده به صورت انرژی پتانسیل کشسانی در فنر ذخیره می‌شود. در این جا می‌خواهیم با انرژی پتانسیل الکتریکی بیش‌تر آشنا شویم.

در بخش ۱-۱ دیدید که دو ذره‌ی باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. همان‌طور که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم، وقتی دو ذره‌ی باردار را که بار هم‌نام دارند با سرعت ثابت به یک‌دیگر نزدیک می‌کنیم، برای غلبه بر نیروی رانشی آن‌ها باید کار انجام دهیم و یا اگر بخواهیم دو ذره‌ی باردار را که بار غیرهم‌نام دارند با سرعت ثابت از هم دور کنیم، باز هم باید کار انجام دهیم. کار انجام شده به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بارهای الکتریکی ذخیره می‌شود.

### مثال ۱۰-۱

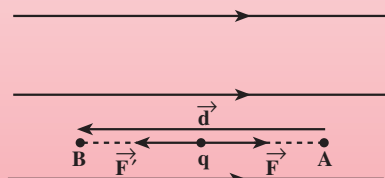
ذره‌ای با بار الکتریکی مثبت  $q$  را با سرعت ثابت در میدان الکتریکی یکنواخت (یعنی میدانی که بردار میدان در همه‌جای آن یکسان است)  $\vec{E}$ ، در خلاف جهت میدان و به موازات خط‌های میدان به اندازه‌ی  $d$  جابه‌جا می‌کنیم. برای این جابه‌جایی، چه مقدار کار باید انجام دهیم؟

**حل:** میدان الکتریکی بر بار مثبت  $q$ ، نیرویی برابر  $F = qE$  و در جهت میدان وارد می‌کند. برای آن‌که ذره‌ی  $q$  را با سرعت ثابت در خلاف جهت میدان جابه‌جا کنیم، باید به آن نیرویی برابر  $F' = qE$  و در خلاف جهت میدان – یعنی در جهت جابه‌جایی – وارد کنیم (شکل ۱-۳۱). بنابراین، زاویه‌ی بین نیرویی که ما وارد می‌کنیم (یعنی نیروی  $\vec{F}'$ ) و جابه‌جایی ( $\vec{d}$ ) برابر صفر است. کاری که ما انجام می‌دهیم، برابر است با:

$$W = F' \cdot d \cdot \cos \alpha$$

$$W = q \cdot E \cdot d \cdot \cos(0^\circ)$$

$$W = q \cdot E \cdot d$$



شکل ۱-۳۱

در این جا، کاری که ما انجام می دهیم مثبت است و انرژی مصرفی ما به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی، در بار الکتریکی  $q$  ذخیره می شود. هرچه اندازه ی جابه جایی بیش تر باشد، کار و انرژی مصرفی ما بیش تر می شود و در نتیجه، افزایش انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$ ، بیش تر می شود. درست مانند وقتی که یک جسم را روی زمین، از یک نقطه به نقطه ی بالاتری می بریم و انرژی پتانسیل گرانشی آن افزایش می یابد.

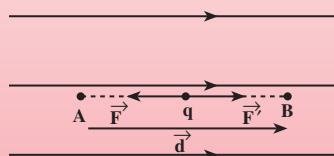
اگر بار الکتریکی  $q$  را در نقطه ی  $B$  (شکل ۱-۳۲) رها کنیم، در جهت خط های میدان به حرکت درمی آید و انرژی پتانسیل الکتریکی آن به انرژی جنبشی تبدیل می شود. مانند وقتی که یک جسم را از نقطه ی بالای زمین رها می کنیم و جسم به پایین حرکت می کند. در این حالت، انرژی پتانسیل گرانشی آن کاهش می یابد و به انرژی جنبشی تبدیل می شود.

## مثال ۱-۱۱

بار الکتریکی منفی  $q$  را در میدان الکتریکی یکنواختی به بزرگی  $E$  با سرعت ثابت و در جهت میدان به اندازه ی  $d$  جابه جا می کنیم. کاری را که در این جابه جایی انجام می شود، محاسبه کنید.

حل: میدان الکتریکی، نیرویی به اندازه ی  $F = q.E$  در خلاف جهت میدان به بار الکتریکی منفی وارد می کند. در نتیجه، برای جابه جایی بار  $q$  با سرعت ثابت باید نیروی  $F' = q.E$  در جهت میدان، یعنی در جهت جابه جایی، به آن وارد کنیم (شکل ۱-۳۲). کار انجام شده توسط ما در این جابه جایی برابر است با:

$$W = F'.d.\cos\alpha \rightarrow W = q.E.d$$



شکل ۱-۳۲

در این مثال نیز کار انجام شده توسط ما مثبت است و انرژی مصرفی به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بار  $q$  ذخیره می شود. اگر بار  $q$  را رها کنیم، در خلاف جهت میدان شروع به حرکت می کند. در این حال، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می یابد و به انرژی جنبشی تبدیل می شود. از مثال های ۱-۱۰ و ۱-۱۱ چنین نتیجه می گیریم که تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک بار الکتریکی وقتی آن را در یک میدان الکتریکی جابه جا می کنیم، برابر انرژی ای است که برای جابه جایی

آن بار الکتریکی صرف می‌شود.

$$\Delta U = W \quad (۱۱-۱)$$

اگر کاری که ما برای جابه‌جایی بار الکتریکی (با سرعت ثابت) انجام می‌دهیم مثبت باشد ( $W > 0$ )، انرژی پتانسیل بار، افزایش می‌یابد؛ یعنی،  $\Delta U > 0$  و  $U_2 > U_1$  می‌شود. در صورتی که کار انجام شده توسط ما منفی باشد ( $W < 0$ )، انرژی پتانسیل بار الکتریکی کاهش می‌یابد؛ یعنی،  $\Delta U < 0$  و  $U_2 < U_1$  است.

## ۹-۱. اختلاف پتانسیل الکتریکی

در بخش ۸-۱ دیدید که بار الکتریکی در میدان الکتریکی، دارای انرژی پتانسیل الکتریکی است. در یک نقطه‌ی میدان، اندازه‌ی انرژی پتانسیل الکتریکی باری واقع در آن نقطه، به اندازه‌ی بار الکتریکی بستگی دارد. هرچه اندازه‌ی بار الکتریکی بیش‌تر باشد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز بیش‌تر می‌شود. در مبحث الکتریسته، معمولاً به‌غیر از انرژی پتانسیل، مفهوم دیگری نیز تعریف می‌شود که کاربرد عملی آن بیش‌تر است و به آن پتانسیل الکتریکی می‌گویند. با این کمیت در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه آشنا شدید و دیدید که اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه عامل شارش بار الکتریکی بین آن دو نقطه است. هم‌چنین، در همان کتاب دیدید که اگر دو ظرف آب به یک‌دیگر مربوط شوند، آب از ظرفی که انرژی پتانسیل گرانشی یکای جرم آن بیش‌تر است، به ظرف دیگر شارش می‌کند. در الکتریسته نیز عامل شارش بار الکتریکی به کمک اختلاف انرژی پتانسیل الکتریکی یکای بار در دو نقطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه، برابر تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یکای بار الکتریکی مثبت است، وقتی یکای بار از نقطه‌ی اول تا نقطه‌ی دوم جابه‌جا می‌شود. بنابراین، اگر انرژی پتانسیل الکتریکی بار مثبت  $q$  در یک نقطه‌ی میدان برابر  $U_1$  و در نقطه‌ی دیگر برابر  $U_2$  باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین این دو نقطه، که با نماد  $\Delta V$  نشان داده می‌شود، از رابطه‌ی ۱۲-۱ به‌دست می‌آید:

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad \text{و} \quad \Delta U = U_2 - U_1$$

با توجه به تعریف اختلاف پتانسیل الکتریکی، داریم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \quad (۱۲-۱)$$

در این رابطه،  $U$  بر حسب ژول (J)،  $q$  بر حسب کولن (C) و  $V$  بر حسب ولت (V) است.

در بخش ۸-۱ دیدید که اگر بار الکتریکی مثبت در جهت میدان الکتریکی حرکت کند، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می‌یابد. تغییر پتانسیل الکتریکی به تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بستگی دارد (رابطه ی ۱-۱۲)؛ بنابراین، نتیجه می‌گیریم که هرگاه بار الکتریکی مثبت در جهت میدان الکتریکی جابه‌جا شود، از پتانسیل الکتریکی بیش‌تر به پتانسیل الکتریکی کم‌تر رفته است. شما با انواع پیل (قوه) که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا رادیو از آن‌ها استفاده می‌شود و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. پیل‌ها معمولاً  $1/5$  ولتی،  $4/5$  ولتی یا  $9$  ولتی‌اند. باتری خودروهای سواری معمولاً  $12$  ولتی و باتری کامیون‌ها  $24$  ولتی یا بیش‌تراند. هر پیل یا باتری دو پایانه دارد که یکی مثبت و دیگری منفی است. وقتی می‌گوییم باتری خودرو  $12$  ولت است، یعنی اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایانه‌های منفی و مثبت آن برابر  $12$  ولت است. اگر پتانسیل پایانه‌ی منفی را با  $V_-$  و پتانسیل پایانه‌ی مثبت را با  $V_+$  نشان دهیم، داریم:

$$\Delta V = V_+ - V_- = 12V$$

$$V_+ = 12 + V_-$$

بنابراین، پتانسیل پایانه‌ی مثبت به اندازه‌ی  $12$  ولت از پتانسیل پایانه‌ی منفی آن بیش‌تر است. مثلاً اگر پتانسیل پایانه‌ی منفی را برابر  $4V -$  یا  $4V +$  فرض کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت به ترتیب برابر  $8V +$  یا  $16V +$  خواهد شد. ممکن است پتانسیل پایانه‌ی منفی را برابر صفر بگیریم، در این صورت، پتانسیل پایانه‌ی مثبت برابر  $12V +$  می‌شود. معمولاً (به‌خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین را برابر صفر می‌گیرند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به زمین می‌سنجند. در این صورت، پتانسیل هر جسم رسانا که به زمین وصل شود، برابر صفر می‌شود. مثلاً اگر پایانه‌ی منفی باتری را به زمین وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت آن برابر  $12V +$  ولت می‌شود. در هر حال، نکته‌ی مهم، اختلاف پتانسیل بین دو نقطه است که در محاسبه‌ها وارد می‌شود.

### تمرین ۳-۱

اگر پایانه‌ی مثبت یک باتری  $12$  ولتی را به زمین وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی منفی آن چند ولت خواهد شد؟

### مثال ۱۲-۱

اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری یک خودرو برابر  $12V$  است. اگر



بار الکتریکی  $1/5 +$  کولن از پایانه‌ی مثبت تا منفی باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟  
 حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۲ داریم:

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

$$\Delta U = q \cdot \Delta V = q \cdot (V_- - V_+)$$

$$\Delta U = 1/5 \times (-12) = -18J$$

بنابر این، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه‌ی  $18J$  کاهش یافته است.

## تمرین ۴-۱

اگر بار الکتریکی جابه‌جا شده در مثال ۱-۱۲ منفی باشد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟

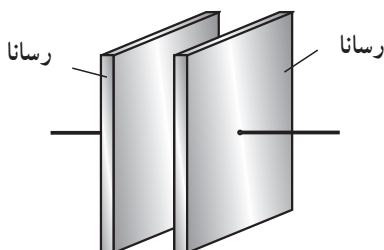
## ۱-۱۰- خازن

خازن یک قطعه‌ی الکتریکی است که می‌تواند مقداری بار الکتریکی و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند و هر زمان که لازم باشد، آن را در مدار تخلیه کند. هر خازن از دو رسانا که به یک‌دیگر اتصال الکتریکی ندارند، تشکیل می‌شود.

خازن را به شکل‌های مختلف و برای مصرف‌های متفاوتی می‌سازند. در مدار لامپ‌های مهتابی (فلوئورسنت)، بلندگو، دلقوی ماشین، رادیو، تلویزیون، رایانه و ... از خازن استفاده می‌شود. برای آشنا شدن با چگونگی عمل خازن در مدار، ساده‌ترین شکل خازن را بررسی می‌کنیم. به این خازن،

خازن تخت یا مسطح گفته می‌شود. رساناهای خازن

تخت، دو صفحه‌ی فلزی موازی یک‌دیگرند. به همین دلیل به این خازن، خازن با صفحه‌های موازی نیز گفته می‌شود. خازن تخت را در مدارها با نماد « $\text{—}| \text{—}$ » نشان می‌دهیم.



شکل ۱-۳۳- خازن تخت



شوند، باتری با مصرف کردن انرژی هر دو صفحه را باردار می‌کند. از پایانه‌ی منفی، تعدادی الکترون به صفحه‌ی B منتقل می‌شود؛ در حالی که پایانه‌ی مثبت باتری از صفحه‌ی A الکترون می‌گیرد. جابه‌جایی بارهای الکتریکی آن‌قدر ادامه می‌یابد تا پتانسیل الکتریکی هر یک از صفحه‌های خازن با پتانسیل پایانه‌ی متصل به آن برابر شود. به این ترتیب، اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی خازن (که به آن اختلاف پتانسیل دو سر خازن می‌گوییم) با اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های باتری برابر می‌شود (شکل ۱-۳۴ پ).

$$V_A = V_+ \quad \text{و} \quad V_B = V_-$$

$$V_A - V_B = V_+ - V_- \quad (۱۳-۱)$$

در نتیجه، هر یک از صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شود. روی صفحه‌ی A بار  $+q$  و روی صفحه‌ی B، بار  $-q$  انباشته می‌شود. در این حالت، می‌گوییم که بار الکتریکی  $q$  در خازن ذخیره شده است. در واقع، باتری با صرف انرژی، بار  $q$  را در خازن ذخیره کرده است. انرژی‌ای که باتری مصرف کرده، به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن ذخیره شده است. اکنون، خازن دارای بار الکتریکی و انرژی است.

## ۱-۱۱- ظرفیت خازن

آزمایش نشان می‌دهد که هرچه اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های مولد بیش‌تر باشد، بار ذخیره‌شده در خازن نیز بیش‌تر می‌شود. به عبارتی نسبت بار الکتریکی خازن ( $q$ ) به اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی آن ( $V$ )، یعنی نسبت  $\frac{q}{V}$ ، در آزمایش‌های مختلف ثابت می‌ماند. این نسبت را که به اندازه‌ی بار الکتریکی خازن و نیز به اختلاف پتانسیل دو سر آن بستگی ندارد، با نماد «C» نشان می‌دهیم و به آن ظرفیت خازن می‌گوییم. بنابراین، ظرفیت خازن برابر نسبت بار ذخیره‌شده در آن به اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی آن است.

$$C = \frac{q}{V} \quad (۱۴-۱)$$

به پاس خدمات مایکل فارادی، دانشمند انگلیسی، یکای ظرفیت فاراد نامیده شده است. در رابطه‌ی ۱-۱۴ بار الکتریکی بر حسب کولن، اختلاف پتانسیل بر حسب ولت و ظرفیت بر حسب فاراد (F) است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و ظرفیت خازن‌های تخت از حدود چند میکروفاراد تجاوز نمی‌کند.

### مثال ۱-۱۳

صفحه‌های خازن تختی را به پایانه‌های مولدی به اختلاف پتانسیل ۲۴۷ وصل می‌کنیم. اگر بار  $120 \mu C$  روی هر صفحه‌ی خازن ذخیره شود، ظرفیت خازن را محاسبه کنید. اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل ۳۶ ولت وصل کنیم، بار الکتریکی ذخیره شده در آن چه اندازه می‌شود؟  
حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۴ داریم:

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

$$C = \frac{1/2 \times 10^{-4}}{24} \quad \text{با استفاده از این رابطه، داریم:}$$

$$C = 5 \times 10^{-6} F = 5 \mu F$$

رابطه‌ی (۱-۱۴) را می‌توان به صورت  $q = C \cdot V$  نوشت. با استفاده از این

$$q = 5 \times 36 = 180 \mu C \quad \text{رابطه، داریم:}$$

### ۱-۱۲- عوامل‌های مؤثر بر ظرفیت خازن تخت

ظرفیت خازن به بار الکتریکی خازن و اختلاف پتانسیل دو سر آن بستگی ندارد. ظرفیت خازن تخت از مشخصات ساختمانی خازن است و به عامل‌های زیر بستگی دارد.  
۱- با مساحت سطح مشترک صفحه‌های خازن که روبروی یک‌دیگر قرار دارند، نسبت مستقیم دارد.

$$C \propto A$$

۲- با فاصله‌ی دو صفحه از یک‌دیگر نسبت وارون دارد.

$$C \propto \frac{1}{d}$$

اگر بین دو صفحه‌ی خازن خلأ باشد، ظرفیت خازن تخت از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (1-15)$$

در رابطه‌ی ۱-۱۵،  $\epsilon$  ضریب گذردهی الکتریکی خلأ است. در این رابطه،  $A$  بر حسب مترمربع،  $d$  بر حسب متر و  $C$  بر حسب فاراد ( $F$ ) است.

اگر یک دی الکتریک (نارسانا) مانند شیشه یا پارافین فضای بین دو صفحه‌ی خازن تختی را پُر کند، ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. در این صورت، ظرفیت خازن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید :

$$C = k\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (۱۶-۱)$$

در رابطه‌ی ۱-۱۶،  $k$  ضریبی بدون یکاست که به آن ثابت دی الکتریک گفته می‌شود. ثابت دی الکتریک به جنس دی الکتریک بستگی دارد. اگر بین دو صفحه خلأ باشد،  $k = ۱$  است.  $k$  برای سایر دی الکتریک‌ها بزرگ‌تر از یک است ( $k > ۱$ ). ثابت دی الکتریک برخی از ماده‌ها در جدول ۱-۱ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود ثابت دی الکتریک هوا تقریباً برابر ۱ است.

جدول ۱-۱- ثابت دی الکتریک دی الکتریک‌های متداول

ثابت دی الکتریک	دی الکتریک
۶ - ۱۰	دی الکتریک‌های جامد
۵/۶ - ۶/۶	شیشه
۲/۱ - ۲/۳	میکا
۲/۱ - ۲/۵	کاغذ پارافینی
	پارافین (در $۲۰^{\circ}\text{C}$ )
	دی الکتریک‌های مایع
۲۵	الکل
۲ - ۲/۲	روغن
۸۰ - ۸۳	آب
	دی الکتریک‌های گازی
۱/۰۰۰۰۹۷	دی اکسید کربن
۱/۰۰۰۰۶۰	هوا
۱/۰۰۰۰۲۶	هیدروژن

### مثال ۱۴-۱

هر یک از صفحه‌های خازن تختی، به شکل مستطیلی به طول  $6\text{ cm}$  و عرض  $2\text{ cm}$  است که بین آن‌ها از دی‌الکتریکی به ضخامت  $1/5\text{ mm}$  و ثابت دی‌الکتریک

$$\epsilon_r = 9 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N.m}^2} \text{ پُر شده است. ظرفیت این خازن را محاسبه کنید.}$$

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱۶-۱ داریم:

$$C = k\epsilon_r \frac{A}{d}$$

$$C = 10 \times 9 \times 10^{-12} \times \frac{20 \times 60 \times 10^{-4}}{1/5 \times 10^{-3}}$$

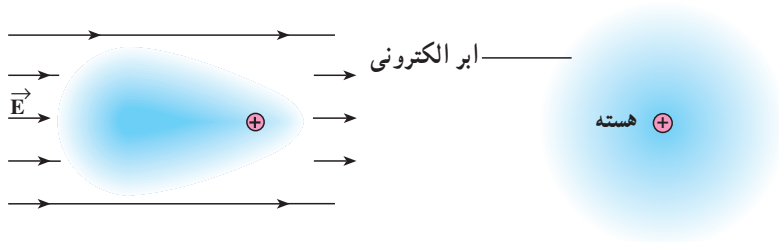
$$C = 7/2 \times 10^{-9} \text{ F} = 7/2 \text{ nF}$$

### فروشکست

دیدیم که اگر اختلاف پتانسیل دو سر خازن را افزایش دهیم، بار ذخیره‌شده در خازن نیز افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که اگر بار الکتریکی خازن از مقدار معینی بیش‌تر شود، یک میدان الکتریکی بسیار قوی بین دو صفحه ایجاد می‌شود. این میدان الکتریکی باعث می‌شود که دی‌الکتریک بین دو صفحه به‌طور موقت رسانا شود. در نتیجه، با ایجاد جرقه بین دو صفحه، خازن تخلیه می‌شود. این پدیده را **فروشکست دی‌الکتریک** می‌نامند. پدیده‌ی فروشکست باعث تغییر ماهیت یا سوراخ‌شدن دی‌الکتریک جامد و سوختن خازن می‌شود.

**بررسی میکروسکوپی نقش دی‌الکتریک:** در بخش ۱۲-۱ دیدیم که قراردادن دی‌الکتریک بین صفحه‌های یک خازن تخت، باعث افزایش ظرفیت آن می‌شود. اما دی‌الکتریک چگونه ظرفیت خازن را افزایش می‌دهد؟

وقتی یک دی‌الکتریک در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، تأثیر میدان الکتریکی بر اتم باعث می‌شود که ابر الکترونی در خلاف جهت میدان و هسته در جهت میدان جابه‌جا شود (چرا؟). در نتیجه، مرکز مؤثر بار مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند. در این حالت، می‌گوییم که اتم در میدان الکتریکی قطبیده شده است.



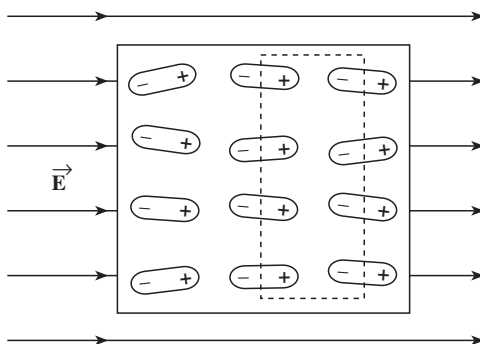
ب- در حضور میدان الکتریکی، مرکز مؤثر بارهای مثبت و منفی از هم جدا شده‌اند.

الف- در غیاب میدان الکتریکی، مرکز مؤثر بارهای مثبت و منفی بر هم منطبق‌اند.

شکل ۱- ۳۵

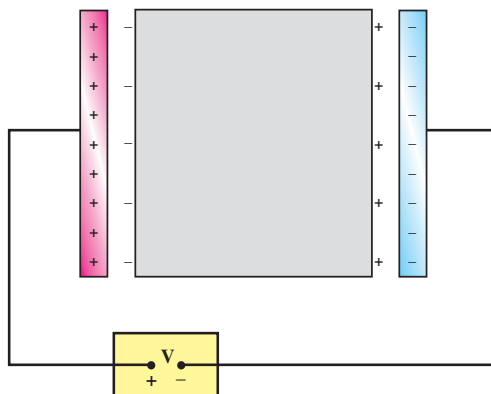
در شکل ۱- ۳۵ الف- یک اتم در غیاب میدان الکتریکی و ب- همان اتم در حضور میدان الکتریکی  $\vec{E}$  به‌طور طرح‌وار نشان داده شده است. مولکول‌های دی‌الکتریک‌ها در میدان الکتریکی قطبیده می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۱- ۳۶ نشان داده شده است، درون دی‌الکتریک، بارهای الکتریکی یک‌دیگر را خنثی می‌کنند.



شکل ۱- ۳۶- دی‌الکتریک در میدان الکتریکی

ولی در مجاورت صفحه‌های خازن، در سطح دی‌الکتریک بارهای غیر هم‌نام با بار صفحه‌ها ایجاد می‌شود (شکل ۱-۳۷). نیروی ربایشی بین این بارهای الکتریکی باعث می‌شود که با ولتاژ ثابت، بار خازن نسبت به وقتی که دی‌الکتریک ندارد، افزایش یابد و این به معنای افزایش ظرفیت خازن است.



شکل ۱-۳۷

### ۱-۱۳- انرژی خازن

در بخش ۱-۸ دیدیم که وقتی دو بار الکتریکی (هم‌نام یا غیرهم‌نام) در مجاورت یک‌دیگر قرار گیرند، مجموعه‌ی بارها دارای انرژی پتانسیل الکتریکی می‌شوند. خازن پر شده نیز به همین علت دارای انرژی پتانسیل الکتریکی است. در واقع، انرژی‌ای که مولد برای پُر کردن خازن مصرف می‌کند، به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن ذخیره می‌شود. این انرژی را خازن در هنگام تخلیه در یک مدار، پس می‌دهد. انرژی ذخیره شده در خازن را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$U = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{q^2}{2C} \quad (1-17)$$

### مثال ۱-۱۵

خازنی به ظرفیت  $6\mu F$  را به ولتاژ  $200V$  وصل می‌کنیم. بار الکتریکی و انرژی ذخیره شده در خازن را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌های ۱-۱۴ و ۱-۱۷ داریم:

$$q = CV$$

$$q = 6 \times 10^{-6} \times 200$$



$$q = 1/2 \times 10^{-3} C = 1/2 mC$$

$$U = \frac{1}{2} qV$$

$$U = \frac{1}{2} \times 1/2 \times 10^{-3} \times 200 = 0.12 J$$

## ۱۴-۱- به هم بستن خازن‌ها

در مدارهای الکتریکی، گاهی لازم می‌شود که از ظرفیت معینی استفاده کنیم اما آن را در اختیار نداریم. در این گونه موارد می‌توانیم خازن‌ها را به یک‌دیگر ببندیم و ظرفیت موردنظر را به‌دست آوریم. همچنین می‌توان یک خازن را جایگزین چند خازن در یک مدار کرد. به این خازن، خازن معادل و به ظرفیت آن، ظرفیت معادل می‌گوییم. ظرفیت معادل چند خازن، ظرفیت خازنی است که اگر به‌جای آن خازن‌ها در مدار قرار گیرد و به همان ولتاژی که به دو سر مجموعه‌ی خازن‌ها وصل است، متصل شود، انرژی الکتریکی ذخیره شده در آن برابر انرژی‌ای باشد که در مجموعه‌ی خازن‌ها ذخیره شده است.

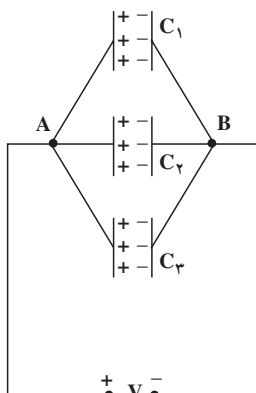
در حالت ساده، خازن‌ها ممکن است به‌طور موازی یا متوالی به یک‌دیگر وصل شده باشند. حالت‌های پیچیده‌تر را به کمک این دو حالت ساده می‌توان بررسی کرد.

**الف — به هم بستن موازی خازن‌ها:** اگر خازن‌های  $C_1$  و  $C_2$  و ... را مطابق شکل ۱-۳۸ به یک‌دیگر وصل کنیم، می‌گوییم خازن‌ها را به‌طور موازی به هم وصل کرده‌ایم. اگر ولتاژ  $V$  را به دو سر مجموعه وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر هر خازن برابر  $V$  می‌شود. بار الکتریکی هر یک از خازن‌ها برابر است با:

$$q_1 = C_1 V$$

$$q_2 = C_2 V$$

$$q_3 = C_3 V$$



شکل ۱-۳۸

بار الکتریکی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها برابر  $q = q_1 + q_2 + q_3$  است. اگر خازن معادل به ظرفیت  $C_T$  را به همین ولتاژ وصل کنیم، بار ذخیره شده در آن  $q = C_T V$  می‌شود. در نتیجه، داریم:

$$q = C_T V$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = C_T V$$

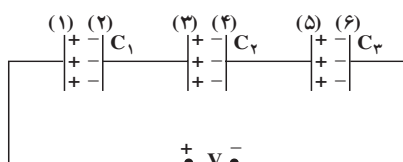
$$(C_1 + C_2 + C_3) V = C_T V$$

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 \quad (۱۸-۱)$$

بنابراین، ظرفیت خازن معادل مجموعه‌ای از خازن‌ها که به‌طور موازی به یک‌دیگر وصل شده‌اند، برابر مجموع ظرفیت خازن‌هاست و ظرفیت خازن معادل از ظرفیت هر یک از خازن‌ها بیش‌تر است.

**ب- به هم بستن متوالی خازن‌ها:** در شکل ۳۹-۱ سه خازن به‌طور متوالی به یک‌دیگر وصل شده‌اند. وقتی خازن‌ها به‌طور متوالی به یک ولتاژ وصل می‌شوند، هیچ کدام از آن‌ها به‌طور مستقل به ولتاژ  $V$  وصل نیستند. اگر روی صفحه‌ی ۱ بار  $+q$  انباشته شود، بار  $-q$  روی صفحه‌ی ۲ القا می‌گردد. مجموع بار صفحه‌های ۲ و ۳ برابر صفر است (چرا؟)؛ بنابراین، بار  $+q$  روی صفحه‌ی ۳ انباشته می‌شود و به همین ترتیب، بار هر خازن برابر  $q$  می‌شود. بار ذخیره شده روی مجموعه‌ی خازن‌ها نیز برابر  $q$  است. اگر ولتاژ خازن‌ها به‌ترتیب  $V_1$  و  $V_2$  و  $V_3$  باشد، ولتاژ دو سر مدار برابر مجموع ولتاژ دو سر خازن‌هاست.

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$



شکل ۳۹-۱

اگر به‌جای  $V_1$  و  $V_2$  و ... مساوی آن‌ها را از رابطه‌های  $V_1 = \frac{q}{C_1}$  و  $V_2 = \frac{q}{C_2}$  و ... قرار دهیم، نتیجه می‌شود:

$$V = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

اگر  $C_T$  ظرفیت خازن معادل باشد، وقتی به ولتاژ  $V$  وصل شود، بار آن برابر  $q$  می‌شود و

در نتیجه،  $V = \frac{q}{C_T}$  است. با قرار دادن  $\frac{q}{C_T}$  به جای  $V$  نتیجه می‌شود:

$$\frac{q}{C_T} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} \quad \text{و یا:}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (۱۹-۱)$$

بنابراین، وقتی خازن‌ها به‌طور متوالی به یک‌دیگر وصل می‌شوند، بار هر یک از خازن‌ها برابر با بار خازن معادل آن‌ها و وارون ظرفیت معادل، برابر مجموع وارون ظرفیت خازن‌هاست و ظرفیت معادل از کوچک‌ترین ظرفیت نیز کوچک‌تر است.

### مثال ۱-۱۷

به دو سر مجموعه‌ی سه خازن به ظرفیت‌های  $۶\mu F$ ،  $۳\mu F$  و  $۲\mu F$  که به‌طور متوالی به یک‌دیگر وصل‌اند، اختلاف پتانسیل  $۱۵۰V$  را وصل می‌کنیم. الف - ظرفیت خازن معادل، ب - بار الکتریکی هر خازن و پ - ولتاژ دو سر هر خازن را حساب کنید.  
حل: الف - با استفاده از رابطه‌ی ۱۹-۱ داریم:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{۱+۲+۳}{۶}$$

$$C_T = ۱\mu F$$

ب - بار الکتریکی هر خازن، برابر با بار خازن معادل آن‌هاست.

$$q = CV$$

$$q = ۱ \times ۱۵۰ = ۱۵۰\mu C$$

$$q_1 = q_2 = q_3 = q = ۱۵۰\mu C$$

پ - با استفاده از رابطه‌ی  $q = CV$  داریم:

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

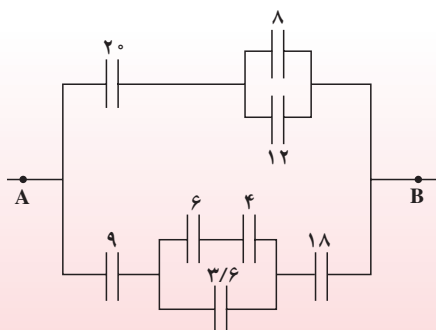
$$V_1 = \frac{15^\circ}{6} = 25V$$

$$V_2 = \frac{15^\circ}{3} = 50V$$

$$V_3 = \frac{15^\circ}{2} = 75V$$

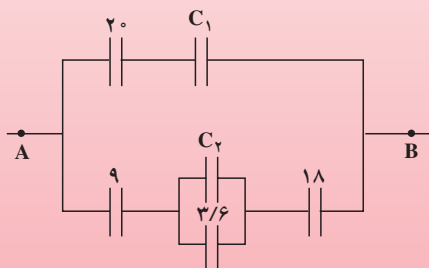
ممکن است در یک مدار، خازن‌ها به صورت پیچیده‌تری به یک‌دیگر وصل شده باشند. با استفاده از محاسبه‌ی ظرفیت خازن‌های موازی و متوالی، می‌توان مدار را ساده کرد و در نهایت، ظرفیت معادل را به دست آورد.

### مثال ۱-۱۷



شکل ۱-۴۰

ظرفیت معادل بین دو نقطه‌ی A و B را در شکل ۱-۴۰ محاسبه کنید. ظرفیت هر خازن برحسب میکروفاراد روی شکل داده شده است.



شکل ۱-۴۱

**حل:** دو خازن  $8\mu F$  و  $12\mu F$  با یک‌دیگر موازی و خازن  $4\mu F$  با  $6\mu F$  به طور متوالی به یک‌دیگر وصل شده‌اند. اگر به جای آن‌ها خازن معادل آن‌ها را قرار دهیم، مدار به صورت شکل ۱-۴۱ ساده می‌شود.

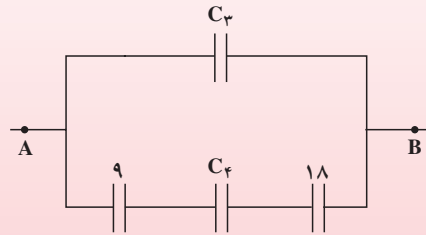
$$C_1 = 12 + 8 = 20 \mu F$$

$$C_2 = \frac{6 \times 4}{6 + 4} = 2.4 \mu F$$

اکنون خازن‌های  $20 \mu F$  میکروفارادی با یک‌دیگر متوالی‌اند و خازن  $C_2$  با خازن  $3/6 \mu F$  میکروفارادی موازی است. مدار به صورت شکل ۴۲-۱ ساده می‌شود.

$$C_3 = \frac{20}{2} = 10 \mu F$$

$$C_4 = 2.4 + 3/6 = 6 \mu F$$



شکل ۴۲-۱

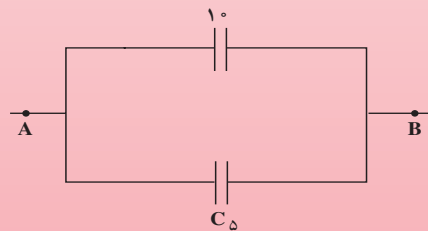
اگر خازن معادل سه خازن  $9 \mu F$ ،  $C_4$  و  $18 \mu F$  را که متوالی‌اند با  $C_5$  نشان دهیم، مدار به صورت شکل ۴۳-۱ ساده می‌شود.

$$\frac{1}{C_5} = \frac{1}{9} + \frac{1}{6} + \frac{1}{18}$$

$$\frac{1}{C_5} = \frac{2 + 3 + 1}{18}$$

$$C_5 = \frac{18}{6} = 3 \mu F$$

$$C_T = 10 + 3 = 13 \mu F$$



شکل ۴۳-۱

## مثال ۱-۱۸

دو خازن به ظرفیت  $C_1 = 2 \mu F$  و  $C_2$  را به یک‌دیگر وصل می‌کنیم و ولتاژ  $100 V$  را به دو سر مجموعه‌ی آن‌ها می‌بندیم. اگر انرژی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها برابر  $25$  میلی‌ژول شود، تعیین کنید که خازن‌ها چگونه به یک‌دیگر وصل شده‌اند. ظرفیت  $C_2$  را نیز محاسبه کنید.

حل: اگر ظرفیت معادل دو خازن برابر  $C_T$  باشد، داریم:

$$U = \frac{1}{2} C_T V^2$$

$$25 \times 10^{-3} = \frac{1}{2} C_T \times 10^4$$

$$C_T = 5 \times 10^{-6} \text{ F} = 5 \mu\text{F}$$

چون ظرفیت معادل از  $C_1$  بزرگ تر است، دو خازن به طور موازی به یکدیگر وصل شده‌اند.

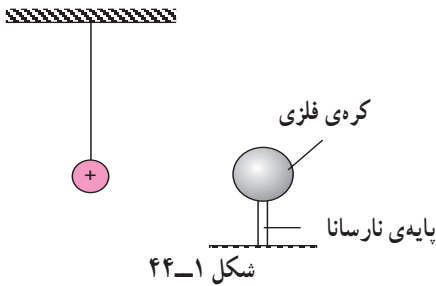
$$C_T = C_1 + C_2$$

$$5 = 2 + C_2$$

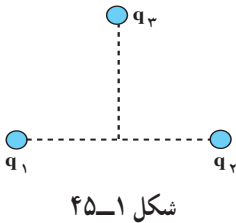
$$C_2 = 3 \mu\text{F}$$

## تمرین‌های فصل اول

۱- یک کره فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه‌ی نارسانایی قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می‌کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می‌افتد.

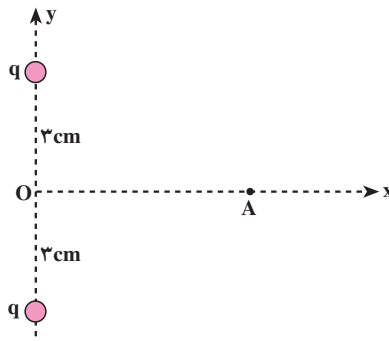


۲- بارهای الکتریکی نقطه‌ای  $q_1 = -4\mu\text{C}$  و  $q_2 = -3\mu\text{C}$  مطابق شکل در فاصله‌ی  $8\text{cm}$  از یک دیگر ثابت شده‌اند. بار نقطه‌ای  $q_3 = -5\mu\text{C}$  را در نقطه‌ای که فاصله‌ی آن از هر یک از دو بار الکتریکی قبلی برابر  $5\text{cm}$  است، قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی وارد بر بار  $q_3$  را محاسبه کنید.



۳- توضیح دهید که چرا خط‌های میدان الکتریکی یکنواخت، به صورت خط‌های راست و موازی با فاصله‌های مساوی با یک‌دیگرند.

۴- دو بار الکتریکی نقطه‌ای هم‌نام  $q = +5\mu\text{C}$  مطابق شکل ۴۶-۱ به فاصله‌ی  $6\text{cm}$  از یک‌دیگر قرار دارند. جهت و اندازه‌ی میدان الکتریکی را در نقطه‌ی A واقع بر عمود منصف خط واصل دوبار، در فاصله‌ی  $4\text{cm}$  از نقطه‌ی O (وسط خط واصل دو بار) مشخص کنید.



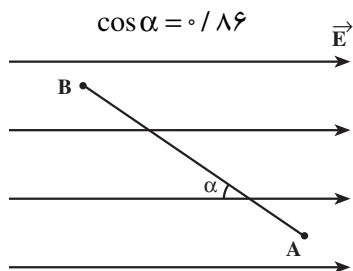
۵- در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی  $\frac{N}{C} \times 10^4 \times 5$  که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره‌ی بارداری به جرم  $2g$  معلق و به حال سکون قرار دارد. اگر  $g = 10 \frac{N}{kg}$  باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.



شکل ۱-۴۷

۶- غلظت الکترون‌ها در ارتفاعات مختلف جو زمین متفاوت است. وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای اطراف زمین باردار می‌شود (شکل ۱-۴۷). این بارها ممکن است موجب آسیب رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شوند. فرض کنید ماهواره‌ی امید در اثر عبور از یکی از لایه‌های جو زمین دارای بار

الکتریکی  $q = 2/05 \times 10^{-9} C$  شود. این ماهواره مکعبی به ابعاد  $40cm \times 40cm \times 40cm$  است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود.)



شکل ۱-۴۸

۷- بار  $q = +5\mu C$  را به آرامی و با سرعت ثابت در میدان الکتریکی یکنواخت  $\frac{N}{C} \times 10^5 \times 8$  مطابق شکل ۱-۴۷ از نقطه‌ی A تا B جابه‌جا می‌کنیم. اگر  $AB = 2m$  و  $\alpha = 30^\circ$  درجه باشد:

الف - نیروی الکتریکی وارد بر بار  $q$ ،

ب - کاری که برای این جابه‌جایی باید انجام دهیم،

پ - تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$  را حساب کنید.

۸- دو صفحه‌ی رسانا با فاصله‌ی  $2cm$  را موازی یک‌دیگر قرار می‌دهیم و آن‌ها را به اختلاف پتانسیل  $100V$  وصل می‌کنیم. در نتیجه، یکی از صفحه‌ها به طور منفی و دیگری به طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی بوجود می‌آید. اندازه‌ی این میدان الکتریکی را حساب کنید و توضیح دهید که کدام یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیشتری دارند.

۹- در یک میدان الکتریکی، بار  $q = +2\mu C$  از نقطه‌ی A تا B جابه‌جا می‌شود. اگر انرژی پتانسیل آن در نقطه‌های A و B به ترتیب  $J \times 10^{-5} \times 4 -$  و  $J \times 10^{-5} \times 5$  باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی



میان دو نقطه  $(V_B - V_A)$  را محاسبه کنید.

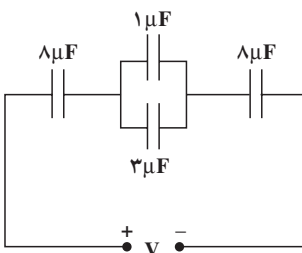
۱۰- بار الکتریکی  $q = -4\mu C$  از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی  $V_1 = -40V$  تا نقطه‌ای با پتانسیل  $V_2 = -10V$  آزادانه جابه‌جا می‌شود. الف - انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$  چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟ ب - توضیح دهید که تغییر انرژی پتانسیل بار  $q$  (با توجه به قانون پایستگی انرژی) به چه انرژی‌ای تبدیل می‌شود؟

۱۱- دو صفحه‌ی رسانا به فاصله‌ی یک سانتی‌متر از هم و موازی یک‌دیگر واقع‌اند. اختلاف پتانسیل میان دو صفحه برابر  $1000V$  است. یک ذره به بار  $10^{-19}C$  و جرم  $10^{-27}kg$  از یک پروتون) از مجاور صفحه‌ی مثبت و از حال سکون به طرف صفحه‌ی منفی شتاب می‌گیرد. انرژی پتانسیل الکتریکی این ذره وقتی به صفحه‌ی روبرو می‌رسد، افزایش می‌یابد یا کاهش؟ اندازه‌ی تغییرات این انرژی را حساب کنید. سرعت ذره در لحظه‌ی رسیدن به این صفحه چه قدر است؟

۱۲- اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی یک خازن را از  $28V$  به  $40V$  افزایش می‌دهیم. اگر با این کار  $15$  میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید. ۱۳- دو صفحه‌ی مربعی شکل به ضلع  $16cm$  در فاصله‌ی  $2mm$  از یک‌دیگر قرار دارند. فضای بین دو صفحه از پارافین با ضریب دی‌الکتریکی  $2/5$  پر شده است. ظرفیت خازن حاصل چه اندازه است؟

۱۴- خازنی به ظرفیت  $C_1 = 5\mu F$  با اختلاف پتانسیل  $120V$  و خازنی به ظرفیت  $C_2 = 10\mu F$  با اختلاف پتانسیل  $75V$  ولت پر شده‌اند. اگر این خازن‌های پر را از مدار اصلی آن‌ها جدا و صفحه‌های هم‌نام آن‌ها را به هم وصل کنیم، الف - اختلاف پتانسیل بین دو صفحه و بار ذخیره شده در هر خازن چه اندازه می‌شود؟

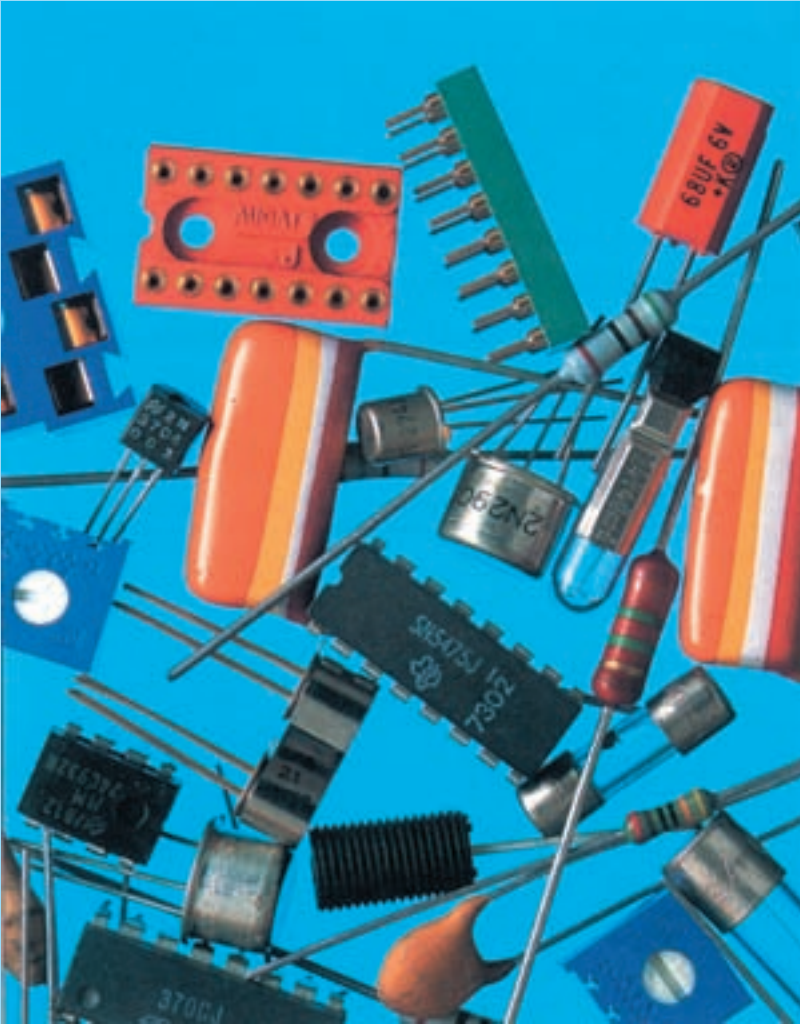
ب - مجموع انرژی ذخیره شده در دو خازن را قبل و بعد از اتصال به یک‌دیگر محاسبه و با هم مقایسه کنید.



۱۵- در مدار شکل ۱-۴۹ اختلاف پتانسیل در سر مدار برابر  $10V$  است.

الف - ظرفیت معادل مدار  
ب - بار الکتریکی و اختلاف پتانسیل دو سر هر یک از خازن‌ها را حساب کنید.

شکل ۱-۴۹



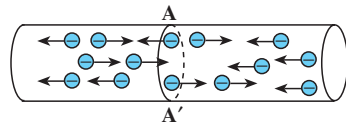
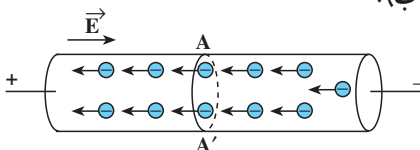
شکل بالا تعدادی از قطعات مورد استفاده در مدارهای الکتریکی و الکترونیکی را نشان می‌دهد.

## جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

در فصل اول، مفهوم‌های بار الکتریکی، میدان الکتریکی و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از میدان الکتریکی را معرفی کردیم و به بررسی پاره‌ای از ویژگی‌های بار الکتریکی ساکن پرداختیم. در این فصل آثار ناشی از حرکت بارهای الکتریکی – یعنی پدیده‌ی شارش بار – در مواد رسانا را بررسی خواهیم کرد و خواهیم دید که شارش بار در رسانا سبب انتقال انرژی در آن می‌شود. این انرژی به انرژی‌های دیگر نظیر انرژی درونی، انرژی مکانیکی و انواع دیگر انرژی تبدیل می‌شود.

## ۲-۱- جریان الکتریکی

در فیزیک ۱ دیدیم که رسانایی فلزها به دلیل وجود الکترون‌های آزاد است که در داخل آن‌ها با سرعت‌های متفاوت به طور کاتوره‌ای در حرکت‌اند. تا زمانی که اختلاف پتانسیل الکتریکی به دو سر رسانا اعمال نشده باشد، الکترون‌های آزادی که در بازه‌ی زمانی  $\Delta t$  از مقطع  $AA'$  (شکل ۲-۱-الف) از راست به چپ در حرکت‌اند، با الکترون‌های آزادی که در همان بازه‌ی زمانی از همان مقطع از چپ به راست حرکت می‌کنند، برابرند؛ یعنی، به طور متوسط بار خالصی که از مقطع  $AA'$  یا هر مقطع عرضی دیگر رسانا می‌گذرد، در یک بازه‌ی زمانی صفر است. هنگامی که دو سر رسانا را به باتری وصل و به این وسیله به دو سر آن اختلاف پتانسیل اعمال می‌کنیم، یک میدان الکتریکی در داخل رسانا ایجاد می‌شود. این میدان به الکترون‌های آزاد درون رسانا نیرو وارد می‌کند و آن‌ها را به خلاف جهت میدان سوق می‌دهد (چرا؟) (شکل ۲-۱-ب).



وقتی در دو سر رسانا اختلاف پتانسیلی اعمال می‌شود، شارش بار خالص از مقطع  $AA'$  صفر نیست.

وقتی در دو سر رسانا اختلاف پتانسیل وجود ندارد، شارش بار خالص از مقطع  $AA'$  صفر است.

ب

شکل ۲-۱

الف

در این حالت، بار خالصی که از هر مقطع عبور می‌کند صفر نیست و می‌گوییم در رسانا شارش بار وجود دارد. به عبارت دیگر، در آن جریان الکتریکی برقرار شده است.

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که جریان الکتریکی در خلاف جهت شارش الکترون‌ها است یعنی جریان الکتریکی در جهت میدان الکتریکی است و چون پتانسیل در جهت میدان کاهش می‌یابد، جهت جریان الکتریکی از پتانسیل بیش‌تر به پتانسیل کم‌تر است.

بار شارش شده در واحد زمان را **شدت جریان متوسط** گویند. اگر در بازه‌ی  $\Delta t$  بار  $\Delta q$  در رسانا شارش کرده باشد، شدت جریان متوسط از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید :

$$\bar{I} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1-2)$$

همان‌طور که می‌دانید، یکای شدت جریان، آمپر نام دارد.

اگر در تمام بازه‌های زمانی شدت جریان متوسط ثابت بماند، جریان را **مستقیم** می‌نامند. در این صورت، شدت جریان لحظه‌ای با شدت جریان متوسط برابر می‌شود. در این حالت، رابطه‌ی (۱-۲) به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$I = \frac{q}{t} \quad (2-2)$$

در این رابطه،  $q$  بار شارش شده در مدت  $t$  برحسب کولن و  $t$  برحسب ثانیه و  $I$ ، شدت جریان برحسب آمپر است.

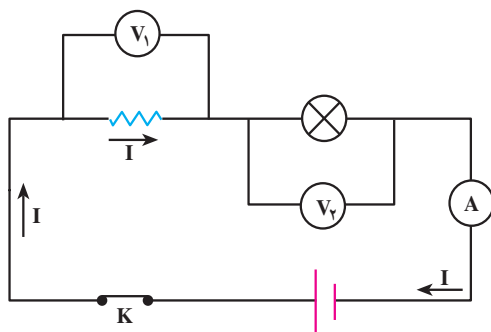
در رابطه‌ی  $q=It$  اگر  $I$  برحسب آمپر و  $t$  برحسب ساعت باشد، مقدار بار برحسب آمپر ساعت به‌دست می‌آید.

## فعالیت ۱-۲

بار ذخیره شده در باتری‌های اتومبیل را معمولاً با آمپر ساعت مشخص می‌کنند. منظور از این اصطلاح بیشینه‌ی بار الکتریکی است که در باتری ذخیره می‌شود. اگر بار الکتریکی باتری یک اتومبیل ۶۰ آمپر ساعت باشد و در مدت ۱۰ ساعت از آن جریان بگیریم، شدت جریان متوسط را برآورد کنید.

برای آن که جریان الکتریکی برقرار شود، باید بار در یک مسیر بسته شارش کند. این مسیر بسته را مدار الکتریکی می‌نامیم. مدارهای الکتریکی‌ای که در این فصل بررسی می‌کنیم، شامل رساناهای

فلزی (سیم یا لامپ رشته‌ای)، منبع تأمین انرژی الکتریکی (باتری یا پیل یا منبع تغذیه)، کلید قطع و وصل، وسیله‌های اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل (آمپرسنج و ولت‌سنج) است. این قطعه‌ها را اجزای مدار الکتریکی می‌نامند و برای رسم هر یک نمادی را به‌طور قراردادی به‌کار می‌برند. شما در کتاب فیزیک ۱ با این نمادها آشنا شده‌اید. شکل ۲-۲ یک مدار الکتریکی و طرز قرار گرفتن آمپرسنج و ولت‌سنج را در این مدار نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲

## ۲-۲- قانون اهم

همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدید، بنا به قانون اهم نسبت اختلاف پتانسیل دو سر رسانای فلزی به شدت جریانی که از آن می‌گذرد، در دمای ثابت، مقدار ثابتی است. این نسبت را مقاومت الکتریکی رسانا می‌نامند و یکای آن اهم با نماد  $\Omega$  است.

$$\frac{V}{I} = R \quad (۲-۳)$$

مقاومت را با وسیله‌ای به نام اهم‌سنج اندازه می‌گیرند. این وسیله همراه با ولت‌سنج و آمپرسنج یک دستگاه را تشکیل می‌دهند که آوومتر (AVOmetre، A برای آمپر، V برای ولت و O برای اهم) نامیده می‌شود.

## ۲-۳- عوامل مؤثر در مقاومت رساناهای فلزی

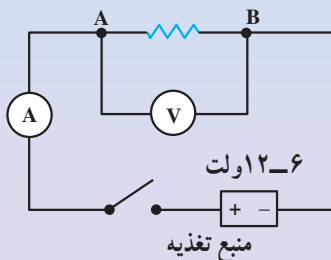
مقاومت یک رسانای فلزی در دمای ثابت به طول، سطح مقطع و جنس آن بستگی دارد. برای بررسی رابطه‌ی مقاومت رسانا با عوامل یاد شده آزمایش ۲-۱ را انجام دهید.

## آزمایش ۲-۱

وسایلهای آزمایش: منبع تغذیه، سیم رابط، سیم‌هایی از جنس تنگستن، نیکروم (یا آلیاژهای مختلف دیگر)، آمپرسنج، ولت‌سنج، کلید.

۱- در مداری مطابق شکل ۲-۳ بین دو نقطه‌ی A و B قطعه‌ای با طول معین (مثلاً ۱/۵ متر) از سیم تنگستن یا نیکروم را قرار دهید. پس از بستن کلید، اختلاف پتانسیل دو سر سیم و شدت جریانی را که از مدار می‌گذرد، اندازه بگیرید و با استفاده از قانون اهم ( $V/I = R$ )، مقاومت قطعه سیم را به دست آورید.

در آزمایشی دیگر، از همان سیم تنگستن قطعه‌ای به طول  $\frac{1}{4}$  یا  $\frac{1}{3}$  طول قبلی را بین دو نقطه‌ی A و B قرار دهید و با اندازه‌گیری V و I مقاومت قطعه‌ی اخیر را به دست آورید. نتیجه را در جدول ثبت کنید.



شکل ۲-۳

۲- آزمایش را با دو قطعه سیم هم طول و با سطح مقطع یکسان یکی از جنس تنگستن و دیگری از جنس نیکروم تکرار کنید و نتیجه را در جدول بنویسید.

— این بار با انجام دادن دو آزمایش با سیم‌های هم طول از یک جنس ولی با سطح مقطع‌های متفاوت، به همان ترتیب، مقاومت هر یک از سیم‌ها را به دست آورید و ارقام را در جدول ثبت کنید.

شماره‌ی آزمایش	جنس سیم	طول سیم l	سطح مقطع سیم A	I	V	$\frac{V}{I} = R$

نتیجه‌های به دست آمده را با یک‌دیگر مقایسه کنید و به کلاس گزارش دهید.

آزمایش ۱-۲ نشان می‌دهد که اگر سطح مقطع سیم در تمام طول آن یکسان باشد، رابطه‌ی مقاومت سیم با سایر ویژگی‌های آن به صورت زیر است.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (۴-۲)$$

در این رابطه،  $\rho$  مربوط به جنس سیم است و مقاومت ویژه‌ی رسانا نام دارد. مقاومت ویژه‌ی هر فلز، مقاومت قطعه‌ای از آن فلز است به طول یک متر و به سطح مقطع یک مترمربع.  $l$  طول سیم برحسب متر و  $A$  سطح مقطع سیم برحسب مترمربع است.

## تمرین ۱-۲

طول و قطر سیم مسی  $A$  دو برابر طول و قطر سیم مسی  $B$  است. مقاومت سیم  $A$  چند برابر مقاومت سیم  $B$  است؟

مقاومت ویژه‌ی پاره‌ای از رساناها – مانند نقره و مس – کم و پاره‌ای دیگر – مانند تنگستن و آهن – نسبتاً زیاد است.

## فعالیت ۲-۲

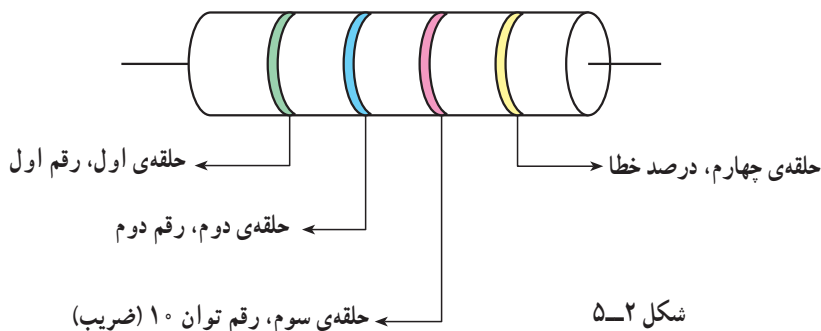
آزمایشی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه‌ی فلز طراحی کنید و توضیح دهید که چگونه می‌توانید دقت اندازه‌گیری را افزایش دهید.

**کُگذاری مقاومت‌ها:** مقاومت‌های الکتریکی را برای مصرف‌های مختلف می‌سازند. کارخانه‌های سازنده برای سهولت در تولید، مقاومت‌های خاصی را به عنوان استاندارد انتخاب می‌کنند و می‌سازند. مقدار این مقاومت‌ها را با استفاده از حلقه‌های رنگی روی آنها مشخص می‌کنند. در انتها نیز با یک حلقه‌ی طلایی یا نقره‌ای درصد خطا را مشخص می‌کنند. در این نوع مقاومت‌ها اغلب از کربن هم استفاده می‌شود؛ به این دلیل آن‌ها را **مقاومت کربنی** نیز می‌گویند.



شکل ۲-۴

در روی مقاومت کربنی چهار حلقه‌ی رنگی مشاهده می‌شود (شکل ۲-۵). حلقه‌ی طلایی یا نقره‌ای را سمت راست قرار می‌دهیم و حلقه‌ها را از سمت چپ به ترتیب رقم اول و رقم دوم و سوم نام‌گذاری می‌کنیم. هر رنگ معرف عددی است؛ این اعداد در جدول ۲-۱ آورده شده‌اند. حلقه‌ی اول از سمت چپ رقم اول و حلقه‌ی دوم، رقم دوم مقاومت را نشان می‌دهد. رقم سوم ضریب مقاومت به صورت  $10^n$  است که  $n$  در ستون چهارم جدول ۲-۱ داده شده است. حلقه‌ی چهارم درصد خطا را در تعیین مقاومت مشخص می‌کند. به عنوان مثال فرض کنید حلقه‌ی اول قرمز و حلقه‌ی دوم بنفش و حلقه‌ی سوم سیاه است. قرمز معرف عدد ۲ و بنفش معرف عدد ۷ است. تا این جا مشخص می‌شود که دو رقم اول مقدار مقاومت مورد نظر ۲۷ است. چون حلقه‌ی سوم سیاه است،  $n=0$  و اندازه‌ی مقاومت  $27\Omega$  است.



شکل ۲-۵



به جدول زیر توجه کنید. (حفظ کردن ارقام این جدول ضرورت ندارد.)

جدول ۱-۲

رنگ حلقه	حلقه‌ی اول رقم اول	حلقه‌ی دوم رقم دوم	حلقه‌ی سوم عدد n در $10^n$
سیاه	۰	۰	۰
قهوه‌ای	۱	۱	۱
قرمز	۲	۲	۲
نارنجی	۳	۳	۳
زرد	۴	۴	۴
سبز	۵	۵	۵
آبی	۶	۶	۶
بنفش	۷	۷	۷
خاکستری	۸	۸	—
سفید	۹	۹	—

## مثال ۱-۲

اندازه‌ی مقاومت زیر چند اهم است؟

حل: با توجه به جدول ۱-۲، رنگ سبز عدد ۵ و رنگ آبی عدد ۶ را نشان می‌دهد

و چون قرمز معرف ۲ است:

$$R = \overline{ab} \times 10^n \rightarrow \text{رقم سوم}$$

$\swarrow$  رقم اول  
 $\swarrow$  رقم دوم

$$R = 56 \times 10^2 = 5600 \Omega$$



شکل ۲-۶

## آزمایش ۲-۲

وسیله‌های آزمایش: اهم‌تر، تعدادی مقاومت مختلف  
به کمک اعضای گروه خود ابتدا با استفاده از جدول و سپس با به‌کارگیری  
اهم‌تر مقاومت ده نمونه از مقاومت‌هایی را که در آزمایشگاه در اختیار شماست،  
به‌دست آورید و نتیجه را در جدول قرار دهید.

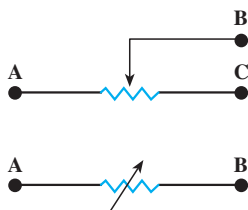
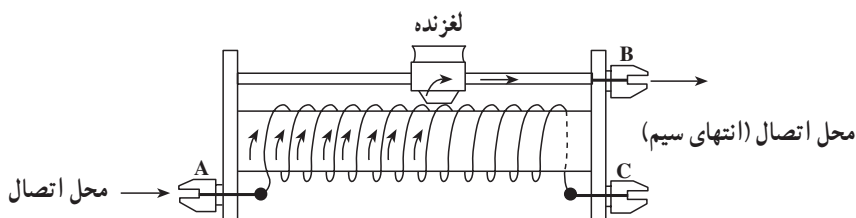
$\Delta R$	R از روی رنگ‌ها	R با استفاده از اهم‌سنج	ردیف

مقاومت‌های کربنی معمولاً با توان کم – بین ۱ تا ۲ وات – کار می‌کنند. اندازه‌های استاندارد  
آن‌ها نیز عمدتاً به‌صورت زیر است.

$$R = (1/7, 2/7, 3/9, 4/7, 5/6, 6/8, 8/2, 10, 12, 15, 18, 22) \times 10^n$$

$$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

استفاده از مقاومت متغیر برای کنترل جریان: معمولاً در آزمایشگاه برای تنظیم و کنترل  
جریان از یک مقاومت متغیر استفاده می‌کنند. این وسیله رئوستا نام دارد. در شکل ۲-۷ یک رئوستا  
را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که می‌بینید، این وسیله از یک سیم دراز با مقاومت ویژه نسبتاً زیاد  
(تنگستن) تشکیل می‌شود. این سیم روی استوانه‌ای نارسانا پیچیده شده است. با استفاده از یک  
دکمه‌ی لغزنده که روی ریلی در بالای استوانه قرار دارد و انتهای آن با سیم در تماس است، می‌توان  
قسمت‌های دلخواه از سیم را در مسیر جریان قرار داده و مقاومت را به‌دلخواه تغییر داد. به این  
ترتیب، می‌توان جریان را در مدار کنترل کرد. رئوستا به‌صورت‌های دیگری از جمله به شکل دایره‌ای  
ساخته می‌شود. در این صورت، لغزنده به‌صورت عقربه‌ای در مرکز دایره قرار می‌گیرد. برای استفاده



شکل ۷-۲

از رئوس تا ابتدا آن را با بیشترین مقدار مقاومت در مدار قرار می‌دهند. سپس با لغزنده، مقاومت مناسب را برای جریان مورد نظر تنظیم می‌کنند.

از جعبه‌ی مقاومت نیز می‌توان به‌عنوان مقاومت متغیر استفاده کرد. ساختمان این جعبه به‌گونه‌ای است که با برداشتن فیش مربوط به هریک از مقاومت‌ها، آن مقاومت در مسیر جریان برق قرار می‌گیرد.



شکل ۸-۲



شکل ۹-۲

## ۴-۲- اثر دما بر مقاومت رساناهای فلزی

تجربه نشان می‌دهد که مقاومت ویژه‌ی رساناها به دمای آن‌ها بستگی دارد. در رساناهای فلزی افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه و در نتیجه، افزایش مقاومت رسانا می‌شود. اگر افزایش دما زیاد نباشد، رابطه‌ی مقاومت ویژه با افزایش دما به صورت زیر است.

$$\rho_T = \rho_1 (1 + \alpha \Delta T) \quad (۵-۲)$$

$\rho_1$  مقاومت ویژه در دمای  $\theta_1$  و  $\rho_T$  مقاومت ویژه در دمای  $\theta_T = \theta_1 + \Delta T$  است.  $\alpha$  ضریب دمایی مقاومت ویژه برحسب  $K^{-1}$  (بر کلونین) است.

با استفاده از رابطه‌های ۴-۲ و ۵-۲، رابطه‌ی زیر برای مقاومت رسانا به دست می‌آید:

$$R_T = R_1 (1 + \alpha \Delta T) \quad (۶-۲)$$

جدول ۲-۲ ضریب دمایی و مقاومت ویژه را در دمای  $20^\circ C$  برای چند فلز نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲

رسانا	مقاومت ویژه $\Omega m$	ضریب دمایی $K^{-1}$
نقره	$1.59 \times 10^{-8}$	$0.0061$
مس	$1.68 \times 10^{-8}$	$0.0068$
آلومینیم	$2.65 \times 10^{-8}$	$0.00429$
تنگستن	$5.6 \times 10^{-8}$	$0.0045$
آهن	$9.7 \times 10^{-8}$	$0.00651$
آلیاژ کرم و نیکل	$1.00 \times 10^{-8}$	$0.0004$

### مثال ۲-۲

مقاومت سیم مسی به طول  $6/28 m$  و به قطر  $4/^\circ$  میلی‌متر را با استفاده از جدول ۲-۲ در دمای  $20^\circ C$  محاسبه کنید.

حل: مساحت مقطع سیم از رابطه‌ی  $A = \pi r^2$  به دست می‌آید؛ بنابر رابطه‌ی

۴-۳ می‌توان نوشت:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{\pi r^2}$$

$$R = \frac{1}{68 \times 10^{-8}} \frac{6/28}{(3/14(0/2 \times 10^{-3}))^2} =$$

$$R = 0/84 \Omega \quad \text{مقاومت سیم}$$

## مثال ۳-۲

مقاومت سیمی از آلیاژ کرم و نیکل در دمای  $2^\circ\text{C}$  برابر  $10 \Omega$  است. مقاومت این قطعه در دمای  $100^\circ\text{C}$  چه اندازه است؟  
حل: بنا به رابطه ی ۲-۶ می توان نوشت:

$$R_T = R_1(1 + \alpha \Delta T)$$

مقاومت در دمای  $100^\circ\text{C}$  برابر است با:

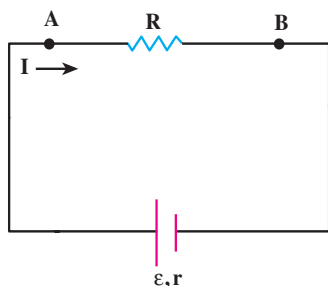
$$R_T = 10(1 + 0/0004 \times 80) = 10(1/032) = 10/32 \Omega$$

**افت پتانسیل در مقاومت:** دیدیم که با اعمال اختلاف پتانسیل در دو سر یک رسانا، در درون آن یک میدان الکتریکی برقرار می گردد. این میدان باعث شارش بار می شود. جهت میدان الکتریکی در داخل رسانا از پایانه ی مثبت باتری به طرف پایانه ی منفی آن است.

در فصل قبل، دیدیم که پتانسیل در جهت میدان کاهش می یابد؛ یعنی، وقتی از پایانه ی مثبت باتری به طرف پایانه ی منفی آن می رویم، پتانسیل الکتریکی کاهش می یابد، در این صورت، می گویند که در رسانا افت پتانسیل ایجاد شده است. اگر مقاومت الکتریکی رسانا کوچک باشد، بر طبق قانون اهم این افت پتانسیل ناچیز است؛ مثلاً در بستن مدار از سیم های رابط با مقاومت کم استفاده می کنیم تا بتوانیم از افت پتانسیل در آن ها صرف نظر کنیم ولی هنگامی که یک قطعه با مقاومت قابل توجه در مدار قرار دارد – مانند مقاومت  $R$  در شکل ۲-۱۰ – افت پتانسیل قابل ملاحظه است و مقدار آن طبق رابطه ی ۲-۳ برابر می شود با:

$$\Delta V = V_B - V_A = -IR \quad (2-7)$$

در این رابطه  $I$  جریانی است که از مقاومت  $R$  می گذرد.



شکل ۲-۱۰

## ۵-۲- محاسبه‌ی انرژی الکتریکی مصرف‌شده در یک مقاومت

در فصل قبل، دیدیم هنگامی که بار مثبت  $q$  در جهت میدان الکتریکی یکنواخت حرکت می‌کند، انرژی پتانسیل آن به اندازه‌ی  $q\Delta V$  کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، اگر بار  $q$  از مقاومت  $R$  در شکل ۲-۱ عبور کند، انرژی پتانسیل الکتریکی آن به اندازه‌ی  $\Delta U = q\Delta V$  کاهش می‌یابد. این کاهش انرژی صرف افزایش انرژی جنبشی بارها می‌شود. در اثر برخورد آن‌ها با اتم‌ها، این انرژی به اتم‌های رسانا منتقل می‌شود و انرژی درونی رسانا را افزایش می‌دهد. در نتیجه، رسانا در اثر عبور جریان گرم می‌شود. در یک لامپ، بخشی از انرژی پتانسیل الکتریکی به انرژی نورانی و در موتور الکتریکی به انرژی مکانیکی و انرژی درونی تبدیل می‌شود.

اکنون اگر جریان ثابت  $I$  در مدت  $t$  ثانیه در سیمی به مقاومت  $R$  برقرار باشد، بنابراین چه گفته شد، انرژی پتانسیل الکتریکی  $U$  که به انرژی درونی رسانا تبدیل می‌شود از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$U = qV \quad (۲-۸)$$

در این رابطه،  $V$  اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت  $R$  و  $U$  انرژی است که بار هنگام عبور از سیم از دست می‌دهد. با جای‌گذاری به جای  $q$  و  $V$ ، داریم:

$$U = (It)(RI) = RI^2t \quad (۲-۹)$$

### مثال ۲-۴

مقاومت سیم گرم‌کن یک اتوی برقی  $50\ \Omega$  و جریانی که از آن می‌گذرد  $4$  آمپر است. در مدت  $15$  دقیقه، چند ژول و چند کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در آن مصرف می‌شود؟

حل: بنابر رابطه‌ی ۲-۹ می‌توان نوشت:

$$U = RI^2t \Rightarrow U = 50 \times 16 \times 900$$

$$U = 72 \times 10^4 \text{ ژول}$$

$$U = \frac{72 \times 10^4}{36 \times 10^5} = 0.2 \text{ کیلووات ساعت}$$

### فعالیت ۳-۲

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوان درستی رابطه ی  $U = RI^2t$  را تحقیق کرد.

### تمرین ۲-۲

در دو سرب یک سیم نیکروم (آلیاژ کرم و نیکل) به طول ۵ متر و سطح مقطع  $4/0$  میلی مترمربع، اختلاف پتانسیل  $200$  ولت را برقرار کرده ایم. در هر نیم ساعت چند کیلوژول انرژی الکتریکی در این سیم به انرژی درونی تبدیل می شود؟ مقاومت ویژه ی نیکروم  $1 \times 10^{-6} \Omega m$  است.

توان الکتریکی مصرف شده در یک مقاومت: در فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندید که توان از رابطه ی زیر به دست می آید و یکای آن ژول بر ثانیه است که وات نامیده می شود.

$$P = \frac{U}{t} \quad (10-2)$$

بنابر رابطه ی ۲-۸ داریم:

$$P = \frac{qV}{t} = VI \quad (11-2)$$

با استفاده از رابطه ی ۲-۳، رابطه ی ۲-۱۱ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (12-2)$$

$$P = RI^2 \quad (13-2)$$

### فعالیت ۴-۲

با یک اهم متر، مقاومت رشته ی سیم داخل لامپ  $100$  وات را اندازه گیری کنید.



شکل ۲-۱۱

سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱۲-۲ و با داشتن مشخصات روی لامپ مقاومت آن را محاسبه کنید. نتیجه‌ی محاسبه را با مقدار اندازه‌گیری مقایسه کنید و نتیجه را پس از بحث گروهی گزارش دهید.

## ۵-۲ فعالیت

با استفاده از نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از فعالیت ۴-۲، دمای رشته‌ی سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشته سیم لامپ از جنس تنگستن است. ضریب دمایی آن را با مراجعه به جدول ۱-۲ به‌دست آورید).

## ۵-۲ مثال

بر روی یک بخاری برقی رقم‌های  $۲۲۰\text{V}$  و  $۱۵۰۰\text{W}$  ثبت شده است. الف - این بخاری هنگامی که به ولتاژ  $۲۲۰$  ولت وصل است، در هر دقیقه چه مقدار انرژی الکتریکی برحسب کیلووات ساعت مصرف می‌کند؟ ب - مقاومت سیم گرم‌کن آن چند اهم است؟

حل: الف - بنا به رابطه‌ی ۱۰-۲ داریم:

$$U = Pt \Rightarrow U = ۱۵۰۰ \times ۶۰ = ۹ \times ۱۰^4 \text{ J}$$

$$U = \frac{۹ \times ۱۰^4}{۳/۶ \times ۱۰^6} = \frac{۹}{۳/۶ \times ۱۰^2} = \frac{۱}{۴۰} = ۰/۰۲۵ \text{ kWh}$$

ب - با استفاده از رابطه‌ی ۱۲-۲

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow ۱۵۰۰ = \frac{۲۲۰ \times ۲۲۰}{R}$$

$$R = \frac{۲۲ \times ۲۲}{۱۵} = ۳۲/۲۶ \Omega$$



## تمرین ۲-۳

روی یک لامپ الکتریکی رقم‌های  $220\text{V}$  و  $100\text{W}$  ثبت شده است.  
الف) انرژی الکتریکی مصرفی این لامپ هنگامی که به ولتاژ  $220\text{V}$  ولت متصل است، در مدت  $10$  ساعت چند کیلووات ساعت است؟  
ب) اگر این لامپ به اختلاف پتانسیل  $180\text{V}$  ولت وصل شود، با فرض ثابت ماندن مقاومت توان مصرفی آن چه قدر می‌شود؟

## مطالعه‌ی آزاد

### آثار تخریبی الکتریسیته بر بدن انسان

بررسی آثار الکتریسیته بر بدن انسان از دو جنبه اهمیت دارد. نخست آن که در بسیاری از موارد در اثر بی‌احتیاطی و یا حادثه‌های پیش‌بینی نشده، افرادی در معرض شوک الکتریکی قرار می‌گیرند، و دیگر اینکه برای برخی از بیماری‌ها می‌توان از شوک الکتریکی به عنوان یکی از راه‌های معالجه بهره جست.

تجربه نشان داده است که آثار تخریبی با شدت جریان الکتریکی متناسب است نه با ولتاژ. می‌دانیم که شدت جریان الکتریکی با ولتاژ نسبت مستقیم و با مقاومت الکتریکی نسبت عکس دارد.

در بیشتر موارد در حوادث برق‌گرفتگی، تماس بدن با منبع ولتاژ کامل نیست، و مقاومت الکتریکی زیاد منطقه‌ی تماس باعث می‌شود که شدت جریانی که شارش می‌کند بسیار کوچک باشد. ولی اگر شخصی بر زمین خیس و یا در آب ایستاده باشد و بین نقطه‌ای از بدن او با منبع ولتاژ تماس خوبی برقرار شود، جریان نسبتاً زیادی از بدن وی عبور خواهد کرد. در این صورت حتی اگر ولتاژ کم هم باشد، جریان می‌تواند آن قدر زیاد باشد که موجب مرگ شود. از سوی دیگر اگر مقاومت الکتریکی منطقه‌ی تماس زیاد باشد و مثلاً شخصی بر پایه‌های عایق ایستاده باشد، این خطر وجود ندارد. حتی در ولتاژ زیاد هم که جریان مقدار قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند تنها در محل تماس که مقاومت الکتریکی زیاد است گرمای زیادی ایجاد می‌شود و سوختگی‌های سطحی پوستی روی خواهد داد.

دستگاه مرکزی اعصاب انسان در مقابل حادثه‌های الکتریکی بسیار آسیب‌پذیر است. اگر جریانی که در یک شوک الکتریکی از مغز می‌گذرد بزرگ باشد، حتی ممکن است منجر به بیهوشی کامل و حتی در برخی موارد موجب فراموشی می‌شود. به طوری که بیمار زمان‌های قبل از وقوع حادثه را نیز به یاد نمی‌آورد. مرگ در اثر شوک الکتریکی معمولاً در اثر ایست قلبی یا تنفسی روی می‌دهد.

## ۲-۶- نیروی محرکه‌ی مولد

بارهای الکتریکی ضمن شارش در مدار، انرژی جنبشی‌ای را که به دست آورده‌اند از دست می‌دهند. کارمولد این است که این انرژی را دوباره تأمین کند. همان‌طور که دیدیم، بارهای الکتریکی در رسانا از پتانسیل بالاتر به پتانسیل پایین‌تر شارش می‌کنند و وارد مولد می‌شوند. مولد با صرف انرژی، بارهای الکتریکی را از پتانسیل پایین‌تر به پتانسیل بالاتر سوق می‌دهد و سبب شارش آن‌ها در مدار می‌شود. بارهای الکتریکی هنگام شارش در رسانا، انرژی خود را از دست می‌دهند. برای این‌که شارش بار در مدار تداوم یابد، این انرژی باید به وسیله‌ی مولد تأمین شود. همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندید، کارمولد در این مورد نظیر کار تلمبه‌ای است که آب را از سطح زمین یا عمق چاه (پتانسیل گرانشی پایین‌تر) تا ارتفاع معینی (پتانسیل گرانشی بالاتر) بالا می‌برد. با این کار، آب انرژی پتانسیل لازم را برای جریان یافتن و به کار انداختن یک پروانه (توربین) کسب می‌کند. تا زمانی که مولد بتواند انرژی لازم را به بارهای الکتریکی بدهد، شارش و در نتیجه، جریان الکتریکی در مدار ادامه می‌یابد.

انرژی‌ای را که مولد به واحد بار الکتریکی (یعنی یک کولن) می‌دهد تا در مدار شارش کند، نیروی محرکه‌ی مولد نامیده می‌شود. اگر مولد انرژی  $U$  را به بار  $q$  بدهد تا آن‌را از پایانه‌ی منفی به پایانه‌ی مثبت منتقل کند، بنا به تعریف نیروی محرکه‌ی مولد - که آن‌را با نماد  $\mathcal{E}$  نشان می‌دهیم - می‌توان نوشت:

$$\mathcal{E} = \frac{U}{q} \quad (۲-۱۴)$$

یکای نیروی محرکه ژول بر کولن ( $\frac{J}{C}$ ) است و ولت<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در نتیجه، انرژی‌ای که مولد به بار  $q$  می‌دهد، برابر  $\mathcal{E}q$  است.

۱-واژه‌ی ولت به افتخار الکساندر ولتا، سازنده‌ی اولین پیل الکتریکی، انتخاب شده است.

## ۷-۲ مدارهای تک حلقه

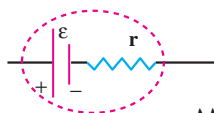
یک مدار الکتریکی ساده‌ی تک حلقه از یک یا چند مولد و یک یا چند مقاومت تشکیل شده است که یکی پس از دیگری به کمک سیم‌های رابط (که بدون مقاومت الکتریکی فرض می‌شوند) به دنبال هم بسته شده‌اند. شدت جریان در تمام قسمت‌های مدار یکسان است.

### تمرین ۴-۲

با استفاده از قانون پایستگی بار، توضیح دهید چرا در مدار تک حلقه شدت جریان در همه‌ی قسمت‌های مدار یکسان است؟

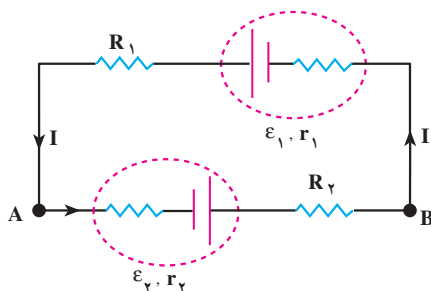
در این بخش، قاعده‌ی کلی برای محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار و محاسبه‌ی شدت جریان مدار را شرح می‌دهیم.

هر مولد دارای مقاومتی است که آن را با نماد  $(r)$  نشان می‌دهیم و آن را مقاومت درونی مولد می‌نامیم. در شکل ۱۲-۲ یک مولد به نیروی محرکه‌ی  $\mathcal{E}$  و مقاومت درونی  $r$  نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۲

الف — محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار: شکل ۱۳-۲ یک مدار تک حلقه را نشان می‌دهد. مدار شامل مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  و مولدهای  $\mathcal{E}_1$  و  $\mathcal{E}_2$  است.



شکل ۱۳-۲

با توجه به آن چه در بخش های قبل توضیح داده شد، معلوم می شود که تغییر پتانسیل (یعنی کاهش یا افزایش پتانسیل) بین دو نقطه از مدار به جهت جریان و اجزایی که بین آن دو نقطه قرار دارند، بستگی دارد.

در مداری که در شکل ۲-۱۳ می بینید، اگر بار الکتریکی  $q$  از نقطه ی  $A$  در جهت نشان داده شده حرکت کند، انرژی پتانسیل آن هنگام عبور از باتری به اندازه ی  $\varepsilon_1 q$  افزایش و به اندازه ی  $Ir_1 q$  کاهش می یابد. در عبور از مقاومت  $R_1$  انرژی پتانسیل آن به اندازه ی  $IR_1 q$  کاهش می یابد. به همین ترتیب، هنگام عبور از باتری  $\varepsilon_2$  افزایش انرژی  $\varepsilon_2 q$  و کاهش انرژی  $Ir_2 q$  را خواهیم داشت. در  $R_2$  انرژی پتانسیل بار  $q$  به اندازه ی  $IR_2 q$  کاهش می یابد. هنگامی که بار  $q$  به نقطه ی  $A$  برمی گردد، چون تمام انرژی از دست رفته ی آن توسط باتری ها تأمین شده است، بنا به اصل پایستگی انرژی، باید بار  $q$  در این نقطه همان انرژی اولیه را داشته باشد؛ بنابراین،

$$U_A + \varepsilon_2 q - Ir_2 q - IR_2 q - Ir_1 q + \varepsilon_1 q - IR_1 q = U_A$$

اگر طرفین این رابطه را بر  $q$  تقسیم کنیم، رابطه ی زیر به دست می آید.

$$V_A + \varepsilon_2 - Ir_2 - IR_2 - Ir_1 + \varepsilon_1 - IR_1 = V_A \quad (2-15)$$

با توجه به رابطه ی ۲-۱۵ دستورالعمل زیر به دست می آید.

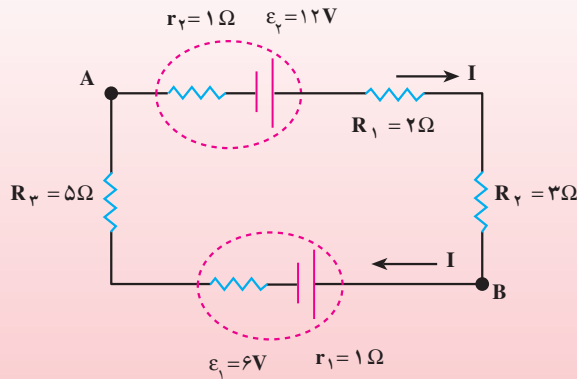
۱- هرگاه روی مدار در جهت جریان از مقاومت  $R$  یا  $r$  بگذریم، پتانسیل به اندازه ی  $IR$  یا  $Ir$  کاهش می یابد و اگر در خلاف جهت جریان از مقاومت ها بگذریم، پتانسیل به اندازه ی  $IR$  یا  $Ir$  افزایش می یابد.

۲- هرگاه برای گذر از مولد (بدون توجه به جهت جریان) از پایانه ی منفی به طرف پایانه ی مثبت بگذریم، پتانسیل به اندازه ی نیروی محرکه ی مولد افزایش می یابد. اگر ضمن گذر از مولد (بدون توجه به جهت جریان) از پایانه ی مثبت به پایانه ی منفی برویم، پتانسیل به اندازه ی نیروی محرکه ی مولد کاهش می یابد.

بنابراین، برای محاسبه ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار، ابتدا پتانسیل نقطه ی اول (مثلاً  $V_A$ ) را می نویسیم. آن گاه از این نقطه روی مدار در جهت دلخواه به طرف نقطه ی دوم می رویم و ضمن گذر از هر جزء، تغییر پتانسیل آن جزء را اضافه می کنیم تا به نقطه ی دوم برسیم. حاصل، برابر پتانسیل نقطه ی دوم است.

## مثال ۶-۲

در یک مدار تک حلقه مطابق شکل ۱۴-۲ شدت جریان در جهت نشان داده شده  $0.5$  آمپر است. اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی A و B (یعنی  $V_B - V_A$ ) چه اندازه است؟



شکل ۱۴-۲

حل: اگر در جهت جریان از نقطه‌ی A به سمت نقطه‌ی B جلو رویم، می‌توانیم

بنویسیم:

$$V_A - I r_3 + \epsilon_2 - I R_1 - I R_2 = V_B$$

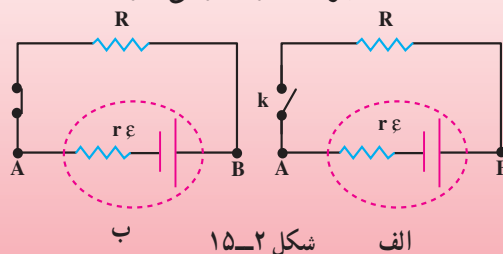
$$-0.5 \times 5 + 12 - 0.5 \times 2 - 0.5 \times 3 = V_B - V_A$$

$$V_B - V_A = 9 \text{ ولت}$$

## مثال ۷-۲

در مدار شکل ۱۵-۲ اختلاف پتانسیل دو سر مولد را در دو حالت زیر حساب کنید.  
الف) کلید k باز است.

ب) کلید k بسته است و جریان I از مدار می‌گذرد.



شکل ۱۵-۲

حل: الف) در حالتی که کلید باز است،  $I = 0$  و داریم:

$$V_A - 0 \times r \mathcal{E} = V_B$$

$$V_B - V_A = \mathcal{E}$$

ب) اگر از نقطه‌ی A در جهت جریان به سمت B جلو برویم، می‌توانیم بنویسیم:

$$V_A - Ir \mathcal{E} = V_B$$

$$V_B - V_A = \mathcal{E} - Ir$$

اختلاف پتانسیل دو سر مولد

همان‌طور که در بند الف مثال ۷-۲ دیدید، در حالتی که جریان از مولد نگذرد ( $Ir = 0$ ) اختلاف پتانسیل دو سر مولد با نیروی محرکه مولد برابر است؛ بنابراین، نیروی محرکه‌ی مولد برابر اختلاف پتانسیل دو سر مولد است وقتی که جریانی از آن نگذرد.

می‌دانیم که ولت‌سنج وسیله‌ای است با مقاومت زیاد؛ بنابراین، اگر پایانه‌های یک مولد را فقط به دو سر یک ولت‌سنج ببندیم، چون عملاً جریانی برقرار نمی‌شود، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد، برابر نیروی محرکه‌ی مولد است. از طرفی، در بند ب مثال ۷-۲ دیدید که وقتی جریان I از مولد می‌گذرد، اختلاف پتانسیل دو سر مولد به اندازه‌ی  $Ir$  از نیروی محرکه‌ی مولد کم‌تر است. افت پتانسیل در مولد است.

## فعالیت ۷-۲

وقتی باتری اتومبیل فرسوده می‌شود، مقاومت درونی آن افزایش می‌یابد. چرا این باتری نمی‌تواند اتومبیل را روشن کند؟

## فعالیت ۷-۲

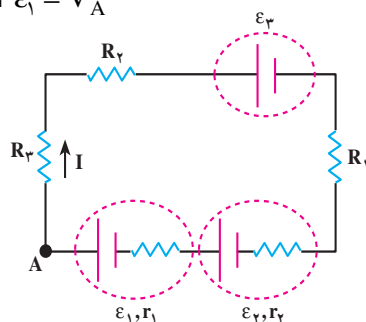
می‌دانیم که نیروی محرکه‌ی یک باتری اتومبیل ۱۲ ولت و نیروی محرکه‌ی هر باتری قلمی ۱/۵ ولت است. به نظر شما، اگر ۸ باتری قلمی را به‌طور متوالی به هم وصل کنیم (یعنی پایانه‌ی مثبت یکی را به‌طور پی‌در پی به پایانه‌ی منفی دیگری وصل کنیم) تا نیروی محرکه‌ی کل آن‌ها ۱۲ ولت شود، آیا با این مجموعه می‌توان اتومبیل را روشن کرد؟ چرا؟

ب — محاسبه‌ی شدت جریان: برای محاسبه‌ی شدت جریان در یک مدار تک حلقه، ابتدا برای جریان جهت دلخواهی انتخاب می‌کنیم و سپس با توجه به دو قاعده‌ای که برای اختلاف پتانسیل گفته شد، از یک نقطه روی مدار شروع می‌کنیم و تغییر پتانسیل دوسر هریک از اجزای مدار را می‌نویسیم تا دوباره به نقطه‌ی شروع برسیم. از رابطه‌ای که به این ترتیب به دست می‌آید، می‌توان شدت جریان را محاسبه کرد. برای مثال، در مدار شکل ۱۶-۲ برای محاسبه‌ی جریان، ابتدا جریان را در جهت نشان داده شده انتخاب می‌کنیم و سپس از نقطه‌ی A روی مدار در جهت جریان جلو می‌رویم. به این ترتیب، خواهیم داشت:

$$V_A - IR_3 - IR_2 - \varepsilon_3 - IR_1 - Ir_2 + \varepsilon_2 - Ir_1 + \varepsilon_1 = V_A$$

$$\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = I(R_3 + R_2 + R_1 + r_2 + r_1)$$

$$I = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{R_3 + R_2 + R_1 + r_2 + r_1}$$



شکل ۱۶-۲

با این روش، اگر جریان به دست آمده مثبت باشد، معلوم می‌شود که جهت انتخاب شده درست است و اگر جریانی که به دست می‌آید منفی باشد، معلوم می‌شود جهت جریان در مدار خلاف جهت انتخاب شده است.

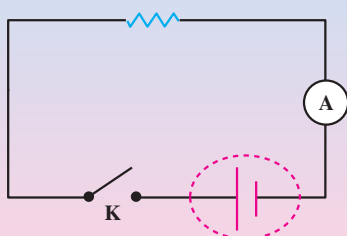
## آزمایش ۳-۲

### اندازه‌گیری مقاومت درونی مولد

وسایله‌های آزمایش: باتری ۹ ولت، ولت‌سنج، آمپرسنج و یک مقاومت، کلید

قطع و وصل.

۱- مدار را مطابق شکل ۱۷-۲ ببندید.



شکل ۱۷-۲

۲- در حالتی که کلید باز است، اختلاف پتانسیل دو سر باتری را با ولت‌سنج اندازه بگیرید.

۳- کلید را وصل کنید و در این حالت، شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر باتری را بخوانید. به کمک این دو آزمایش، با استفاده از رابطه‌ای که در مثال ۲-۷ برای اختلاف پتانسیل دو سر مولد به دست آمد، مقاومت درونی باتری را محاسبه کنید.

توان مولد: با توجه به رابطه‌ی ۲-۱۴ در بخش ۲-۶ اگر جریانی که از مولد می‌گذرد  $I$  باشد، داریم:

$$U = \varepsilon It \quad (2-16)$$

از آن جا توان تولیدشده به وسیله‌ی مولد از رابطه‌ی ۲-۱۷ به دست می‌آید.

$$P = \frac{U}{t} = \varepsilon I \quad (2-17)$$

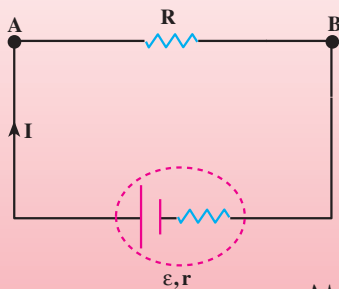
بخشی از این توان تولیدی به دلیل مقاومت درونی مولد، در درون مولد مصرف می‌شود، که بنا به آن چه در مورد توان مصرفی در یک مقاومت دیدیم، این مقدار برابر  $rI^2$  است؛ بنابراین، توان مفید مولد (یا توان خروجی) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$P = \varepsilon I - rI^2 \quad (2-18)$$

## مثال ۲-۸

دوسر مقاومت  $3/5$  اهمی را به یک باتری به نیروی محرکه‌ی  $\varepsilon$  و مقاومت درونی  $1\Omega$  بسته‌ایم. شدت جریان در مدار  $2A$  شده است.

الف) اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت و توان مصرف شده در آن را حساب کنید.



شکل ۲-۱۸



ب) نیروی محرکه‌ی مولد و توان تولیدی آن چه اندازه است؟

حل: الف) با توجه به شکل ۱۸-۲ می‌توان نوشت :

اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت

$$V_A - IR = V_B \Rightarrow V_A - V_B = IR = 2 \times 3/5 = 7V$$

$$P = RI^2 \Rightarrow P = 3/5 \times 4 = 14W \quad \text{توان مصرفی در مقاومت}$$

$$V_A - IR - Ir + \mathcal{E} = V_A \quad \text{ب)}$$

$$-2 \times 3/5 - 2 \times 1 + \mathcal{E} = 0 \Rightarrow \mathcal{E} = 9V \quad \text{نیروی محرکه‌ی مولد}$$

$$P = \mathcal{E}I \Rightarrow P = 9 \times 2 = 18W \quad \text{توان تولیدی مولد}$$

## تمرین ۲-۵

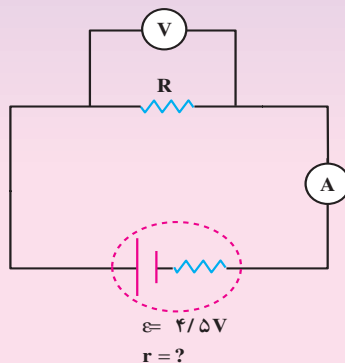
در مدار شکل ۱۹-۲ آمپرسنج  $5A/0$  و ولت‌سنج  $4V$  را نشان می‌دهد.

الف) مقاومت  $R$  را محاسبه کنید.

ب) توان مصرف شده در مقاومت  $R$  و توان تولیدی مولد را محاسبه کنید.

پ) افت پتانسیل در مولد را محاسبه کنید.

ت) مقاومت درونی مولد را محاسبه کنید.

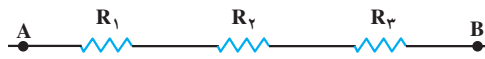


شکل ۱۹-۲

## ۸-۲- به هم بستن مقاومت‌ها

در مدارهای الکتریکی متداول معمولاً مقاومت‌ها به صورت‌های متفاوت به هم متصل می‌شوند. برخی از این مدارها می‌توانند بسیار پیچیده باشند. در ادامه به بررسی دو نوع ساده‌ی به هم بستن مقاومت‌ها می‌پردازیم. اکثر مدارهای پیچیده را می‌توانیم با استفاده از روابطی که برای دو نوع به هم بستن ساده‌ی زیر به دست می‌آوریم، بررسی کنیم.

**الف- به هم بستن متوالی مقاومت‌ها:** در این روش، مقاومت‌ها مطابق شکل ۲-۲۰ به هم بسته می‌شوند و در مدار قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۲۰

در به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور متوالی، هر مقاومت با مقاومت بعدی در یک سر مشترک است. اگر دو سر A و B را به اختلاف پتانسیل ثابتی ببندیم، جریان I از هر یک از مقاومت‌ها می‌گذرد. با توجه به شکل ۲-۲۰ و روش محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در مدار تک حلقه می‌توان نوشت:

$$V_A - IR_1 - IR_2 - IR_3 = V_B \quad (۱۹-۲)$$

و از آن‌جا خواهیم داشت:

$$V_A - V_B = IR_1 + IR_2 + IR_3 \quad (۲۰-۲)$$

مقاومت معادل هر مجموعه از این مقاومت‌ها مقاومتی است که اگر به‌جای آن‌ها به همان اختلاف پتانسیل  $V_A - V_B$  وصل شود، همان شدت جریان از آن عبور کند؛ بنابراین، اگر مقاومت معادل این مجموعه را R بگیریم، خواهیم داشت:

$$V_A - V_B = IR \quad (۲۱-۲)$$

$$IR_1 + IR_2 + IR_3 = IR \quad (۲۲-۲)$$

یا:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (۲۳-۲)$$

بدیهی است که اگر به‌جای سه مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آن‌ها از رابطه‌ی ۲۳-۲ به دست می‌آید.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (۲۳-۲)$$

## مثال ۹-۲

مقاومت‌های  $R_1 = 2\Omega$  و  $R_2 = 4\Omega$  و  $R_3 = 1\Omega$  و  $R_4 = 3\Omega$  را به‌طور متوالی به هم بسته‌ایم.

الف - مقاومت معادل مجموعه‌ی مقاومت‌ها را حساب کنید. اگر این مجموعه از مقاومت‌ها را به دو سر مولدی به نیروی محرکه‌ی ۶ ولت و مقاومت درونی ناچیز ببندیم، شدت جریان در مدار چه قدر می‌شود؟

ب - توان مصرفی هر یک از مقاومت‌ها و مجموع توان مصرفی هر مقاومت و توان مصرفی کل را محاسبه و با هم مقایسه کنید.

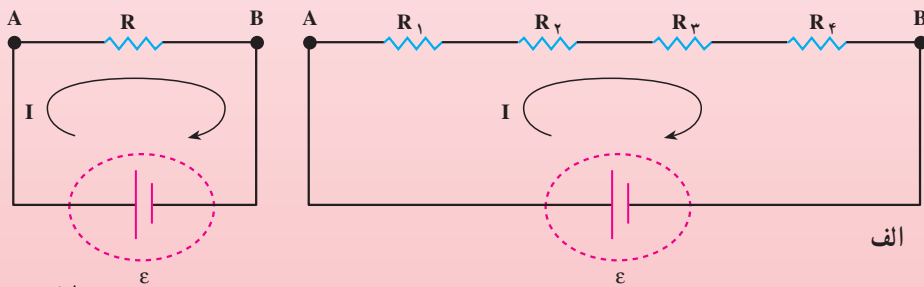
حل: الف - بنا به رابطه‌ی ۲-۲۳ داریم:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R = 2 + 4 + 1 + 3 = 10\Omega$$

مقاومت معادل

در شکل ۲-۲۱ الف و ب به ترتیب به هم بستن مقاومت‌های متوالی را به باتری و قرار گرفتن مقاومت معادل را به جای آن‌ها مشاهده می‌کنید.



شکل ۲-۲۱

در این حالت، بنا به آنچه در مورد مدارهای تک حلقه گفتیم، شدت جریان مدار

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \Rightarrow I = \frac{6}{10} = 0.6 \text{ A} \text{ است.}$$

ب -

$$P_1 = R_1 I^2 \rightarrow P_1 = 2 \times 0.6^2 = 0.72 \text{ W}$$

$$P_2 = 4 \times 0.6^2 = 1.44 \text{ W}$$

$$P_3 = 1 \times 0.6^2 = 0.36 \text{ W}$$

$$P_4 = 3 \times 0 / 36 = 1 / 0.8 \text{ W}$$

$$P = RI^2 \Rightarrow P = 10 \times 0 / 36 = 3 / 6 \text{ W}$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 0 / 72 + 1 / 44 + 0 / 36 + 1 / 0.8 = 3 / 6 \text{ W}$$

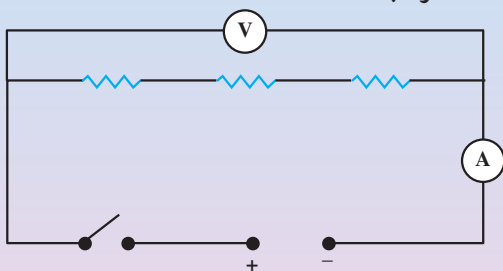
بنابراین توان مصرفی کل برابر مجموع توان مصرفی مقاومت‌هاست.

## تمرین ۲-۶

می‌خواهیم تعدادی لامپ ۱۲ ولتی و ۲۶ وات را با برق ۱۸۰ ولت روشن کنیم. چند عدد از این لامپ‌ها را به‌طور متوالی به هم بیندیم تا بدون آن‌که بسوزند، توان مصرفی هر کدام همان ۲۶ وات باشد؟

## آزمایش ۲-۴

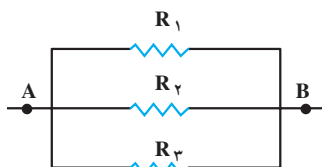
وسایله‌های لازم: چند مقاومت  $1/7 \Omega$ ،  $12 \Omega$ ،  $10 \Omega$  و  $15 \Omega$ ، سیم رابط، ولت‌سنج، آمپرسنج، کلید قطع و وصل، منبع تغذیه و اهم‌متر.  
۱- ابتدا سه یا چهار مقاومت را به‌طور متوالی به هم بیندید و پس از آن با این مقاومت‌ها مدارهای مطابق شکل ۲-۲۲ ترتیب دهید.



شکل ۲-۲۲

۲- با اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه‌ی مقاومت‌ها از رابطه‌ی  $R = \frac{V}{I}$  مقاومت معادل را اندازه بگیرید و پس از آن، با استفاده از اهم‌متر، مقاومت معادل مجموعه‌ی مقاومت‌ها را اندازه‌گیری کنید. نتیجه را با آن‌چه از رابطه‌ی  $R = \frac{V}{I}$  به‌دست آورده‌اید، مقایسه نمایید.

ب — به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی: شکل ۲۳-۲ سه مقاومت را نشان می‌دهد که بین دو نقطه‌ی A و B به‌طور موازی به هم بسته شده‌اند.

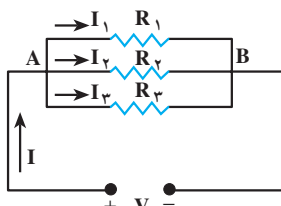


شکل ۲۳-۲

در به هم بستن موازی مقاومت‌ها یک سر همه‌ی مقاومت‌ها به یک نقطه (مثلاً نقطه‌ی A) و سر دیگر همه‌ی آن‌ها نیز به یک نقطه (مثلاً نقطه‌ی B) بسته شده است. در این حالت، اگر دو سر مجموعه مطابق شکل ۲۴-۲ به اختلاف پتانسیل  $V$  وصل شود، جریان الکتریکی در هر یک از مقاومت‌ها برقرار می‌گردد. بنابراین اصل پایداری بار، باید شدت جریان در شاخه‌ی اصلی با مجموع شدت جریان‌هایی که در هر یک از مقاومت‌ها برقرار شده است، برابر باشد.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

(۲۴-۲)



شکل ۲۴-۲

## ۸-۲ فعالیت

آزمایشی را طراحی کنید که درستی رابطه‌ی ۲۴-۲ را نشان دهد.

در به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی چون یک سر مقاومت‌ها به نقطه‌ی A و سر دیگر به نقطه‌ی B وصل است بنابراین ولتاژ یک سر همه مقاومت‌ها  $V_A$  و سر دیگر  $V_B$  است. به عبارت دیگر، در این حالت اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت‌های موازی یکسان است؛ بنابراین، براساس قانون اهم می‌توان نوشت:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \text{ و } I_2 = \frac{V}{R_2} \text{ و } I_3 = \frac{V}{R_3} \quad (۲۵-۲)$$

اگر مقاومت معادل این مقاومت‌های موازی را با  $R$  نشان دهیم، برای مقاومت معادل آن‌ها نیز داریم:

$$I = \frac{V}{R} \quad (26-2)$$

از رابطه‌های  $24-2$  و  $25-2$  و  $26-2$  نتیجه می‌شود:

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

یا:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (27-2)$$

بنابراین، در به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی، وارون مقاومت معادل برابر مجموع وارون مقاومت‌هاست.

## تمرین ۷-۲

نشان دهید وقتی دو مقاومت به‌طور موازی به یک‌دیگر وصل شوند، نسبت شدت جریان‌های آن‌ها به نسبت وارون مقاومت‌هاست.

## مثال ۱۰-۲

مقاومت‌های  $R_1 = 6\Omega$  و  $R_2 = 4\Omega$  و  $R_3 = 12\Omega$  و  $R_4 = 6\Omega$  را به‌طور

موازی به هم می‌بندیم و در دو سر آن‌ها اختلاف پتانسیل ۱۵ ولت برقرار می‌کنیم.

الف - مقاومت معادل و شدت جریان کل را به‌دست آورید.

ب - شدت جریان را در هر یک از مقاومت‌ها حساب کنید.

پ - توان مصرفی هر مقاومت و توان مصرفی کل را محاسبه کنید.

حل: الف - برای محاسبه‌ی مقاومت معادل بنا به رابطه‌ی  $27-3$  داریم:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{6} + \frac{1}{4} + \frac{1}{12} + \frac{1}{6} = \frac{2+3+1+2}{12} = \frac{8}{12}$$

$$R = \frac{12}{8} = 1.5 \Omega \quad \text{مقاومت معادل}$$

$$\text{شدت جریان کل از رابطه ی } I = \frac{V}{R} \text{ به دست می آید.}$$

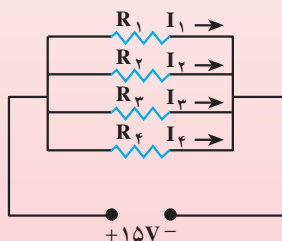
$$I = \frac{15}{1.5} = 10 \text{ A} \quad \text{شدت جریان کل}$$

ب- با توجه به شکل ۲-۲۵ برای محاسبه ی شدت جریان در هر یک از مقاومت ها، می توان نوشت:

$$V = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_4 R_4$$

$$I_1 = \frac{15}{6} = 2.5 \text{ A} \text{ و } I_2 = \frac{15}{4} = 3.75 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{15}{12} = 1.25 \text{ A} \text{ و } I_4 = \frac{15}{6} = 2.5 \text{ A}$$



شکل ۲-۲۵

همان طور که می بینید، شدت جریان به نسبت وارون مقاومت ها توزیع شده است.  
بنا به رابطه ی ۱۱-۲ داریم:

$$P = VI$$

$$P_1 = 15 \times 2.5 = 37.5 \text{ W} \text{ و } P_2 = 15 \times 3.75 = 56.25 \text{ W}$$

$$P_3 = 15 \times 1.25 = 18.75 \text{ W} \text{ و } P_4 = 15 \times 2.5 = 37.5 \text{ W}$$

برای محاسبه ی توان کل با استفاده از مقاومت معادل می توان نوشت:

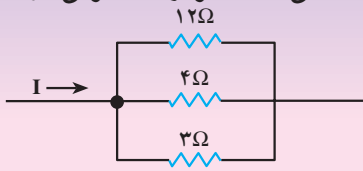
$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{225}{1.5} = 150 \text{ W}$$

همان طور که پیش تر هم دیدیم، برای محاسبه ی توان کل می توانستیم توان مصرفی در مقاومت ها را با هم جمع کنیم.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 37.5 + 56.25 + 18.75 + 37.5 = 150 \text{ W}$$

## تمرین ۱-۲

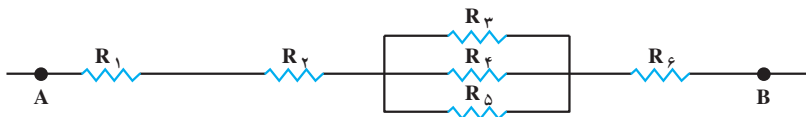
در شکل ۲۶-۲ قسمتی از یک مدار را مشاهده می کنید. اگر توان مصرفی در مقاومت ۱۲ اهمی ۳ وات باشد، شدت جریان در مقاومت های ۴Ω و ۳Ω و شدت جریان کل چه قدر است؟



شکل ۲۶-۲

در مواردی ممکن است تعدادی از مقاومت ها به طور متوالی و تعدادی دیگر به صورت موازی به هم بسته شده باشند. در شکل ۲۷-۲ تعدادی مقاومت شامل مقاومت های موازی ( $R_5$  و  $R_4$  و  $R_3$ ) را مشاهده می کنید که با سه مقاومت  $R_1$  و  $R_2$  و  $R_6$  به طور متوالی بسته شده اند. در این موارد که مقاومت ها شامل مجموعه ای موازی و متوالی است، برای محاسبه ی مقاومت معادل مجموعه، می توان به جای مقاومت های موازی در هر قسمت معادل آن ها را قرار داد و پس از آن، مقاومت معادل مجموعه ی متوالی را محاسبه کرد.

در شکل ۲۷-۲ اگر مقاومت معادل  $R_3$  و  $R_4$  و  $R_5$  برابر  $R$  باشد، به جای مقاومت های شکل می توان مجموعه ی مقاومت های شکل ۲۸-۲ را نشان داد.



شکل ۲۷-۲



جانشانی مقاومت های شکل ۲۷-۲

شکل ۲۸-۲

به همین ترتیب، به جای مقاومت های شکل ۲۸-۲ می توان مقاومت معادل آن ها را مطابق شکل ۲۹-۲ نشان داد.



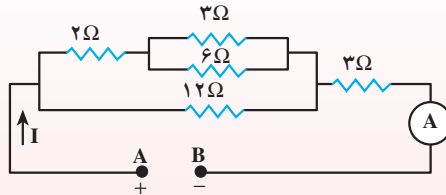
شکل ۲۹-۲

$R' = R_1 + R_2 + R + R_6$   
 $R'$  مقاومت معادل مقاومت های شکل ۲۷-۲ است.



### مثال ۳-۱۲

در مدار شکل ۳-۲ اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی A و B، ۲۴ ولت است. شدت جریانی را که آمپرسنج (A) نشان می‌دهد، چند آمپر است؟



شکل ۳-۲

**حل:** برای محاسبه‌ی شدت جریان کل، نخست با اعمال ساده‌سازی‌های نشان داده شده در شکل‌های ۳۱-۲ الف تا ت مدار معادل شکل ۳-۲ را به‌دست می‌آوریم.

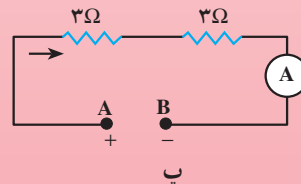
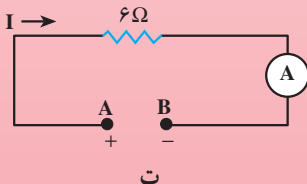
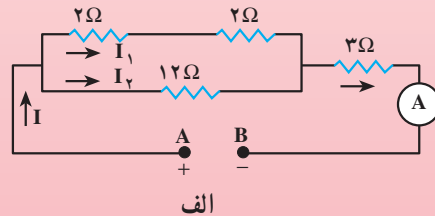
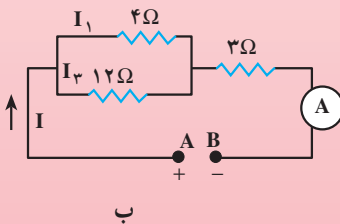
الف - مقاومت معادل دو مقاومت موازی  $3\Omega$  و  $6\Omega$  برابر  $2\Omega$  است.

ب - مقاومت معادل دو مقاومت متوالی  $2\Omega$  و  $2\Omega$  برابر  $4\Omega$  است.

پ - مقاومت معادل دو مقاومت موازی  $4\Omega$  و  $12\Omega$  برابر  $3\Omega$  است.

ت - مقاومت معادل دو مقاومت متوالی  $3\Omega$  و  $3\Omega$ ، یعنی مقاومت معادل مدار شکل ۳-۲، برابر  $6\Omega$  است. در این حالت، شدت جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد،

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{6} = 4A \text{ است.}$$

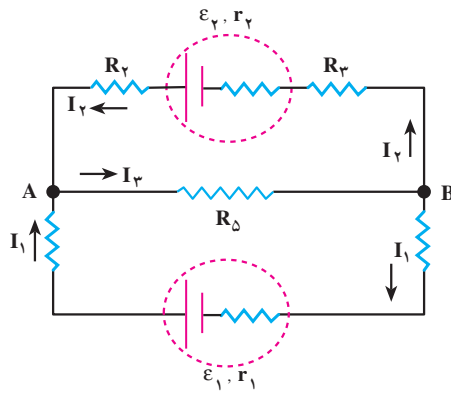


شکل ۳۱-۲

## ۲-۹- قانون کیرشهف

در مثال‌های ۲-۱۰، ۲-۱۱ و ۲-۱۲ با استفاده از مقاومت معادل، مدار را ساده کردیم و پاسخ مورد نظر را به دست آوردیم. این روش ساده‌سازی همواره قابل استفاده نیست. به‌ویژه در مدارهایی که شامل باتری‌های متعددند. این گونه مدارها را می‌توان با به کار بردن قانون‌هایی که در همه‌ی مدارها به کار می‌روند و به قانون‌های کیرشهف معروف‌اند، بررسی کرد. این قانون‌ها عبارت‌اند از:

**الف- قانون شدت جریان‌ها:** مجموع جریان‌هایی که به هر گره (یعنی نقطه‌ای که اجزای مدار در آن نقطه به هم متصل شده‌اند) می‌رسند، برابر مجموع جریان‌هایی است که از آن نقطه خارج می‌شوند (این قاعده از اصل پایستگی بار نتیجه می‌شود). در شکل ۲-۳۲،  $I_1$  و  $I_2$  به نقطه‌ی A وارد و  $I_3$  از آن نقطه خارج می‌شود یا  $I_3$  به نقطه‌ی B وارد و  $I_1$  و  $I_2$  از آن نقطه خارج می‌شوند. اگر P گره در مدار وجود داشته باشد، این قانون را برای P-۱ گره می‌توان نوشت:



شکل ۲-۳۲

بنا به قانون شدت جریان‌ها

$$I_3 = I_1 + I_2$$

**ب- قانون اختلاف پتانسیل‌ها:** در هر حلقه یا هر مدار بسته، مجموع جبری اختلاف پتانسیل‌ها صفر است. در به کار بردن این قانون باید نکته‌های زیر را رعایت کرد.

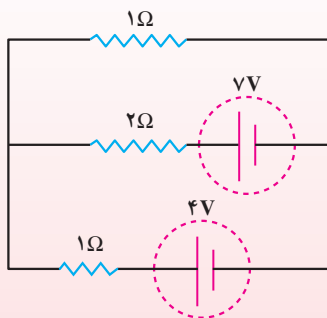
۱- همان‌طور که در بخش ۲-۶ در مورد مدار تک حلقه دیدیم، اگر جهت جریان در مدار مشخص نباشد، جهتی را برای جریان انتخاب می‌کنیم و همان روش را برای حلقه‌ی مورد نظر به کار می‌بریم.

۲- اگر n شاخه در مدار وجود داشته باشد، برای حل مدار به n معادله نیاز داریم و برای نوشتن معادله‌ها به تعداد لازم حلقه در نظر می‌گیریم.

در مثال‌هایی که در ادامه می‌آید، با کاربردهای این قانون‌ها در حل مسئله‌ها آشنا می‌شوید.

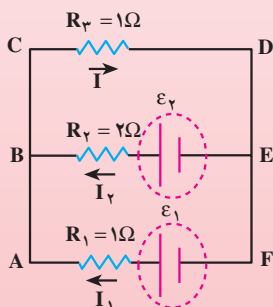
## مثال ۳-۲

در مدار شکل ۳۳-۲ شدت جریان را در هر یک از مقاومت‌ها حساب کنید (مقاومت درونی مولدها ناچیز است).



شکل ۳۳-۲

حل: ابتدا برای هر شاخه، جریانی در جهت دلخواه مطابق شکل ۳۴-۲ انتخاب می‌کنیم. با توجه به تعریف گره - همان‌طور که در شکل ۳۴-۲ دیده می‌شود - دو گره در این مدار وجود دارد (نقطه‌های B و E).



شکل ۳۴-۲

در این صورت، بنا به قانون شدت جریان‌ها بین شدت جریان‌ها رابطه‌ای به صورت زیر برقرار است.

$$I = I_1 + I_2 \quad (۱)$$

بنا به قانون اختلاف پتانسیل‌ها در حلقه‌ی (مسیر بسته) CDFAC (شامل  $R_3$  و  $\epsilon_1$  و  $R_1$ ) می‌توان نوشت:

$$-IR_3 + \epsilon_1 - I_1R_1 = 0 \quad (۲)$$

در حلقه‌ی CDEBC (شامل  $R_3$  و  $\epsilon_2$  و  $R_2$ ) نیز می‌توان نوشت:

$$-IR_3 + \epsilon_2 - I_2R_2 = 0 \quad (۳)$$

از سه معادله ی ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب  $I_1$  و  $I_2$  و  $I$  را به دست می آوریم. برای حل کردن این معادله ها، در معادله های ۲ و ۳ به جای  $I$  مساوی آن - یعنی  $I_1 + I_2$  - را قرار می دهیم. در نتیجه، خواهیم داشت :

$$\begin{cases} -2I_1 - I_2 = -4 \\ -I_1 - 3I_2 = -7 \end{cases}$$

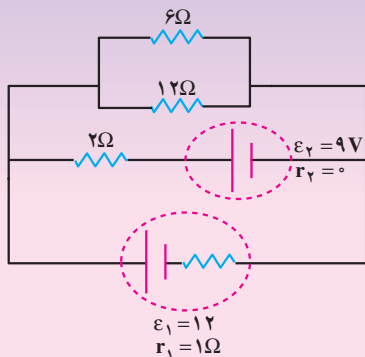
و از آن جا نتیجه می شود :

$$I_2 = 2A \text{ و } I_1 = 1A$$

$$I = I_1 + I_2 = 2 + 1 = 3A$$

## تمرین ۲-۹

در مدار شکل ۲-۳۵ شدت جریان را در هر شاخه محاسبه کنید.



شکل ۲-۳۵

## مثال ۲-۱۴

در مدار شکل ۲-۳۶ شدت جریان در هر شاخه چند آمپر است؟

حل: در حلقه ی ۱ بنا به قاعده ی اختلاف پتانسیل ها می توان نوشت :

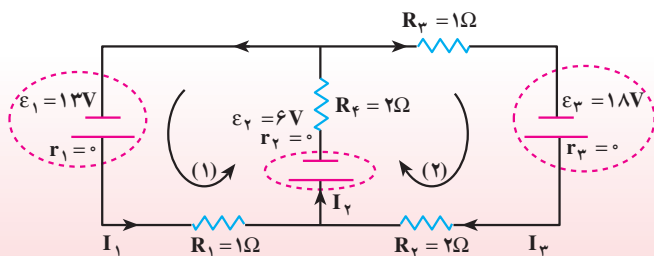
$$-I_1 R_1 - \varepsilon_2 - I_2 R_2 + \varepsilon_1 = 0$$

در حلقه ی ۲ می توان نوشت :

$$-I_3 R_3 - \varepsilon_2 - I_2 R_2 - I_3 R_3 + \varepsilon_3 = 0$$

و بنا به قاعده ی شدت جریان ها

$$I_2 = I_1 + I_3$$



شکل ۳۶-۲

یا:

$$\begin{cases} -1 \times I_1 - 6 - 2 \times I_2 + 13 = 0 \\ -2 \times I_3 - 6 - 2I_2 - 1 \times I_3 + 18 = 0 \end{cases}$$

$$-I_1 - 6 - 2(I_1 + I_3) + 13 = 0 \Rightarrow 3I_1 - 2I_3 + 7 = 0$$

$$-2I_3 - 6 - 2(I_1 + I_3) - I_3 + 18 = 0 \Rightarrow 2I_1 - 5I_3 + 12 = 0$$

از حل دو معادله‌ی اخیر نتیجه می‌شود:

$$I_3 = 2A \text{ و } I_2 = 3A \text{ و } I_1 = 1A$$

## مثال ۱۵-۲

شکل ۳۷-۲ قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد.  $V_A - V_B$  را حساب کنید.

حل: همان‌طور که در شکل ۳۷-۲ دیده می‌شود  $I_1$  و  $I_2$  به نقطه‌ی A نزدیک و

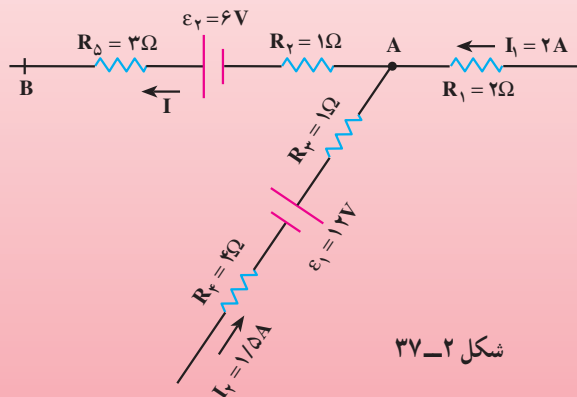
از آن نقطه دور می‌شود بنابراین:

$$I = I_1 + I_2 = 2 + 1/5 = 3/5 A$$

$$V_A - IR_2 + \varepsilon_2 - IR_1 = V_B$$

از طرفی

$$V_A - V_B = 3/5 \times 1 - 6 + 3/5 \times 3 = 8V$$



شکل ۳۷-۲

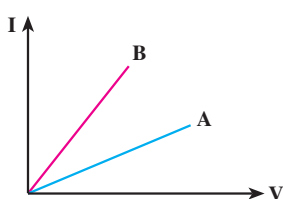
## تمرین‌های فصل دوم

۱- شارش بار در هر مقطع رسانا را هنگام اعمال میدان الکتریکی در دو سر رسانا و موقع عدم حضور میدان مقایسه کنید. تغییر دما در هر یک از این وضعیت‌ها چه اثری بر آهنگ شارش بار دارد؟

۲- مناسب‌ترین ولت‌سنج برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در یک مدار چه ویژگی‌ای باید داشته باشد؟ اگر ولت‌سنج مناسب نباشد، آن چه اندازه‌گیری می‌شود با اندازه‌ی واقعی چه تفاوتی دارد؟ سؤال بالا را در مورد آمپرسنج مناسب هم بررسی کنید.

۳- قانون اهم رابطه‌ی مقاومت را با شدت جریان و ولتاژ بیان می‌کند  $R = \frac{V}{I}$ . توضیح دهید اگر ولتاژ افزایش یا کاهش یابد مقدار  $R$  تغییر می‌کند؟

۴- اختلاف پتانسیل دو سر باتری اتومبیل‌های سواری برابر ۱۲ ولت است. اگر ۸ باتری قلمی ۱/۵ ولتی به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه‌ی آن‌ها نیز برابر ۱۲ ولت می‌شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از ۸ باتری قلمی استفاده نمی‌شود.

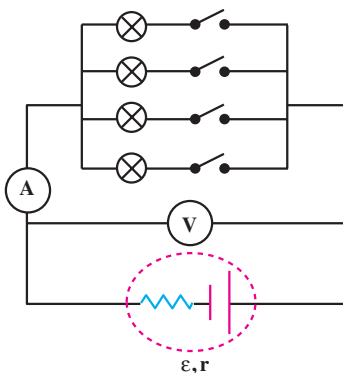


شکل ۲-۳۸

۵- شکل ۲-۳۸ نمودار  $I-V$  را برای دو نوع رسانا نشان می‌دهد. مقاومت کدام یک بیش‌تر است؟

۶- نمودار تغییرات ولتاژ دوسر مولد را بر حسب شدت جریانی که از آن می‌گذرد به طور کیفی رسم کنید.

۷- لامپ‌های یک درخت زینتی، به طور متوالی متصل شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتفاقی می‌افتد؟



شکل ۲-۳۹

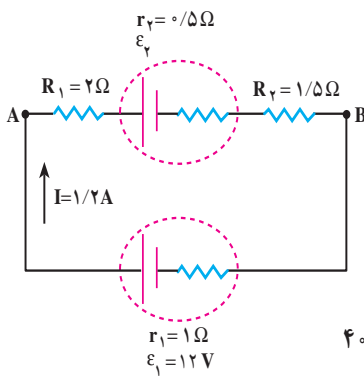
۸- در شکل ۲-۳۹ تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده‌اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، اعدادی که آمپرسنج و ولت‌سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟

۹- دو مقاومت مساوی  $R$  را یک‌بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و آن‌ها را هر بار به ولتاژ  $V$  وصل می‌کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متوالی چه قدر است؟

۱۰- سه مقاومت مشابه ۱۲ اهمی را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یک دیگر می بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت وصل می کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می گذرد؟  
 ۱۱- دو مقاومت موازی ۶ اهمی و ۱۲ اهمی به طور متوالی به یک مقاومت ۲ اهمی وصل شده است. در این حال، شبکه را به دو سر یک باتری ۳۶ ولتی با مقاومت داخلی ناچیز می بندیم. توان مصرفی را در مقاومت ۶ اهمی محاسبه کنید.

۱۲- از مقاومت های موازی  $4\Omega$ ،  $6\Omega$  و  $12\Omega$  جریان  $21A$  عبور می دهیم. چه جریانی از مقاومت  $6\Omega$  می گذرد؟

۱۳- در مدار شکل ۲-۴۰ شدت جریان در جهت نشان داده شده  $1/2$  آمپر است.

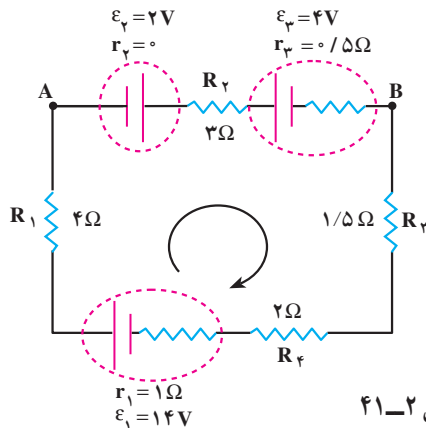


شکل ۲-۴۰

الف - نیروی محرکه ی  $\epsilon_\gamma$  و  $V_A - V_B$  چه قدر است؟

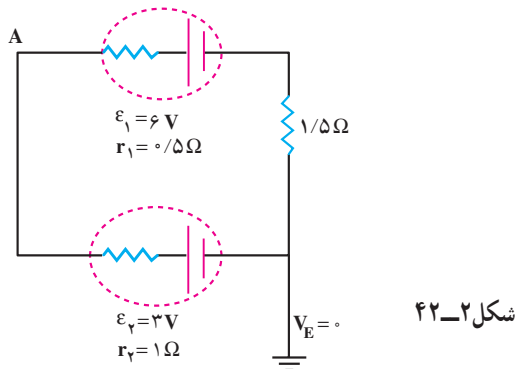
ب - انرژی مصرف شده در  $R_1$  و  $R_\gamma$  را در مدت ۵ ثانیه حساب کنید.

۱۴- در مدار شکل ۲-۴۱، شدت جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه ی A و B را محاسبه کنید.



شکل ۲-۴۱

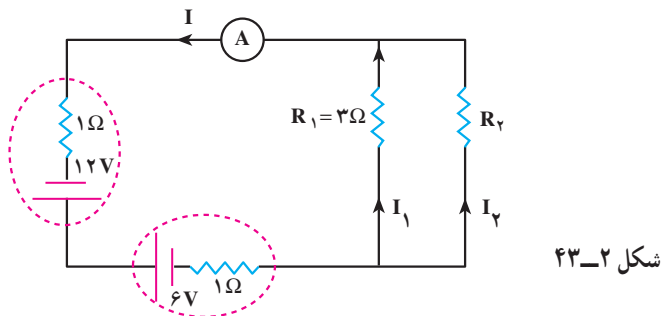
۱۵- در شکل ۴۲-۲ پتانسیل نقطه‌ی A را محاسبه کنید.



۱۶- شدت جریانی که آمپرسنج در مدار شکل ۴۳-۲ نشان می‌دهد، برابر ۲ آمپر است.

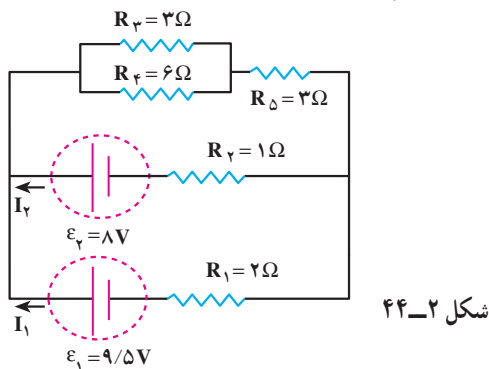
الف - مقاومت  $R_2$

ب - توان مصرفی هر یک از دو مقاومت را حساب کنید.

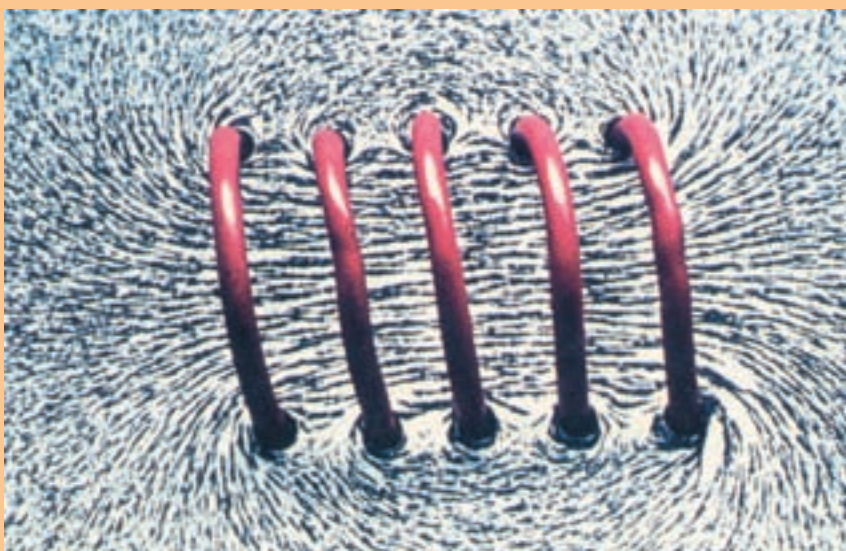


۱۷- در مدار شکل ۴۴-۲، شدت جریان در هر باتری و توان مصرفی کل مقاومت‌های  $R_3$

و  $R_4$  را به دست آورید.







می‌دانیم آهنرباهای دائم در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند. در این فصل خواهیم دید جریان الکتریکی نیز می‌تواند میدان مغناطیسی تولید کند. شکل بالا یک سیم‌لوله‌ی حامل جریان را نشان می‌دهد که در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد کرده است و این میدان باعث جهت‌گیری براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی شده است.

### مغناطیس

اگر تاکنون با یک اسباب بازی مغناطیسی بازی کرده باشید، یا یک قطب‌نما را به کار برده باشید و یا آهنربایی را مثلاً برای نگه داشتن یک برگه‌ی کاغذ روی بدنه‌ی یخچال مورد استفاده قرار داده باشید، احتمالاً از مشاهده‌ی پدیده‌های مربوط به شگفت آمده‌اید. آهنرباها برای بسیاری از ما جذابیت خاصی دارند.



شب هنگام نور شمالگان (شفق قطبی) در نیم کره‌ی شمالی به صورت پرده‌ای نورانی در آسمان دیده می‌شود. ضخامت این پرده‌ی خمیده می‌تواند به ارتفاع چند کیلومتر و به طول چندین هزار کیلومتر باشد.

آهنربایی را در دست خود نگه دارید و نزدیک یک جسم آهنی یا فولادی بایستید، آیا احساس نمی‌کنید که دست شما به طرف آن جسم کشیده می‌شود؟ در هر یک از دستان خود یک آهنربا نگه دارید، حتی وقتی هم که دو آهنربا با هم در تماس نیستند، وجود نیروی مغناطیسی را احساس می‌کنید. اگر یک ماده‌ی غیرمغناطیسی مثل شیشه نیز بین دو آهنربا باشد، باز هم این نیرو وجود دارد. دو آهنربا حتی در خلأ هم به یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. زمین نیز خود یک آهنربای عظیم است، که اثرهای ناشی از آن در پدیده‌های متفاوت دیده می‌شود.

در این فصل خواهیم دید که جریان‌های الکتریکی نیز اثرهای مغناطیسی دارند. از اثرهای مغناطیسی سیم‌های حامل جریان و مواد مغناطیسی در بسیاری از ماشین‌ها و دستگاه‌هایی که زندگی روزانه‌ی ما را ساده‌تر می‌کنند، استفاده می‌شود.

### ۳-۱- آهنربا

یونانیان باستان، بیش از ۲۵۰۰ سال پیش با پدیده‌ی آهنربایی آشنا بودند. تالس که اغلب از او به عنوان پدر علم یونان یاد می‌شود، ماده‌ی کانی مگنتیت ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) را که آهن را می‌رباید می‌شناخت. همان گونه که می‌دانید، ماده‌های دارای این ویژگی را آهنربا می‌نامند. چینی‌های باستان نیز با ویژگی‌های مغناطیسی برخی از سنگ‌های آهنربا آشنایی داشتند و تکه‌هایی از این سنگ‌ها را به صورت قطب‌نماهای ساده در دریانوردی به کار می‌بردند.

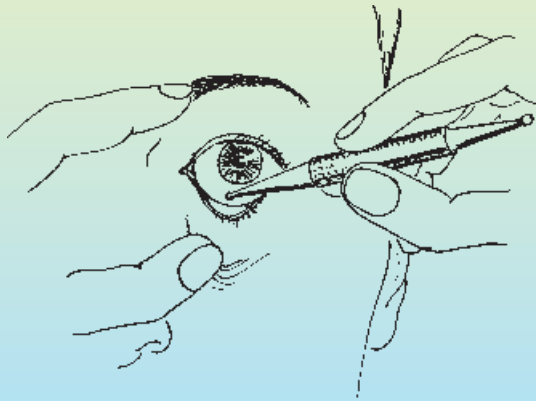
### فعالیت ۳-۱

در گروه خود آن چه را که درباره‌ی آهنرباها و کاربردهای آن‌ها می‌دانید، به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

آهنرباها را با توجه به نوع کاربردی که دارند، به شکل‌های مختلف (میله‌ای، نعلی شکل، تیغه‌ای و ...) می‌سازند.

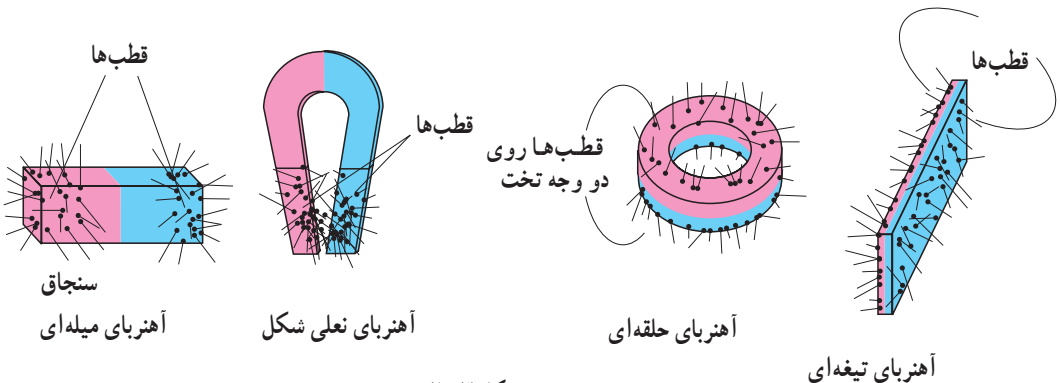
## فناوری

یکی از موارد استفاده از آهنربا در پزشکی در شکل ۱-۳ نمایش داده شده است. همان گونه که شکل نشان می دهد از یک آهنربای میله ای خاص که قطب های آن به صورت گرد و هموار درآمده است برای بیرون آوردن تراشه های آهن و فولاد از درون چشم استفاده شده است. این روش بیرون آوردن قطعه های آهنی یا فولادی از برخی نواحی دیگر بدن نیز در بعضی از عمل های جراحی انجام می شود.



شکل ۱-۳

**قطب های آهنربا:** در آهنربا - به هر شکلی که باشد - دو ناحیه وجود دارد که خاصیت آهنربایی در آن ها بیش از قسمت های دیگر است. این ناحیه ها را قطب های آهنربا می نامند. قطب های آهنرباها به شکل های مختلف را در شکل ۲-۳ مشاهده می کنید. تجمع سنجاق های کوچک مکان قطب های آهنربا را نشان می دهد.



شکل ۲-۳

## فحالت ۲-۳

به کمک براده‌های آهن یا چند سنجاق، قطب‌های هر یک از آهنرباهایی را که در اختیار دارید، تعیین کنید.

پیش از این دیده‌اید که عقربه‌ی مغناطیسی همواره در جهت معینی می‌ایستد، به گونه‌ای که یک قطب معین آن مطابق شکل ۳-۳ تقریباً به طرف شمال و قطب دیگر آن به طرف جنوب قرار می‌گیرد. قطبی را که به سوی شمال تمایل دارد (یا به عبارت دیگر شمال‌گرا است) قطب N و قطب جنوب‌گرا را قطب S می‌نامند (شکل ۳-۳). قطب‌های همان آهنرباها یک‌دیگر را می‌رانند و قطب‌های غیرهمنام یک‌دیگر را می‌ربایند.

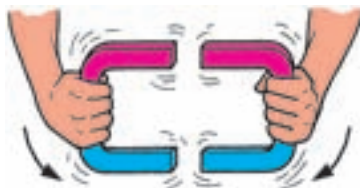


شکل ۳-۳ قطب‌نماهایی که ملاحان در دریا و کوهنوردان به هنگام مه غلیظ برای تعیین جهت حرکت به کار می‌برند، در واقع یک آهنربای میله‌ای نازک است که بر روی پایه‌ای سوار است و می‌تواند آزادانه بر روی آن بچرخد، و جهت تقریبی شمال را نشان دهد. قطب‌نما را عقربه‌ی مغناطیسی هم می‌نامند.

## فحالت ۳-۳

آزمایشی که اثر قطب‌های آهنربا را بر یک‌دیگر نشان دهد طراحی کنید و انجام دهید.

اگر دو آهنربای نیلی شکل را مطابق شکل ۴-۳ در دو دست خود نگه دارید و سعی کنید آن‌ها را طوری به هم نزدیک کنید که قطب‌های همانم به یک‌دیگر نزدیک شوند، به خوبی می‌توانید نیروی رانش بین قطب‌های همانم را احساس کنید.



شکل ۴-۳

**القای خاصیت مغناطیسی:** دیدیم که آهنرباها قطعه‌هایی از جنس آهن را می‌ربایند. علاوه بر آهن، ماده‌هایی نظیر نیکل، کبالت و آلیاژهایی که از این سه فلز تشکیل شده‌اند نیز جذب آهنربا می‌شوند. با انجام دادن آزمایش ۱-۳ در می‌یابید که قطعه‌ی آهنی ربوده شده توسط آهنربا، خود خاصیت آهنربایی پیدا کرده است.

### آزمایش ۱-۳

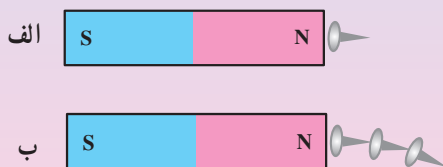
**وسيله‌های آزمایش:** یک آهنربای میله‌ای، تعدادی میخ آهنی، مقداری براده‌ی آهن (یا سنجاق کوچک).

۱- به کمک براده‌های آهن تحقیق کنید که میخ‌ها خاصیت آهنربایی ندارند.

۲- آهنربا را مطابق شکل ۳-۵ الف به یک انتهای میخ نزدیک کنید. بار دیگر خاصیت آهنربایی میخ را به کمک براده‌های آهن تحقیق کنید.

۳- مانند شکل ۳-۵ ب میخ‌های دیگری را با استفاده از ربایش مغناطیسی ایجاد شده پشت سر یک‌دیگر قرار دهید و هر بار وجود یا نبود خاصیت آهنربایی در آخرین میخ را بررسی کنید.

۴- آهنربای میله‌ای را از میخ‌ها دور کنید و بار دیگر خاصیت آهنربایی میخ‌ها را بررسی کنید.



شکل ۳-۵

نتیجه‌ی آزمایش ۱-۳ را می‌توانیم به شرح زیر توجیه کنیم :

وقتی که آهنربا در نزدیکی میخ قرار می‌گیرد، در میخ خاصیت مغناطیسی القا می‌شود. اگر قطب N آهنربا را نزدیک به یک سر میخ بیاوریم، مطابق شکل ۳-۶ خاصیت آهنربایی طوری القا می‌شود که آن سر، قطب S و سر دورتر قطب N شود. ربایش بین دو قطب غیرهمنام (N در آهنربا و S در میخ) سبب ربوده شدن میخ به سمت آهنربا می‌شود.



شکل ۳-۶

این پدیده را القای خاصیت مغناطیسی می‌نامند. همان‌طور که با انجام دادن آزمایش ۱-۳ نشان داده‌اید، با دور کردن آهنربای اصلی، خاصیت آهنربایی القا شده نیز از بین می‌رود. علاوه بر این، خاصیت آهنربایی که در اثر القا در یک قطعه آهن، نیکل یا کبالت ایجاد می‌شود، همواره به‌صورتی است که قطعه‌ی یاد شده جذب آهنربای اصلی می‌شود.

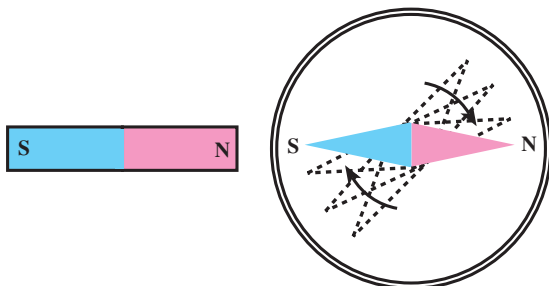
### فعالیت ۴-۳

فرض کنید دو میله‌ی کاملاً مشابه یکی از جنس آهن و دیگری آهنربا در اختیار دارید. با بحث در گروه خود، روشی را پیشنهاد کنید که با استفاده از آن بتوانید بدون استفاده از هیچ وسیله‌ی دیگری، میله‌ای را که از جنس آهنرباست مشخص کنید.

### ۲-۳ میدان مغناطیسی

در فصل دوم با مفهوم میدان الکتریکی آشنا شدید. در آنجا دیدید که در فضای اطراف هر جسمی که بار الکتریکی دارد خاصیتی ایجاد می‌شود که می‌تواند بر هر جسم باردار دیگری که در آن فضا قرارگیرد نیرو وارد کند. هم‌چنین دیدیم که برای توصیف این خاصیت از یک کمیت برداری به نام میدان الکتریکی با نماد  $\vec{E}$  استفاده می‌شود.

در فضای اطراف یک آهنربا نیز خاصیتی وجود دارد که در اثر آن در قطعه‌های آهنی خاصیت آهنربایی القا می‌شود و بر قطب‌های آهنرباهای دیگر نیرویی وارد می‌شود. برای مثال هرگاه یکی از قطب‌های آهنربای میله‌ای را به یک عقربه‌ی مغناطیسی که در راستای تقریبی شمال و جنوب جغرافیایی بر روی پایه‌ای قرار دارد، نزدیک کنیم، می‌بینیم که عقربه‌ی مغناطیسی می‌چرخد (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۷ اثر آهنربا بر عقربه‌ی مغناطیسی‌ای که در نزدیکی آن قرار دارد.

در این وضع اگر آهنربا را دور کنیم، عقربه دوباره در راستای تقریبی شمال و جنوب محل قرار می‌گیرد. این آزمایش وجود خاصیتی را در محیط اطراف یک آهنربا نشان می‌دهد. خاصیتی را که در اطراف آهنربا ایجاد می‌شود و به موجب آن به عقربه‌ی مغناطیسی نیرو وارد می‌شود میدان مغناطیسی می‌نامند. میدان مغناطیسی را با نماد  $\vec{B}$  نمایش می‌دهند.

میدان مغناطیسی کمیتی برداری است و مانند هر کمیت برداری دیگری دارای جهت و بزرگی است. در ادامه‌ی بحث، نخست جهت این بردار و سپس بزرگی و یکای آن را تعریف می‌کنیم.

**جهت میدان مغناطیسی:** دیدیم هنگامی که یک عقربه‌ی مغناطیسی را در میدان مغناطیسی یک آهنربا قرار می‌دهیم، عقربه می‌چرخد و در جهت معینی می‌ایستد. اگر آهنربا را در امتداد جدیدی قرار دهیم، عقربه‌ی مغناطیسی نیز خواهد چرخید و در جهت دیگری قرار خواهد گرفت. میدان مغناطیسی در هر نقطه بنا به تعریف هم‌راستای عقربه‌ی مغناطیسی است که در آن نقطه به حال تعادل درآمده باشد و سوی آن از S عقربه به N آن است. به این ترتیب، می‌توانیم بگوییم:

**هنگامی که آهنربا در نزدیکی عقربه‌ی مغناطیسی قرار می‌گیرد، عقربه می‌چرخد تا در امتداد میدان مغناطیسی آهنربا قرار گیرد و قطب N آن سوی میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.**

**خط‌های میدان مغناطیسی:** در فصل اول دیدیم که میدان الکتریکی را با خط‌های میدان الکتریکی نمایش می‌دهند. میدان مغناطیسی را نیز می‌توان توسط خط‌های میدان مغناطیسی نمایش داد. این خط‌ها طوری رسم می‌شوند که راستای میدان مغناطیسی در هر نقطه مماس بر خط میدان در آن نقطه باشد. خط میدان مغناطیسی در هر نقطه همسو با میدان مغناطیسی در آن نقطه است. علاوه بر این تراکم این خط‌ها در هر ناحیه از فضا نشانگر بزرگی میدان مغناطیسی در آن ناحیه است.

## آزمایش ۳-۲

وسایله‌های آزمایش: یک آهنربای میله‌ای، یک عقربه‌ی مغناطیسی، مداد و کاغذ.

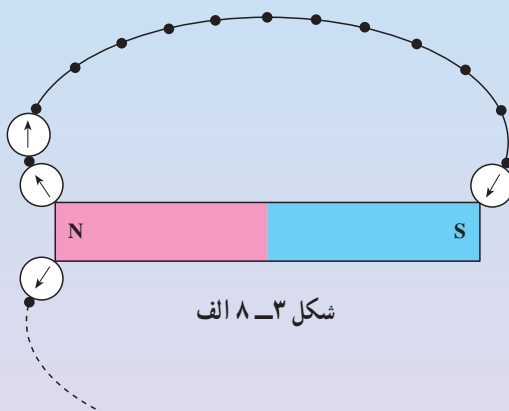
۱- آهنربای میله‌ای را روی کاغذ قرار دهید.

۲- عقربه‌ی مغناطیسی را مطابق شکل ۳-۸ الف نزدیک قطب N آهنربا قرار دهید و با مداد در نقطه‌ای که قطب N عقربه به آن سمت ایستاده یک نقطه بگذارید.

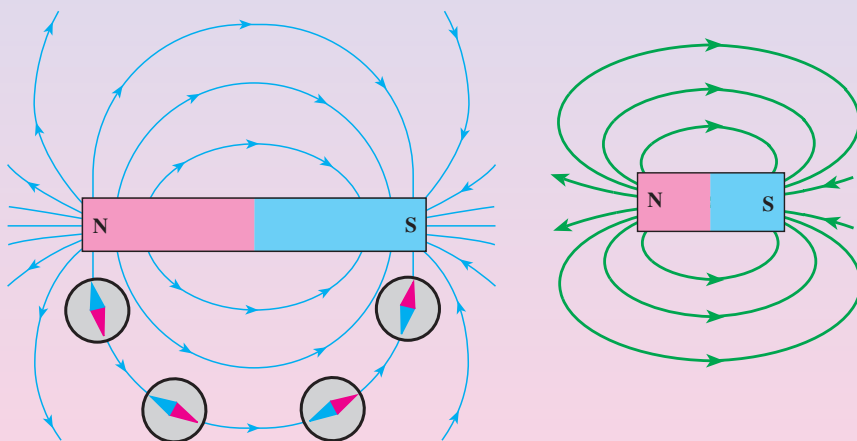
۳- عقربه را جابه‌جا کنید به طوری که قطب S آن روی نقطه‌ای که علامت



- زده‌اید قرار گیرد. بار دیگر با مداد در مکان قطب N عقربه نقطه‌ای بگذارید.
- ۴- این کار را آنقدر ادامه دهید تا بار دیگر عقربه به آهنربای میله‌ای برسد.
- ۵- این نقطه‌ها را به هم وصل کنید. روی منحنی حاصل، جهتی را که قطب N عقربه در آن می‌ایستد، با رسم پیکان مشخص کنید.
- ۶- مرحله‌های ۲ تا ۴ را چند بار تکرار کنید. هر بار از نقطه‌ای نزدیک نقطه‌ی شروع قبلی آغاز کنید تا آنکه شکلی مانند شکل ۳-۸ ب به دست آورید.



شکل ۳-۸ الف



شکل ۳-۸ ب

با استفاده از مقداری براده‌ی آهن می‌توان طرحی از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربا تهیه کرد. برای این کار آزمایش ۳-۳ را انجام دهید.

### آزمایش ۳-۳

وسيله‌های آزمایش: آهنربای میله‌ای، آهنربای نعلی شکل، براده‌ی آهن، یک صفحه‌ی شیشه‌ای یا مقوایی، یک نمک‌پاش (یا وسیله‌ی دیگری برای پاشیدن براده‌ی آهن).

۱- آهنربای میله‌ای را روی میز قرار دهید و صفحه‌ی شیشه‌ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.

۲- به کمک نمک‌پاش براده‌های آهن را به‌طور یکنواخت به‌ضخامت خیلی کم روی شیشه بپاشید.

۳- چند ضربه‌ی آرام به صفحه‌ی شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرّحی که روی صفحه‌ی شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است.

### پرسش ۱-۳

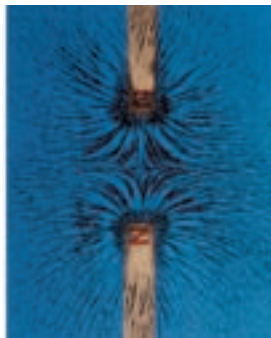
با استفاده از خاصیت القای مغناطیسی، توضیح دهید که چرا براده‌های آهن در آزمایش ۳-۳ در راستای خط‌های میدان مغناطیسی می‌ایستند.

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

خط‌های میدان مغناطیسی مربوط به آهنرباها را که در وضعیت‌های مختلف به کمک براده‌های آهن به‌دست آمده است، در شکل ۳-۹ مشاهده می‌کنید.



(پ) دو آهنربای میله‌ای که قطب‌های غیرهمنامشان نزدیک یک‌دیگر است.



(ب) دو آهنربای میله‌ای که قطب‌های همنامشان نزدیک یک‌دیگر است.



(الف) آهنربای میله‌ای

شکل ۳-۹ خط‌های میدان مغناطیسی آهنرباها در وضعیت‌های مختلف

## ۳-۳- تعریف میدان مغناطیسی با استفاده از نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی

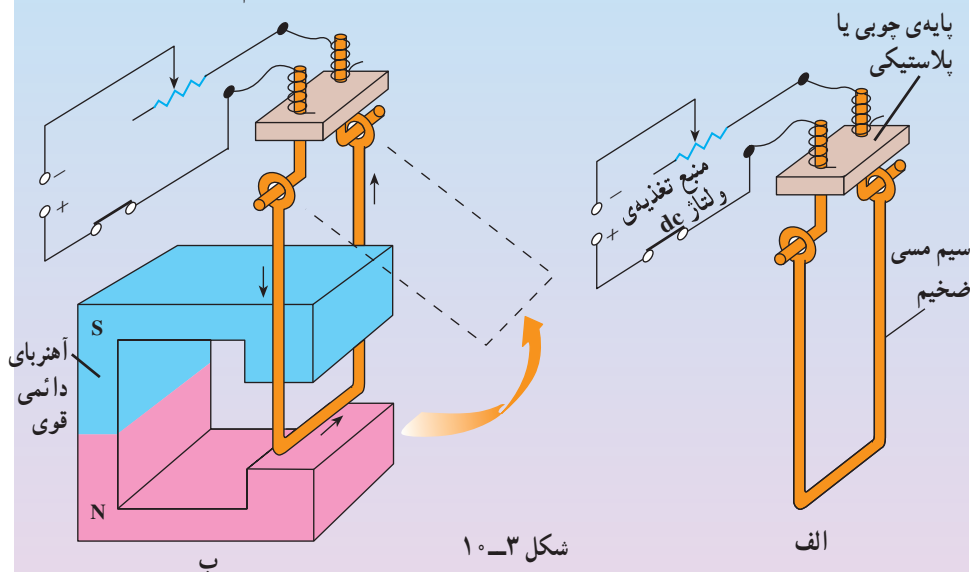
دیدیم که هرگاه یک عقربه‌ی مغناطیسی یا هر آهنربای دیگری در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بر آن نیرو وارد می‌شود. در ادامه خواهیم دید که بر سیم‌های حامل جریان الکتریکی نیز در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود، بزرگی میدان مغناطیسی و یکای آن را می‌توان با استفاده از این اثر تعریف کرد. برای مشاهده‌ی این نیرو آزمایش زیر را انجام دهید.

### آزمایش ۳-۴

وسایله‌های آزمایش: یک آهنربای نعلی شکل قوی، سیم مسی ضخیم، سیم رابط، رنوستا و منبع تغذیه.

۱- مدارى مطابق شکل ۳-۱ الف ببندید.

۲- آهنربای نعلی شکل را مطابق شکل ۳-۱ ب در اطراف سیم مسی قرار دهید.



۳- کلید را ببندید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، بنویسید.

۴- این آزمایش را چند بار تکرار کنید و هر بار آهنربا را در وضعیت جدیدی در اطراف سیم مسی قرار دهید و با بستن کلید مشاهده‌های خود را یادداشت کنید.

۵- نتیجه‌ی آزمایش را به کلاس گزارش دهید.

۶- این آزمایش را با یک آهنربای دیگر تکرار کنید.

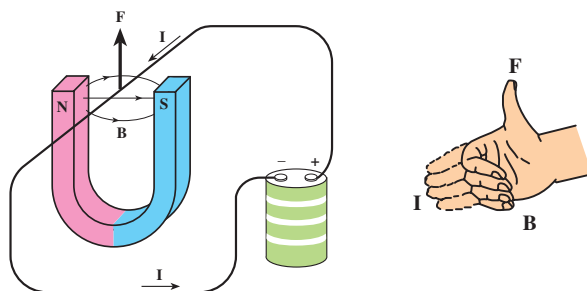
۷- جهت و بزرگی شدت جریان را تغییر دهید و آزمایش‌های بالا را تکرار کنید.

اورستد (فیزیکدان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۳-۴ و اندازه‌گیری دقیق نیرویی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد که:

نیرویی که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، بر راستای جریان و نیز بر میدان مغناطیسی عمود است.

جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی را می‌توان از قاعده‌ای به نام قاعده‌ی دست راست به این صورت پیش‌بینی کرد:

اگر دست راست خود را باز دارید و چهار انگشت را مطابق شکل ۳-۱۱ در جهت جریان بگیرید به طوری که اگر انگشتان خود را خم کنید، در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرد - در این صورت، انگشت شست شما جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان را نشان خواهد داد.



شکل ۳-۱۱ - قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت نیروی  $\vec{F}$  وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی  $I$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$

عامل‌های مؤثر بر نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی: بزرگی نیروی  $\vec{F}$  که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، به عامل‌های زیر بستگی دارد:

۱- جریانی که از سیم می‌گذرد ( $I$ )؛ هرچه جریان بیش‌تر باشد، نیروی وارد بر سیم از سوی میدان مغناطیسی بیش‌تر خواهد بود.

$$F \propto I$$

۲- طول قسمتی از سیم که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد ( $l$ )؛ هرچه طول بیش‌تری از سیم در میدان قرار گیرد، نیروی وارد بر آن بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto l$$

۳- میدان مغناطیسی ( $\vec{B}$ )؛ نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان‌های مغناطیسی

مختلف یکسان نیست. نیرویی که در میدان مغناطیسی یک آهنربای قوی تر بر سیم حامل جریان وارد می شود، بزرگ تر است. با استفاده از این واقعیت، می توانیم بزرگی میدان مغناطیسی را تعریف کنیم. اندازه ی میدان مغناطیسی را با  $B$  نمایش می دهند :

$$F \propto B$$

۴- سینوس زاویه ای که جریان با میدان مغناطیسی می سازد ( $\sin \alpha$ )؛ نیروی وارد بر سیم حامل جریان در یک میدان مغناطیسی با سینوس زاویه ی بین راستای میدان و راستای جریان متناسب است.

$$F \propto \sin \alpha$$

تناسب های بالا را می توان با استفاده از ضریب تناسب  $k$ ، به صورت زیر خلاصه کرد.

$$F = kBI \sin \alpha \quad (1-3)$$

با انتخاب یکای مناسب برای میدان مغناطیسی، می توان ضریب تناسب  $k$  را برابر یک گرفت. در نتیجه داریم

$$F = BI \sin \alpha \quad (2-3)$$

اگر جریان  $I$  و میدان  $B$  بر هم عمود باشند، داریم :

$$\sin \alpha = 1$$

در نتیجه، نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی عمود بر آن به قرار زیر است :

$$F = BI \quad (3-3)$$

این بیش ترین نیرویی است که میدان مغناطیسی  $B$  می تواند بر طول  $l$  از سیم حامل جریان  $I$  وارد کند. بنابراین، می توانیم اندازه ی میدان مغناطیسی  $B$  را با رابطه ی زیر تعریف کنیم.

$$B = \frac{F_{\text{بیشینه}}}{Il} \quad (4-3)$$

یعنی بزرگی میدان مغناطیسی در هر نقطه، برابر است با نیرویی که بر یک متر از طول سیم حامل جریانی به شدت یک آمپر که در راستای عمود بر میدان قرار گرفته باشد وارد می شود.

یکای میدان مغناطیسی، تسلا: رابطه ی ۳-۴ را برای تعریف یکای میدان مغناطیسی به کار می بریم. یکای میدان مغناطیسی در SI تسلا نام دارد و با نماد  $T$  نشان داده می شود.

بنا به تعریف، یک تسلا بزرگی میدان مغناطیسی است که در آن بر یک متر از سیمی که حامل جریان الکتریکی به شدت یک آمپر است و در راستای عمود بر میدان قرار دارد

نیروی به بزرگی یک نیوتون وارد شود. در نتیجه، می‌توانیم بنویسیم :

$$1 \text{ تسلا} = \frac{\text{نیوتون}}{(\text{متر}) \times (\text{آمپر})}$$

تسلا یکای بزرگی است. در کاربردهای عملی از یکای کوچکتري استفاده می‌کنند که گاوس نام دارد و با نماد G نمایش داده می‌شود.

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

### مثال ۱-۳

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی به بزرگی  $0.4 \text{ mT}$  در راستایی که با جهت میدان زاویه  $3^\circ$  می‌سازد، قرار دارد. اگر شدت جریانی که از سیم می‌گذرد  $5 \text{ آمپر}$  باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر یک متر از این سیم را محاسبه کنید.  
حل: بزرگی نیروی مغناطیسی برابر است با :

$$F = I l B \sin \alpha$$

$$F = 5 \times 1 \times 4 \times 10^{-5} \sin 3^\circ$$

$$F = 10 \times 10^{-5} \text{ N} = 0.1 \text{ mN}$$

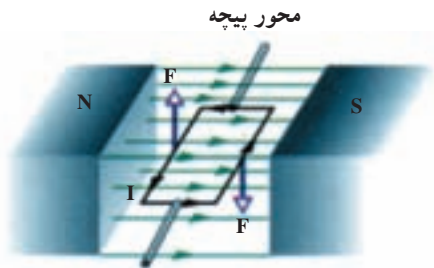
### تمرین ۱-۳

سیم افقی مستقیم حامل جریانی در یک میدان مغناطیسی یکنواخت افقی که جهت آن از شمال به جنوب است، قرار دارد. جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را تعیین کنید ؛ (الف) اگر سیم در راستای شمال – جنوب و جریان آن از شمال به جنوب باشد. (ب) اگر سیم در راستای شرق – غرب و جریان آن از غرب به شرق باشد.

### فعالیت ۵-۳

آزمایشی را طراحی کنید که به کمک آن بتوان نیروی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی را اندازه‌گیری کرد.

طرز کار گالوانومتر: گالوانومتر وسیله‌ای است که با آن جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک را اندازه می‌گیرند. امروزه وسیله‌های اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی (یعنی شدت جریان، اختلاف پتانسیل، مقاومت و ...) معمولاً عقربه‌ای یا رقمی (دیجیتالی) هستند. تشریح سازوکار وسیله‌های رقمی به مطالب موجود در این کتاب مربوط نمی‌شود. ولی با استفاده از مطالبی که فراگرفته‌ایم، می‌توانیم سازوکار گالوانومتر عقربه‌ای را مورد بررسی قرار دهیم. برای این کار، ابتدا ببینیم اگر یک سیم حامل جریان به شکل یک قاب مطابق شکل ۳-۱۲ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار گیرد، چه نیروهایی بر آن وارد می‌شود. چنین سیمی را یک پیچه می‌نامند.

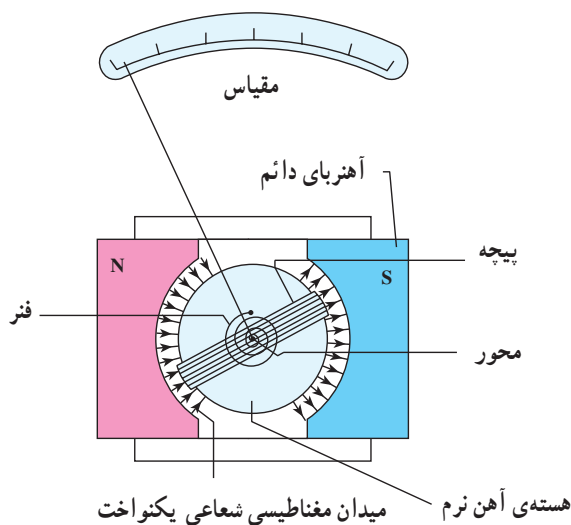


شکل ۳-۱۲- پیچه‌ی حامل جریان در میدان مغناطیسی

هنگامی که جریان از پیچه می‌گذرد، از طرف میدان بر اضلاع آن نیرو وارد می‌شود و در نتیجه پیچه مطابق شکل ۳-۱۲ حول محورش می‌چرخد. هر گالوانومتر دارای یک قاب است که به دور آن سیم پیچیده شده است، این قاب در یک میدان مغناطیسی دائم و قوی قرار گرفته است. وقتی جریان از این پیچه می‌گذرد، از سوی میدان مغناطیسی به قاب نیرو وارد می‌شود و آن را می‌چرخاند (شکل ۳-۱۳ را ببینید) و عقربه‌ی متصل به قاب را منحرف می‌کند. هر قدر اندازه‌ی شدت جریان بیشتر باشد، میزان چرخش پیچه و انحراف عقربه بیشتر خواهد شد.

اگر جریانی در جهت وارون شارش کند، جهت چرخش پیچه و انحراف وارون خواهد شد. با قطع جریان، فنر ظرفی که در پشت پیچه قرار دارد، پیچه و عقربه را به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گرداند. صفحه‌ی گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می‌چرخد را بر حسب آمپر مدرج می‌کنند، به این ترتیب که در مقابل هر زاویه، بزرگی شدت

جریانی که عقربه را به اندازه‌ی آن زاویه منحرف می‌کند، ثبت می‌کند.



شکل ۳-۱۳

## فناوری

**موتور الکتریکی:** موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این موتورها در انجام کارهای مختلف روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرند، و اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها نظیر جاروی برقی، مته‌ی برقی، آسیاب برقی، ماشین لباس‌شویی، پنکه و ... را تشکیل می‌دهند.

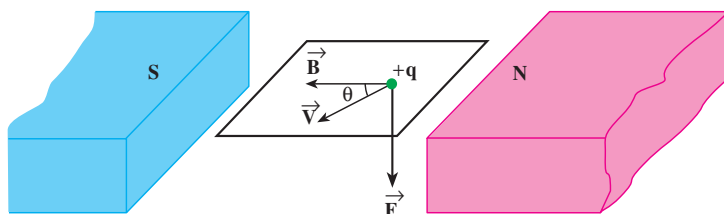
ساختمان موتور الکتریکی مانند ساختمان گالوانومتر است، از این نظر که در موتور الکتریکی نیز عبور جریان از یک قاب (به نام روتور) واقع در میدان مغناطیسی، باعث چرخش پیچه می‌شود. چرخش قطعات در دستگاه‌های بالا از این حرکت پیچه ناشی می‌شود.



### ۳-۴- نیروی وارد بر ذره‌ی باردار متحرک در میدان مغناطیسی

در بخش گذشته دیدیم که در میدان مغناطیسی، نیرویی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود. هرگاه جریان صفر شود، نیروی وارد بر سیم نیز صفر می‌شود. در فصل دوم دیدیم که جریان الکتریکی در واقع شارش بارهای الکتریکی است و صفر شدن جریان در یک رسانا به‌طور متوسط به معنای توقف شارش بارهای الکتریکی است. پس نتیجه می‌گیریم که نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی، درواقع بر بارهایی وارد می‌شود که در سیم در حال حرکت‌اند.

آزمایش نشان می‌دهد که اگر ذره‌ی باردار  $q$  با سرعت  $\vec{v}$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  حرکت کند (به شرط آن که جهت حرکت آن موازی با میدان نباشد) بر آن نیرویی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۳-۱۴ بر راستای  $\vec{v}$  و میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  عمود است. این نیرو را نیروی الکترومغناطیسی می‌نامند.



شکل ۳-۱۴- ذره‌ی با بار مثبت  $q$  که در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  با سرعت  $\vec{v}$  حرکت می‌کند.

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی نیرویی که در میدان مغناطیسی بر بار الکتریکی  $q$  که با سرعت  $\vec{v}$  در حرکت است وارد می‌شود، به عامل‌های زیر بستگی دارد.

۱- بار الکتریکی ( $q$ )؛ هرچه بار الکتریکی  $q$  بزرگ‌تر باشد، نیروی وارد بر آن از سوی میدان مغناطیسی بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto q$$

۲- سرعت حرکت بار الکتریکی ( $\vec{v}$ )؛ هرچه سرعت حرکت بار الکتریکی در میدان مغناطیسی بیش‌تر باشد، نیرویی که از سوی میدان مغناطیسی بر آن وارد می‌شود، بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto v$$

۳- میدان مغناطیسی ( $\vec{B}$ )؛ هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد، نیرویی که بر بار وارد

می‌شود، بیش‌تر خواهد بود.

$$F \propto B$$

۴- سینوس زاویه‌ی  $\theta$  که جهت حرکت بار الکتریکی (یعنی بردار  $\vec{v}$ ) با میدان مغناطیسی می‌سازد؛ نیروی وارد بر بار الکتریکی متحرک در میدان مغناطیسی با سینوس این زاویه متناسب است (شکل ۳-۱۴).

$$F \propto \sin \theta$$

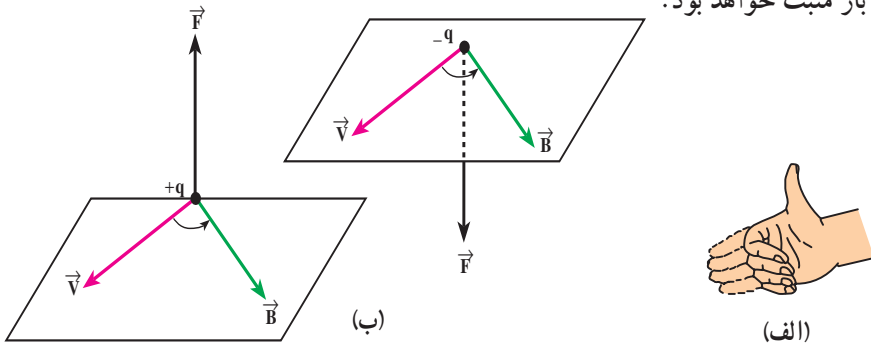
تناسب‌های بالا را می‌توان در رابطه‌ی زیر خلاصه کرد.

$$F = qvB \sin \theta \quad (۳-۵)$$

که در آن  $k$  ضریب تناسب است. اگر  $F$  برحسب نیوتون و  $q$  برحسب کولن و  $v$  برحسب  $m/s$  و  $B$  برحسب تسلا باشد، ضریب تناسب یک خواهد شد. در نتیجه، داریم:

$$F = qvB \sin \theta \quad (۳-۶)$$

**جهت نیروی وارد بر بار متحرک:** سوی نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی مثبت که در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  با سرعت  $\vec{v}$  حرکت می‌کند نیز توسط قاعده‌ی دست راست به ترتیب زیر تعیین می‌شود. اگر دست راست خود را طوری نگه داریم که انگشتان باز شده‌ی ما در راستای  $\vec{v}$  (یعنی در جهت حرکت بار الکتریکی) باشد - به گونه‌ای که وقتی آن‌ها را روی زاویه‌ی کوچک‌تری که  $\vec{v}$  با  $\vec{B}$  می‌سازد مطابق شکل ۳-۱۵ خم کنیم در جهت  $B$  قرار گیرد - انگشت شست ما در جهت نیروی وارد بر بار خواهد بود. نیروی وارد بر بار منفی مانند شکل ۳-۱۵ ب در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت خواهد بود.



شکل ۳-۱۵- الف) قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت نیروی وارد بر بار متحرک در میدان مغناطیسی،  
ب) جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی متحرک مثبت و منفی، در میدان مغناطیسی

### پرسش ۲-۳

اگر بار الکتریکی موازی با  $\vec{B}$  حرکت کند، نیروی مغناطیسی وارد بر آن چه قدر است؟

### مثال ۲-۳

ذره‌ای با بار ۴ میکروکولن و با سرعت  $2 \times 10^3 \text{ m/s}$  در راستایی که با میدان مغناطیسی یکنواخت  $100 \text{ G}$  زاویه‌ی  $30^\circ$  می‌سازد، در حرکت است. بزرگی نیروی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

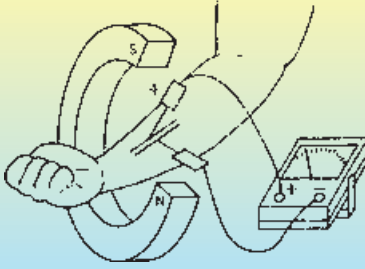
حل: نیروی وارد بر بار متحرک در میدان مغناطیسی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} F &= qvB \sin \theta \\ &= 4 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-2} \sin 30^\circ \\ &= 4 \times 10^{-5} \text{ N} \end{aligned}$$

### فناوری

دستگاه اندازه‌گیری سرعت شارش خون: سرعت شارش خون را می‌توان توسط روشی که به صورت طرح‌وار در شکل ۱۶-۳ نشان داده شده است اندازه گرفت. اساس این روش آن است که یون‌های موجود در خون همراه با حرکت خون در رگ، در آن را شارش می‌کنند. قطب‌های آهنربا را مطابق شکل به گونه‌ای در اطراف دست قرار می‌دهند که میدان مغناطیسی آن در راستای عمود بر راستای سرخ‌رگ دست باشد. با حرکت یک یون مثبت در میدان مغناطیسی عمودی، نیرویی بر آن وارد می‌شود که آن را به یک سمت می‌راند. تجمع بارهای مثبت در یک طرف رگ باعث می‌شود که بین دو طرف رگ یک اختلاف پتانسیل ایجاد شود. این اختلاف پتانسیل را می‌توان با نصب الکترودهایی بر روی پوست در دو طرف رگ اندازه‌گیری کرد. هرچه سرعت شارش خون بیش‌تر باشد، نیروی وارد بر یون‌های مثبت موجود در آن بیش‌تر خواهد بود، در نتیجه تعداد بیش‌تری از یون‌ها در کنار رگ انباشته می‌شوند و اختلاف

پتانسیلی که ولت متر نشان می دهد  
بیش تر می شود.



شکل ۳-۱۶

### ۳-۵- آثار مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی

اورستد ضمن انجام دادن برخی آزمایش های الکتریسته برای جمعی از دانشجویان خود، مشاهده کرد که عقربه ی مغناطیسی موجود در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می شود. او با انجام دادن آزمایش های بیش تر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به وجود می آورد. این کشف اورستد نخستین گام در راه درک رابطه ی بین الکتریسته و مغناطیس بود که به گسترش مبحث الکترومغناطیس انجامید. در این بخش، به بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم ها می پردازیم.

#### آزمایش ۳-۵ (آزمایش اورستد)

وسایلهای آزمایش: منبع تغذیه، سیم مسی نسبتاً ضخیم، رئوستا، آمپرسنج، صفحه ی مقوایی، عقربه ی مغناطیسی، کلید قطع و وصل و سیم رابط.

۱- سیم مسی را از صفحه ی مقوایی عبور دهید و با آن مداری مطابق شکل ۳-۱۷ ترتیب دهید.

۲- قبل از بستن کلید و برقراری جریان الکتریکی، عقربه ی مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرارگرفتن آن توجه کنید.

۳- با وصل کردن کلید و تنظیم رئوستا، جریان مناسبی را از مدار عبور دهید. آنگاه به سمت گیری عقربه ی مغناطیسی توجه کنید.

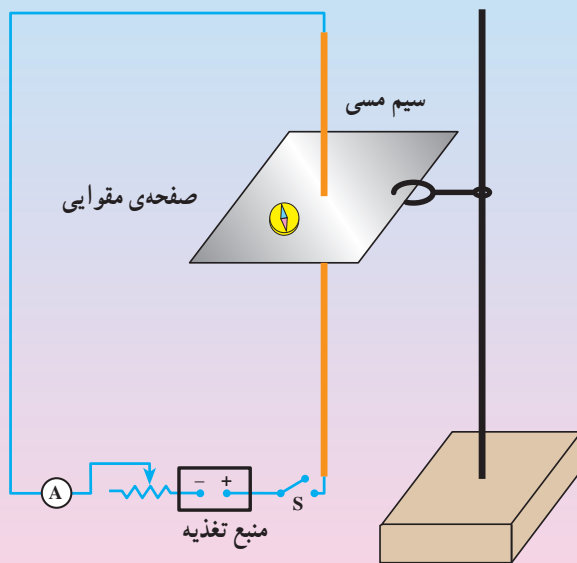
۴- عقربه ی مغناطیسی را در نقطه های مختلف روی مقوا قرار دهید و سمت گیری آن را بررسی کنید.

۵- چند خط میدان مغناطیسی را به روش آزمایش ۳-۲ رسم کنید.

۶- نتیجه‌ی این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و به کلاس گزارش دهید.

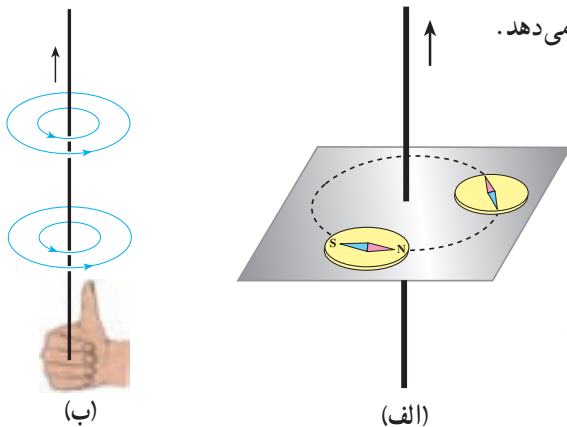
۷- این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.

۸- تحقیق کنید که افزایش شدت جریان چه تأثیری در نتیجه‌ی آزمایش دارد؟



شکل ۳-۱۷

با انجام دادن این آزمایش می‌بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان، مطابق شکل ۳-۱۸-الف به صورت دایره‌های هم‌مرکزی در اطراف سیم حامل جریان خواهند بود. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقربه‌ی مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن با استفاده از قاعده‌ی دست راست نیز می‌شود این جهت را تعیین کرد؛ بنابراین قاعده، اگر سیم را مطابق شکل ۳-۱۸-ب در دست راست خود بگیرید - به گونه‌ای که انگشت شست در جهت جریان الکتریکی باشد - جهت خم شدن چهار انگشت دست شما جهت خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف سیم نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۸

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی میدان مغناطیسی  $B$  در اطراف یک سیم نازک دراز مستقیم حامل جریان الکتریکی ای به شدت  $I$  در نقطه‌ای که فاصله‌ی عمودی آن از سیم برابر  $R$  است با  $I$  نسبت مستقیم و با  $R$  نسبت وارون دارد، یعنی

$$B \propto \frac{I}{R}$$

ضریب تناسب در SI برابر  $\frac{\mu_0}{2\pi}$  است که در آن  $\mu_0$  تراوایی مغناطیسی خلأ نام دارد و برابر است با  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ . در نتیجه، داریم:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (7-3)$$

### مثال ۳-۳

بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی ای به شدت ۲ آمپر را که از سیمی نازک، دراز و مستقیم می‌گذرد، در نقطه‌ای به فاصله‌ی الف (۲ متر، ب) ۲ میلی‌متر از سیم حساب کنید.  
حل: داریم

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 2} = 2 \times 10^{-7} T \quad \text{الف)}$$

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 2 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{-4} T \quad \text{ب)}$$

میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی در یک پیچه‌ی مسطح: پیچه‌ی مسطح از چند دور سیم نازک به شکل حلقه تشکیل شده که به هم فشرده شده‌اند و به صورت یک حلقه‌ی مسطح درآمده‌اند. خطی که از مرکز این حلقه می‌گذرد و عمود بر سطح آن است، محور پیچه نامیده می‌شود. پیچه‌ها در بسیاری از وسیله‌های برقی برای ایجاد میدان مغناطیسی به کار می‌روند.

### مغناطو انسفالوگراف

خون حاوی مقداری یون است. این یون‌ها همراه با حرکت خون در رگ، در آن شارش می‌کنند. شارش این یون‌ها درست مانند یک جریان الکتریکی ضعیف عمل می‌کند. این جریان‌ها در مغز و قلب انسان تولید میدان‌های مغناطیسی می‌کنند. این

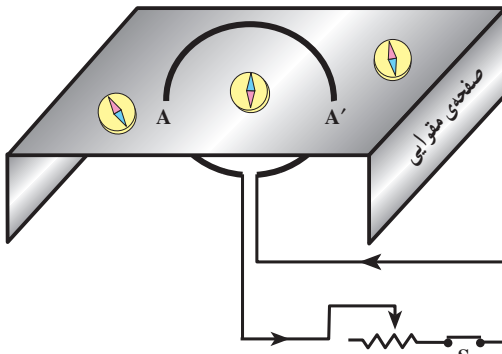


میدان‌های مغناطیسی ضعیف‌تر از آن‌اند که بتوان آن‌ها را با تجهیزات معمولی آشکار کرد. در دهه‌ی اخیر با دستگاهی به نام مغناطو انسفالوگراف امکان اندازه‌گیری این میدان‌ها فراهم شده است. (شکل ۳-۱۹). با این دستگاه می‌توان سرچشمه‌ی علامت‌های عصبی مغز را با دقتی حدود چند میلی‌متر تعیین کرد.

شکل ۳-۱۹

### فعالیت ۳-۶

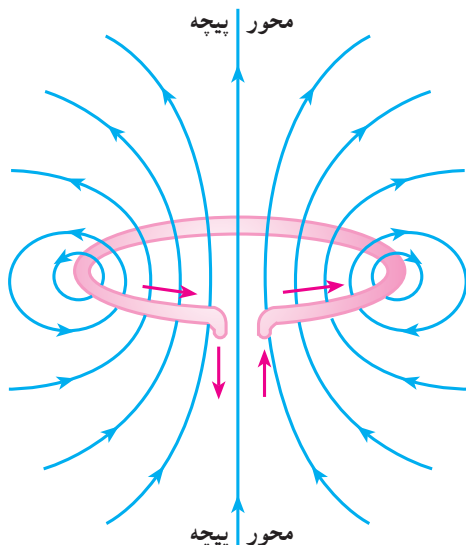
با استفاده از عقربه‌ی مغناطیسی و براده‌ی آهن خط‌های میدان مغناطیسی ناشی از عبور جریان الکتریکی از یک پیچ را تعیین کنید. برای این کار، می‌توانید از مداری مطابق شکل ۳-۲۰ استفاده کنید.



شکل ۳-۲۰

منبع تغذیه‌ی ۶ تا ۱۲ ولتی

خط‌های میدان مغناطیسی پیچه روی صفحه‌ای که از محور پیچه می‌گذرد، در شکل ۲۱-۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، خط‌های میدان در ناحیه‌ی داخل پیچه به یک‌دیگر نزدیک‌ترند؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است.



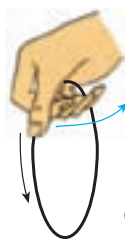
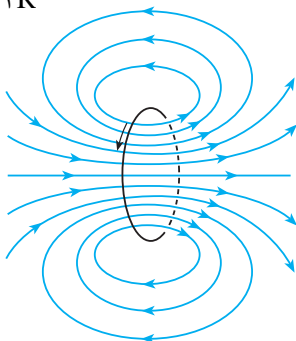
شکل ۲۱-۳- نقشه‌ی خط‌های میدان مغناطیسی در صفحه‌ی عمود بر سطح پیچه که از محور پیچه می‌گذرد.

هم‌چنین در شکل ۲۱-۳ دیده می‌شود که در نقطه‌هایی که بر محور پیچه قرار دارند، میدان موازی با محور پیچه است.

جهت میدان مغناطیسی پیچه را در هر نقطه می‌توان با قاعده‌ی دست راست - به روشی که قبلاً توضیح داده شد - تعیین کرد (شکل ۲۲-۳).

بزرگی میدان مغناطیسی پیچه‌ی مسطحی به شعاع  $R$  که  $N$  دور دارد و جریان الکتریکی‌ای به شدت  $I$  آمپر از آن می‌گذرد، در مرکز پیچه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (۸-۳)$$



شکل ۲۲-۳- استفاده از قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت میدان مغناطیسی پیچه



### مثال ۴-۳

از پیچه‌ی مسطحی به شعاع  $6/28\text{cm}$  که از  $100$  دور سیم نازک درست شده است جریانی به شدت  $2$  آمپر می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه به دست آورید.

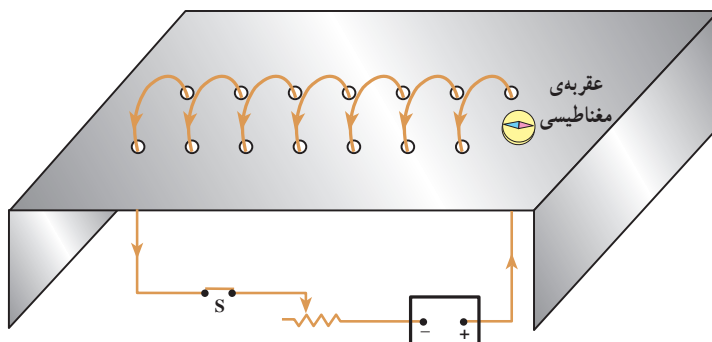
حل: داریم

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 100 \times 2}{2 \times 6/28 \times 10^{-2}} = 2 \times 10^{-3} \text{ T}$$

میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌لوله‌ی حامل جریان: سیم‌لوله از چند دور سیم تشکیل شده است که شبیه به یک فنر پیچیده شده است. اگر جریان الکتریکی‌ای از سیم‌لوله عبور کند، در فضای اطراف سیم‌لوله خاصیت مغناطیسی ایجاد می‌شود. با انجام فعالیت زیر به وجود میدان مغناطیسی در اطراف سیم‌لوله‌ی حامل جریان پی می‌برید.

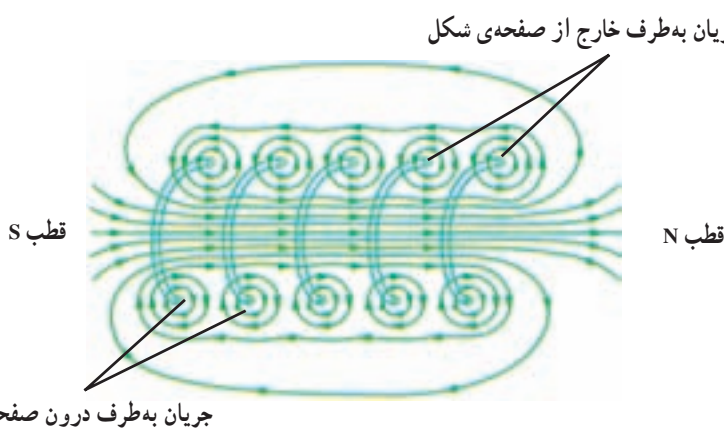
### فعالیت ۷-۳

روی یک جعبه‌ی مقوایی یا پلاستیکی دو ردیف سوراخ با فاصله‌های مساوی ایجاد کنید. سیم را به صورتی که در شکل ۲۳-۳ نشان داده شده است از میان سوراخ‌ها عبور دهید تا یک سیم‌لوله درست شود. جریان الکتریکی ثابتی از سیم‌لوله عبور دهید و با استفاده از عقربه‌ی مغناطیسی یا براده‌های آهن، خط‌های میدان مغناطیسی سیم‌لوله را مشخص کنید.



شکل ۲۳-۳

نقش خط‌های میدان مغناطیسی یک سیم‌لوله‌ی حامل جریان الکتریکی در داخل و خارج آن در شکل ۳-۲۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل می‌بینید، خط‌های میدان داخل سیم‌لوله بسیار متراکم‌تر از خط‌های میدان در خارج آن است و این نشان‌دهنده‌ی قوی‌تر بودن میدان در داخل سیم‌لوله است. علاوه بر این خط‌های میدان در داخل سیم‌لوله، بویژه در نقطه‌های نسبتاً دور از لبه‌های سیم‌لوله تقریباً موازی و هم‌فاصله‌اند و این نشانگر یکنواخت بودن میدان مغناطیسی درون سیم‌لوله است. همان‌طور که دیده می‌شود، جهت میدان مغناطیسی در داخل سیم‌لوله خلاف جهت میدان مغناطیسی در خارج آن است.



شکل ۳-۲۴- میدان مغناطیسی سیم‌لوله

جهت میدان مغناطیسی سیم‌لوله‌ی حامل جریان را نیز می‌توان با استفاده از قاعده‌ی دست راست تعیین کرد.

اگر شعاع قاعده‌ی سیم‌لوله در مقایسه با طول آن کوچک باشد و حلقه‌های سیم‌لوله خیلی به هم نزدیک باشند، میدان مغناطیسی داخل سیم‌لوله در نقطه‌های دور از لبه‌ها یکنواخت است و بزرگی آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$B = \mu_0 n I \quad (۳-۹)$$

در این رابطه،  $I$  جریانی است که از سیم‌لوله می‌گذرد و  $n$  تعداد دورهای سیم‌لوله در واحد طول است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$n = \frac{N}{l} \quad (۳-۱۰)$$

که  $N$  تعداد کل دورهای سیم‌لوله و  $l$  طول سیم‌لوله است.

### مثال ۳-۵

از سیملوله‌ای که در هر متر طول آن ۲۰۰۰ دور سیم پیچیده شده است، جریانی به شدت ۳ آمپر عبور می‌کند. بزرگی میدان مغناطیسی را در درون سیملوله (دور از لبه‌ها) به دست آورید.

حل: داریم

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{2000}{1} \times 3 \\ = 7.5 \times 10^{-3} \text{ T}$$

خط‌های میدان مغناطیسی، منحنی‌های بسته‌ای هستند، و نقطه‌ی آغاز یا پایانی ندارند. این موضوع برای پیچه و سیملوله در شکل‌های ۳-۲۱ و ۳-۲۴ دیده می‌شود.

**سیملوله با هسته‌ی آهنی – آهنربای الکتریکی:** در بخش ۳-۱ دیدید که اگر یک میله‌ی آهنی را در میدان مغناطیسی قرار دهیم، خاصیت مغناطیسی در آن القا خواهد شد. می‌توانیم میله‌ی آهنی را درون یک سیملوله‌ی حامل جریان که میدان در آنجا از هر جای دیگر در اطراف سیملوله قوی‌تر است جای دهیم. در این صورت، این میله‌ی آهنی را هسته‌ی سیملوله می‌نامند. پیش از آنکه جریانی از سیملوله عبور کند، سیملوله و هسته‌ی آهنی خاصیت مغناطیسی ندارند. اما وقتی جریانی در سیملوله برقرار می‌کنیم، میدان مغناطیسی سیملوله، خاصیت مغناطیسی در هسته‌ی آهنی القا می‌کند و هسته‌ی آهنی آهنربا می‌شود. این آهنربا را آهنربای الکتریکی می‌نامند.

به این ترتیب خاصیت آهنربایی آهنربای الکتریکی را می‌توانیم قطع و وصل کنیم. هرچه تعداد دورهای سیملوله در واحد طول بیش‌تر باشد و جریانی که از آن می‌گذرد بزرگ‌تر باشد آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود.

وجود هسته‌ی آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیملوله می‌شود. سیملوله‌ی بدون هسته‌ی آهنی دارای میدان مغناطیسی ضعیفی است که در عمل کاربردی ندارد.

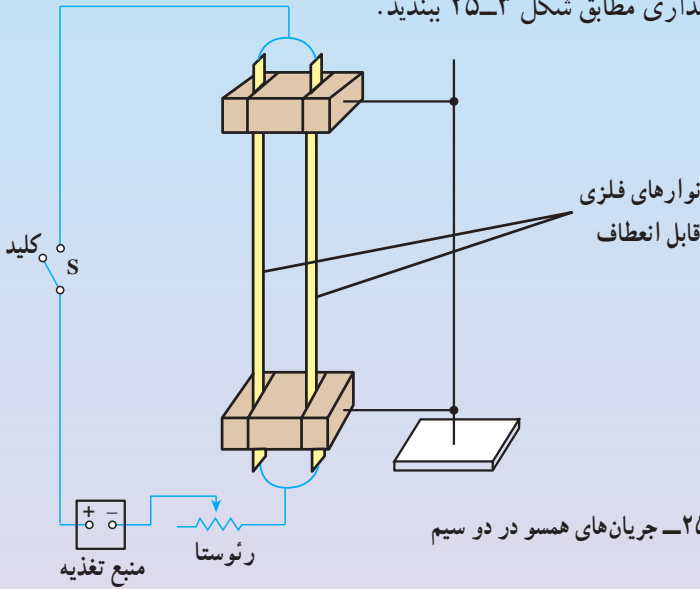
### ۳-۶- نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان

در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. هم‌چنین در بخش ۳-۲ دیدیم که آهنربا بر سیم حامل جریان نیرو وارد می‌کند. حال فرض کنید که برای ایجاد میدان مغناطیسی به جای آهنربا از یک سیم حامل جریان استفاده کنیم. اگر سیم حامل جریان دیگری را در مجاورت این سیم قرار دهیم، آیا بر آن نیروی وارد می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این پرسش آزمایش ۳-۶ را انجام دهید.

### آزمایش ۶-۳

وسایله‌های آزمایش: دو نوار فلزی نازک قابل انعطاف به پهنای تقریبی یک سانتی‌متر، دو پایه‌ی نارسانا (چوبی)، رئوستا، منبع تغذیه‌ی جریان یکنواخت، کلید قطع و وصل و سیم رابط.

۱- مداری مطابق شکل ۲۵-۳ ببندید.

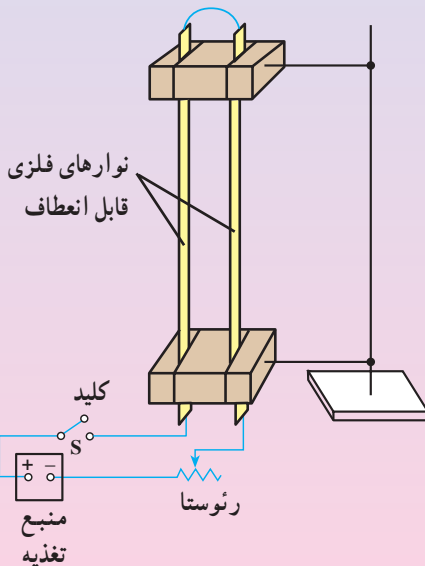


شکل ۲۵-۳- جریان‌های همسو در دو سیم موازی

۲- با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. توجه کنید که جریان در دو سیم موازی و همسو است. مشاهده‌ی خود را گزارش دهید.

۳- مداری مطابق شکل ۲۶-۳ ببندید.

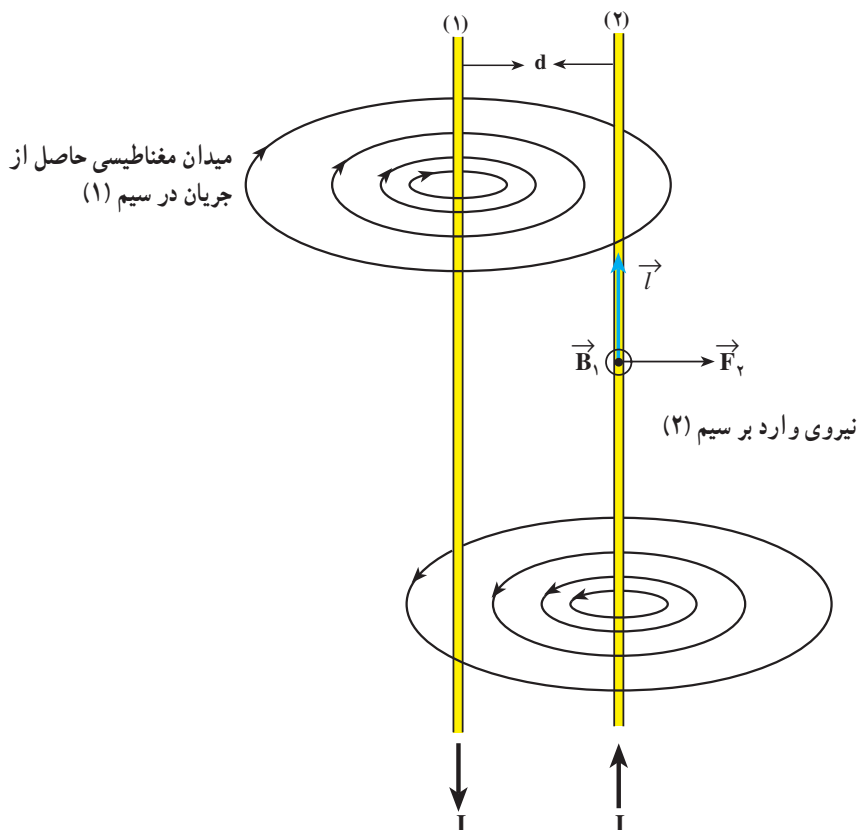
۴- با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. در این حالت جریان در دو سیم در جهت‌های مخالف است. مشاهده‌های خود را گزارش دهید.



شکل ۲۶-۳- جریان‌های در جهت‌های مخالف در دو سیم موازی

آزمایش صفحه‌ی قبل نشان می‌دهد که سیم‌های حامل جریان الکتریکی بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. هرگاه جریانی که از دو سیم می‌گذرد همسو باشد (شکل ۳-۲۵)، دو سیم یک‌دیگر را می‌ربایند، و اگر جریانی که از دو سیم می‌گذرد در جهت‌های مخالف باشد (شکل ۳-۲۶) دو سیم یک‌دیگر را می‌رانند.

نیروی را که بر هر سیم وارد می‌شود، می‌توان برحسب میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم دیگر توضیح داد. برای این کار، دو سیم مستقیم و خیلی دراز موازی را که حامل جریان  $I$  هستند و به فاصله‌ی  $d$  از یک‌دیگر قرار گرفته‌اند، مطابق شکل ۳-۲۷ در نظر می‌گیریم. جریان الکتریکی در سیم شماره‌ی (۱) در فضای اطراف آن، میدان مغناطیسی ( $\vec{B}_1$ ) را ایجاد می‌کند. جهت میدان  $\vec{B}_1$  در محل سیم شماره‌ی (۲) همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است برونسو است. چون سیم شماره‌ی (۲) نیز حامل جریان الکتریکی  $I$  است، میدان  $\vec{B}_1$  بر آن نیرو وارد می‌کند. این نیرو را در شکل با  $\vec{F}_r$  نشان داده‌ایم، جهت  $\vec{F}_r$  با استفاده از قاعده‌ی دست راست تعیین می‌شود.



شکل ۳-۲۷- جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های در جهت مخالف

## تمرین ۲-۳

جهت نیروی وارد بر سیم شماره‌ی (۱) در شکل ۳-۲۷ را با استدلالی مشابه تعیین کنید.

## فعالیت ۸-۳

جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های همسو را با رسم شکل و استفاده از قاعده‌ی دست راست مشخص کنید.

## تمرین ۳-۳

از دو سیم بلند موازی که به فاصله‌ی  $d$  از یک‌دیگر قرار دارند، جریانی به شدت  $I$  می‌گذرد، جهت جریان در هر دو سیم یکسان است، نیرویی را که به یک متر از هر یک از سیم‌ها وارد می‌شود به دست آورید.

دیدیم که دو سیم مستقیم دراز و موازی حامل جریان با توجه به جهت جریان بر هم نیروهای ربایشی یا رانشی وارد می‌کنند، این واقعیت، اساس تعریف عملیاتی\* یکای شدت جریان یعنی آمپر در SI است. مطابق این تعریف:

هرگاه از دو سیم نازک، موازی، مستقیم و بسیار دراز، که به فاصله‌ی یک متر از یک‌دیگر در خلأ قرار دارند، جریان‌های مساوی عبور کند — به گونه‌ای که بر یک متر از طول هر یک از سیم‌ها نیرویی برابر  $2 \times 10^{-7}$  نیوتون وارد شود — جریانی که از هر یک از سیم‌ها می‌گذرد، برابر یک آمپر است.

## ۳-۷- خاصیت مغناطیسی مواد

پیش از این دیدیم که برخی مواد خاصیت آهنربایی دارند، و در برخی مواد دیگر در حضور میدان مغناطیسی خاصیت آهنربایی القا می‌شود. برای نمونه هسته‌ی آهنی یک آهنربای الکتریکی را به یاد بیاورید. این سؤال پیش می‌آید که منشأ این رفتار مواد چیست؟ در این بخش به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

---

\* تعریف عملیاتی یکا به معنای ارائه‌ی روش اندازه‌گیری آن یکا است.

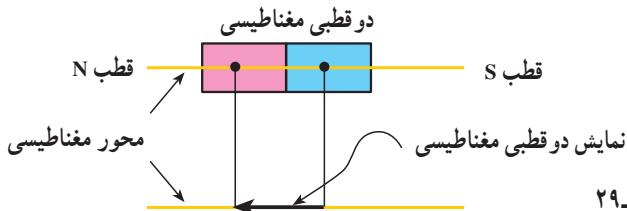
یکی از ویژگی‌های جالب آهنرباها این است که اگر آهنربایی را به دو یا چند قطعه بشکنیم، هر قطعه



شکل ۳-۲۸- هر قطعه از یک آهنربا، یک دوقطبی مغناطیسی است.

نیز خود یک آهنربا با دو قطب N و S است (شکل ۳-۲۸). آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هر قدر این عمل شکستن را ادامه دهیم، باز هم قطعه‌های حاصل دارای دو قطب N و S خواهند بود. می‌توان چنین نتیجه گرفت که قطب N از قطب S جداشدنی نیست و کوچکترین ذره‌های تشکیل دهنده آهنرباها (یعنی اتم‌ها یا مولکول‌ها) نیز آهنربا هستند و دو قطب N و S دارند.

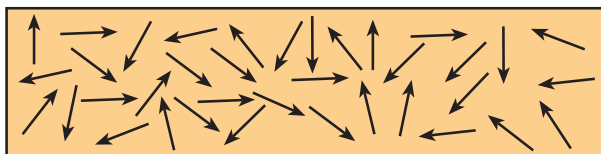
این آهنرباهای کوچک را دوقطبی مغناطیسی می‌نامند؛ زیرا هر یک همواره دو قطب N و S دارند. خطی را که دو قطب یک دوقطبی مغناطیسی را به هم متصل می‌کند، محور مغناطیسی آن می‌نامند. یک دوقطبی مغناطیسی را با یک پیکان نمایش می‌دهند (شکل ۳-۲۹).



شکل ۳-۲۹

موادی را که اتم‌ها یا مولکول‌های سازنده آن‌ها خاصیت مغناطیسی دارند، مواد مغناطیسی می‌نامند. نحوه‌ی سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک در مواد مغناطیسی مختلف، متفاوت است. به همین دلیل مواد از لحاظ ویژگی‌های مغناطیسی نیز با هم تفاوت دارند. در ادامه، به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می‌پردازیم.

**مواد پارامغناطیس:** دوقطبی‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی پارامغناطیسی دارای سمت‌گیری مشخص و منظمی نیستند و در جهت‌های کاتوره‌ای قرار دارند (شکل ۳-۳۰). در نتیجه این مواد خاصیت مغناطیسی ندارند. اگر آن‌ها را درون یک میدان مغناطیسی (مثلاً نزدیک یک آهنربا) قرار دهیم، دوقطبی‌های کوچک مانند عقربه‌های مغناطیسی در نزدیکی آهنربا رفتار می‌کنند؛ یعنی، در



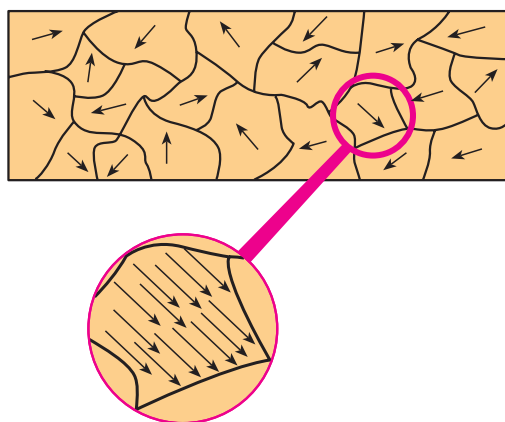
شکل ۳-۳۰- سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی در ماده‌ی پارامغناطیس در غیاب میدان مغناطیسی

راستای خط‌های میدان مغناطیسی منظم می‌شوند. هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد، تعداد بیش‌تری از این دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک با میدان هم‌خط می‌شوند. در نتیجه، خاصیت مغناطیسی ماده بیش‌تر می‌شود.

اگر آهن‌ریا را از این مواد دور کنیم، دوقطبی‌های مغناطیسی دوباره به سرعت به وضعیت کاتوره‌ای که در غیاب میدان داشتند، برمی‌گردند.

به این ترتیب، مواد پارامغناطیس در میدان‌های مغناطیسی قوی خاصیت مغناطیسی پیدا می‌کنند. منگنز، پلاتین، آلومینیم، فلزهای قلیایی و قلیایی خاکی، اکسیژن و اکسید ازت از جمله مواد پارامغناطیسی‌اند.

**مواد فرومغناطیس:** در برخی از مواد مغناطیسی، دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک به‌طور خود به خود با دوقطبی‌های مجاور خود هم‌خط می‌شوند. این‌گونه مواد را فرومغناطیس می‌نامند. در عمل، همه‌ی بخش‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی فرومغناطیس در یک راستا قرار ندارند بلکه این‌گونه مواد مانند شکل ۳-۳۱ از بخش‌های بسیار کوچکی با ابعاد خیلی کم‌تر از میلی‌متر تشکیل شده‌اند به‌طوری که دوقطبی‌های مغناطیسی درون هر بخش به‌طور کامل، هم‌خط‌اند. ولی سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی هر بخش با بخش‌های مجاور آن تفاوت دارد. هر بخش را یک حوزه‌ی مغناطیسی می‌نامند.

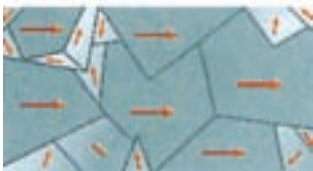


شکل ۳-۳۱- یک ماده‌ی فرومغناطیس در حالت طبیعی

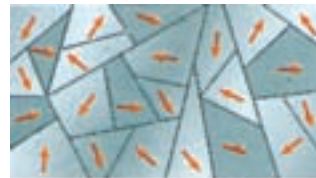
ممکن است سمت‌گیری و اندازه‌ی حوزه‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی فرومغناطیس به‌گونه‌ای باشد که در کل اثر یک‌دیگر را خنثی کنند و ماده در مجموع، آهن‌ریا نباشد (شکل ۳-۳۲ الف).



این گونه مواد را می توان با قرار دادن در یک میدان مغناطیسی آهنربا کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی بر حوزه های مغناطیسی باعث می شود که دوقطبی های مغناطیسی هر حوزه تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند و جهت آن ها به جهت میدان خارجی متمایل شود. علاوه بر این حوزه هایی که نسبت به میدان در وضع مناسبی قرار دارند (با میدان همسویند) رشد می کنند؛ یعنی، حجمشان زیاد می شود و در نتیجه، حوزه هایی که سمت گیری آن ها نسبت به میدان مناسب نیست، کوچک شوند؛ یعنی، مرز بین حوزه ها جابه جا می شود، و در نتیجه ماده در مجموع خاصیت آهنربایی پیدا می کند، شکل ۳۲-۳ ب. حرکت مرز حوزه ها در مواد فرومغناطیسی به صورت طرح وار در شکل ۳-۳۳ نشان داده شده است. در شکل ۳-۳۳ الف یک ماده ی فرومغناطیسی با چهار حوزه در میدان خارجی صفر قرار دارد. سمت گیری حوزه های مغناطیسی در این شکل به صورتی است که در کل ماده دارای خاصیت مغناطیسی نیست. در شکل ۳-۳۳ ب ماده ی فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی  $\vec{B}$  قرار داده ایم: مرزهای حوزه ها جابه جا شده اند و در نتیجه، ماده در مجموع خاصیت مغناطیسی پیدا کرده است. در شکل ۳-۳۳ پ میدان مغناطیسی خارجی آن قدر قوی است که حجم حوزه های با سمت گیری نامناسب عملاً به صفر رسیده است و همه ی حجم ماده را حوزه ی با سمت گیری مناسب (همسو با میدان) اشغال کرده است. در این حالت ماده در مجموع بیشترین خاصیت آهنربایی را دارد.

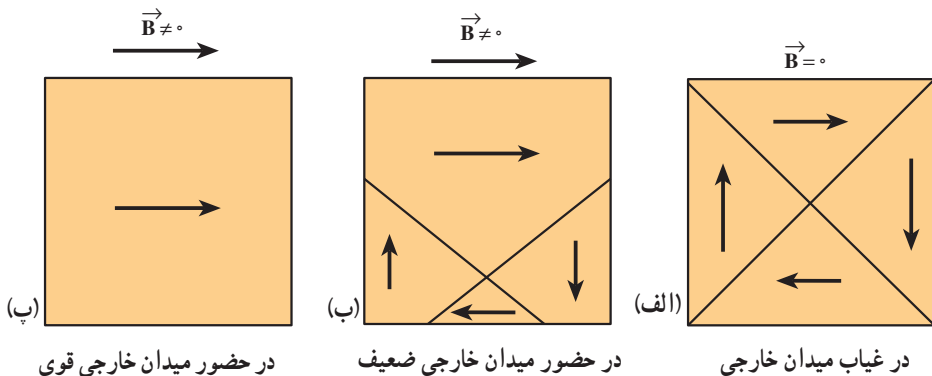


(ب) ماده ی فرومغناطیسی آهنربا است.



(الف) ماده ی فرومغناطیسی آهنربا نیست.

شکل ۳-۳۲ حوزه های مغناطیسی



شکل ۳-۳۳ جابه جا شدن مرزهای بین حوزه ها در مواد فرومغناطیسی

در برخی از مواد فرومغناطیس مانند آهن، کبالت و نیکل در صورتی که خالص باشند، حجم حوزه‌ها به سهولت تغییر می‌کند و در نتیجه به سهولت به روش ذکر شده آهنربا می‌شوند و خاصیت آهنربایی خود را نیز به راحتی از دست می‌دهند. این مواد را فرومغناطیس نرم می‌نامند. از این گونه مواد در هسته‌ی سیملوله‌ها استفاده می‌شود. مواد فرومغناطیس نرم با حذف میدان مغناطیسی خارجی خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهند و به دلیل همین خاصیت، آن‌ها برای ساختن آهنرباهای الکتریکی (آهنرباهای غیر دائم) مناسب‌اند.

برخی دیگر از مواد مانند فولاد (آهن به اضافه‌ی دو درصد کربن)، آلیاژهای دیگری از آهن، کبالت و نیکل به سختی آهنربا می‌شوند؛ یعنی، حجم حوزه‌ها در آن‌ها به سختی تغییر می‌کند. این مواد را فرومغناطیس سخت می‌نامند. در این گونه مواد برای افزایش حجم حوزه‌هایی که سمت‌گیری مناسب دارند (یعنی با میدان همسو هستند) به میدان‌های مغناطیسی خارجی قوی‌تری نیاز است. در این مواد، سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها پس از حذف میدان خارجی به سهولت تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، پس از برداشتن میدان مغناطیسی خارجی، ماده‌ی فرومغناطیس سخت، خاصیت آهنربایی خود را حفظ می‌کند. به همین دلیل این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب‌اند. برای خاصیت آهنربایی هر ماده‌ی فرومغناطیس مقدار بیشینه‌ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی پیش می‌آید که ماده‌ی فرومغناطیس در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد؛ به طوری که همه‌ی دوقطبی‌های مغناطیسی اتمی در همه‌ی حوزه‌ها به موازات هم به خط شوند.

## مطالعه‌ی آزاد

### میدان مغناطیسی زمین و اثرهای آن

بشر از گذشته‌های بسیار دور به خاصیت مغناطیسی زمین پی برده است. ملاحان و جهانگردان در کارهای جاری خود همواره از قطب‌نما استفاده می‌کنند. اثرهای میدان مغناطیسی زمین نیز بر زندگی جانوران و گیاهان، موضوعی جالب و بحث‌انگیز برای پژوهشگران است. مثلاً پژوهش‌هایی در قرن بیستم نشان داد که در مغز برخی از پرندگان کوچنده، ساز و کاری جهت تشخیص راستای میدان مغناطیسی زمین موجود است.

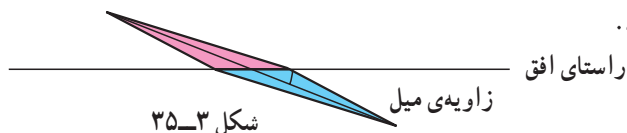
در سال ۱۹۵۸ میلادی (۱۳۳۷ هجری خورشیدی) با پژوهش‌هایی که توسط

ماهواره‌ی اکسپلورر\* اول انجام گرفت، معلوم شد، در اطراف زمین ناحیه‌ای به نام کمربند وان‌آلن موجود است، که دارای خاصیت مغناطیسی بوده و ذرات باردار تابیده از پرتوهای کیهانی و خورشیدی در این ناحیه به دام می‌افتند. راستای میدان مغناطیسی زمین ثابت نیست و در طول قرن‌های متمادی در تغییر بوده است. اکنون قطب جنوب آن در کانادا است. زاویه‌ای که راستای شمال - جنوب جغرافیا با راستای میدان مغناطیسی می‌سازد زاویه‌ی انحراف نام دارد.



شکل ۳-۳۴

همچنین راستای میدان مغناطیسی در نقاط مختلف زمین در راستای افق قرار ندارد. زاویه‌ای که عقربه‌ی مغناطیسی با راستای افق تشکیل می‌دهد زاویه‌ی میل نام دارد.



شکل ۳-۳۵

\* Expolorer

## تمرین های فصل سوم

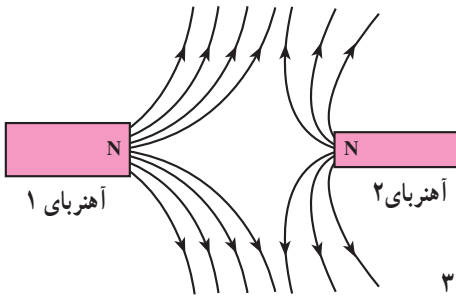
۱- الف - آهنربایی با قطب های نامشخص در اختیار داریم. حداقل دو روش برای تعیین

قطب های این آهنربا، بیان کنید.

ب - خط های میدان مغناطیسی میان دو

آهنربا در شکل ۳۶-۳ نشان داده شده است. کدام

آهنربا ضعیف تر است؟



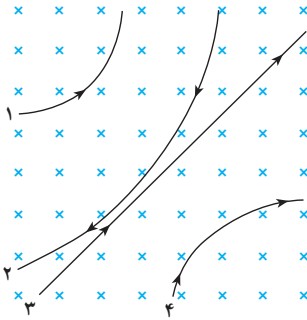
شکل ۳۶-۳

۲- چهار ذره هنگام عبور از میدان

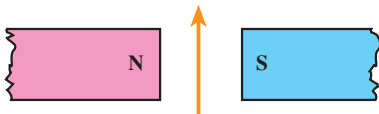
مغناطیسی درون مسیرهایی مطابق شکل

۳۷-۳ می پیمایند. درباره ی نوع بار هر ذره چه

می توان گفت؟



شکل ۳۷-۳



(الف)

۳- سیم قائمی در میدان مغناطیسی

زمین (که رو به شمال است) قرار دارد.

جریانی از پایین به بالا از این سیم عبور

می کند، جهت نیروی وارد بر این سیم

چگونه است؟



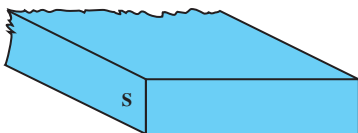
(ب)

۴- جهت نیروی الکترومغناطیسی

بر سیم حامل جریان را در هر یک از

شکل های ۳۸-۳ الف، ب و پ با استفاده

از قاعده ی دست راست بیابید.

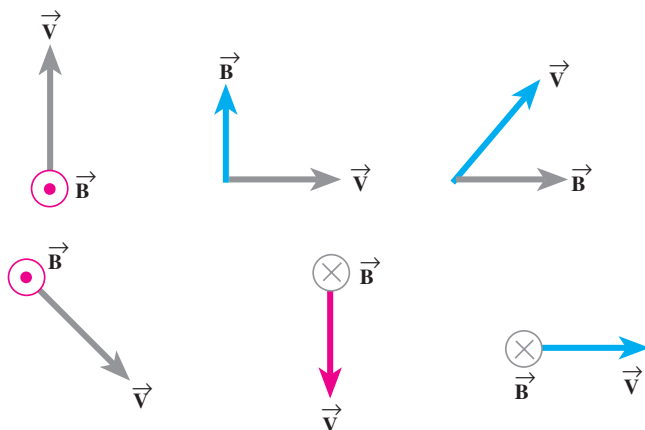


(پ)



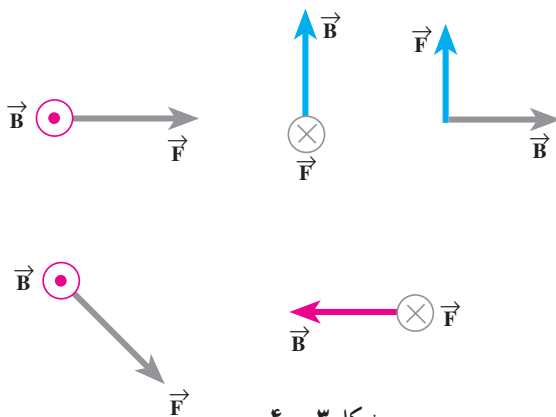
شکل ۳۸-۳

۵- جهت نیروی وارد بر بار مثبت را در هر یک از نمودارهای شکل ۳-۳۹ تعیین کنید.

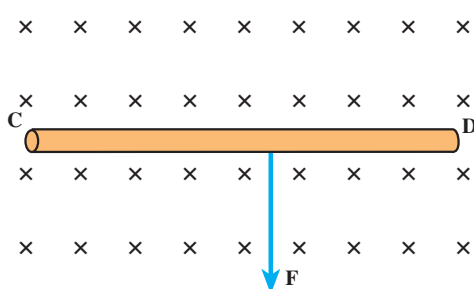


شکل ۳-۳۹

۶- نیروی  $\vec{F}$  وارد بر الکترونی که در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  در حرکت است در شکل ۳-۴۰ نشان داده شده است. در هر یک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید. (فرض کنید راستای حرکت الکترون بر میدان مغناطیسی عمود است.)



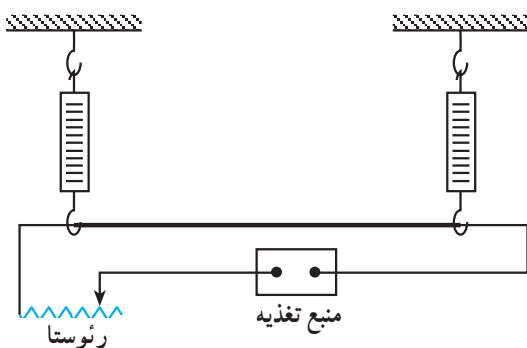
شکل ۳-۴۰



شکل ۳-۴۱

۷- سیم رسانای CD به طول ۲m مطابق شکل ۳-۴۱ عمود بر میدان مغناطیسی با اندازه‌ی ۵/۰ T قرار گرفته است. اگر نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم برابر ۱N باشد، جهت و اندازه‌ی جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.

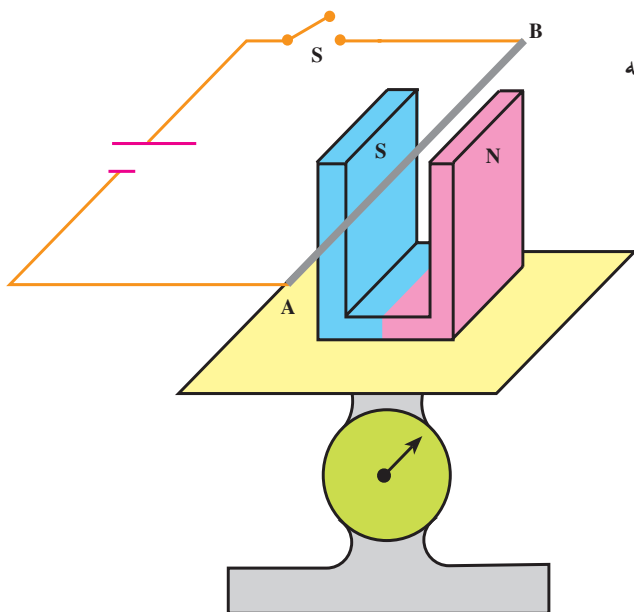
۸- یک سیم که حامل جریانی به شدت ۱۶ آمپر است، مطابق شکل ۳-۴۲ توسط دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده است، به طور افقی و در راستای غرب به شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را افقی و یکنواخت و دقیقاً به سوی شمال با بزرگی  $5 \text{ mT}$  بگیرید. (الف) نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را تعیین کنید. (ب) اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور دهیم. جرم یک متر از طول این سیم  $8 \text{ gr}$  است. ( $g = 10 \text{ N/kg}$ )



شکل ۳-۴۲

۹- یک آهنربای نعلی شکل را روی کفهی یک ترازوی حساس قرار می‌دهیم، سیم AB را که مطابق شکل ۳-۴۳ در میان دو قطب آهنربا قرار دارد به وسیله‌ی یک کلید به دو پایانه‌ی یک باتری وصل می‌کنیم.

آیا با بستن کلید عددی که ترازو نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ توضیح دهید.



شکل ۳-۴۳

۱۰- پروتونی با سرعت  $4/4 \times 10^6 \text{ m/s}$  تحت زاویه  $53^\circ$  با میدان مغناطیسی ای به بزرگی  $18 \text{ mT}$  در حرکت است.

الف) بزرگی نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

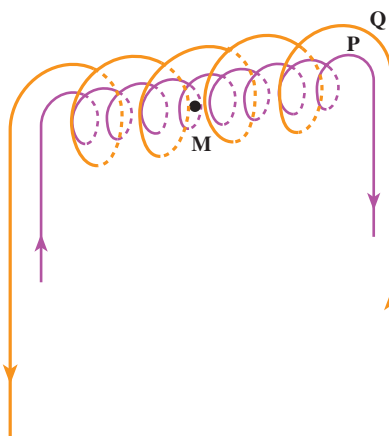
ب) اگر این نیرو تنها نیرویی باشد که بر پروتون وارد می‌شود، شتاب پروتون را حساب کنید.  
(بار الکتریکی پروتون  $1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و جرم آن  $1/7 \times 10^{-27} \text{ kg}$  است).

۱۱- راستای نیروی وارد بر یک الکترون متحرک در میدان الکتریکی را با راستای نیروی وارد بر این الکترون در میدان مغناطیسی مقایسه کنید.

۱۲- از پیچه‌ی مسطحی به شعاع  $5 \text{ cm}$  که از  $200^\circ$  دور سیم نازک درست شده است، جریان  $12 \text{ A}$  می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه حساب کنید.

۱۳- سیم‌لوله‌ای شامل  $250^\circ$  دور حلقه است که دور یک لوله‌ی پلاستیکی تو خالی به طول  $14^\circ$  متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیم‌لوله  $8 \text{ A}$  باشد، بزرگی میدان مغناطیسی در درون سیم‌لوله را حساب کنید.

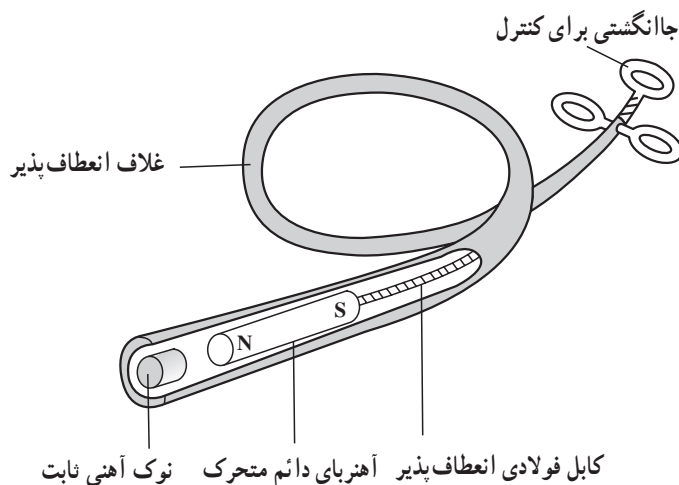
۱۴- دو سیم‌لوله‌ی  $P$  و  $Q$  هم محور دارای طول برابر ولی تعداد دور متفاوت هستند (شکل ۳-۴۴). تعداد دور سیم‌لوله‌ی  $P$  برابر  $200^\circ$  و تعداد دور سیم‌لوله‌ی  $Q$  برابر  $300^\circ$  است. اگر جریان  $1 \text{ A}$  از سیم‌لوله‌ی  $Q$  عبور کند، از سیم‌لوله‌ی  $P$  چه جریانی باید عبور کند تا برآیند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیم‌لوله در نقطه‌ی  $M$  (روی محور دو سیم‌لوله) برابر صفر شود؟



شکل ۳-۴۴

۱۵- الکترونی با سرعت  $2/4 \times 10^5 \text{ m/s}$  در یک میدان مغناطیسی در حرکت است. نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند. (الف) اگر این نیروی بیشینه بالاسو و برابر  $6/8 \times 10^{-14} \text{ N}$  باشد، بزرگی و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید. (ب) چه میدان الکتریکی همین نیرو را ایجاد می‌کند؟ (بار الکتریکی الکترون  $1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$  است).

۱۶- کودکی یک قطعه‌ی کوچک فلز را بلعیده است که در گلوئی او گیر کرده است. پزشک با دستگاهی که در شکل ۳-۴۵ دیده می‌شود، می‌خواهد فلز را بیرون بیاورد.



شکل ۳-۴۵

الف) هنگامی که آهنربای دائم به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟  
 ب) آهن برای ساختن نوک ثابت چه مزیتی دارد؟  
 پ) این وسیله را باید به درون گلوئی کودک وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد. چرا غلاف باید انعطاف پذیر باشد؟  
 ت) پزشک می‌خواهد یک گیره‌ی آهنی کاغذ و یک واشر آلومینیومی را از گلوئی کودک بیرون بیاورد. کدامیک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟





القای الکترومغناطیسی مبنای تولید انرژی الکتریکی در مولدهای جریان متناوب است. برای انتقال انرژی الکتریکی تا فاصله‌های خیلی دور از خطوط انتقال با ولتاژ بالا استفاده می‌شود.

## القای الکترو مغناطیسی

### ۴-۱- پدیده‌ی القای الکترو مغناطیسی

در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که با استفاده از روش القای الکتریکی می‌توان اجسام رسانا را باردار کرد. در فصل قبل نیز با پدیده‌ی القای مغناطیسی آشنا شدیم. در پدیده‌ی اول در اثر القا، بار الکتریکی در ماده‌ی رسانا پدیدار می‌شود. در پدیده‌ی دوم، در اثر القا در ماده‌ی فرومغناطیس خاصیت مغناطیسی ایجاد می‌شود. پدیده‌ی القایی دیگری نیز وجود دارد که در آن، جریان الکتریکی در یک رسانا القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده آشنا می‌شوید.

#### آزمایش ۴-۱

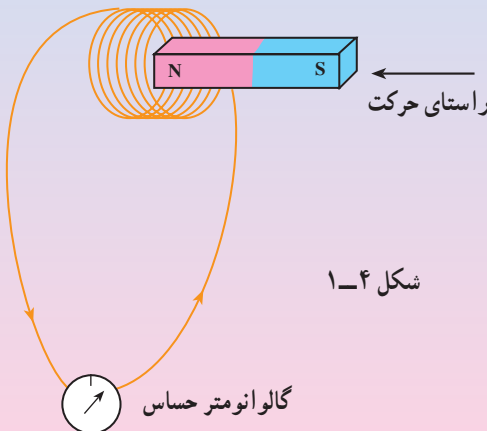
وسایله‌های آزمایش: میلی‌آمپرسنج صفر وسط (گالوانومتر)، آهنربای میله‌ای، پیچه و سیم رابط.

۱- با پیچه و گالوانومتر مداری مانند شکل ۴-۱ را ببندید.

۲- قطب N آهنربای میله‌ای را مطابق شکل به پیچه نزدیک کنید. آن چه را که در حین انجام دادن این عمل می‌بینید، یادداشت کنید.

۳- قطب N آهنربای میله‌ای را نزدیک پیچه نگه دارید. سپس آن را از پیچه دور کنید. آن چه را مشاهده می‌کنید، بنویسید.

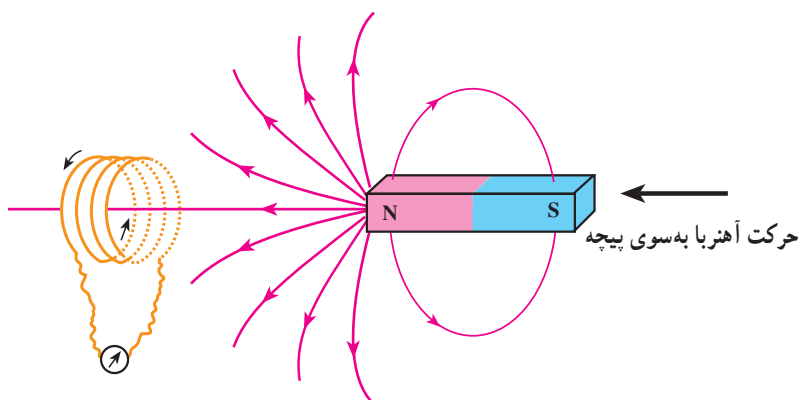
۴- بندهای ۲ و ۳ را با قطب S آهنربا نیز انجام دهید.



شکل ۴-۱

در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام دادن آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۴-۱ دریافتند که با دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه‌ی میلی آمپرسنج منحرف می‌شود، و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ مانند وقتی که در مدار یک مولد وجود داشته باشد. یعنی با حرکت آهنربا نسبت به پیچه، یک جریان الکتریکی در مدار القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند. القای الکترومغناطیسی اساس کار مولد جریان متناوب، دینام، مبدل‌ها و بسیاری از وسیله‌های الکتریکی است.

دور یا نزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می‌شود (شکل ۴-۲) و همین امر جریان الکتریکی القایی را در پیچه ایجاد می‌کند. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که: تغییر اندازه‌ی میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می‌شود.



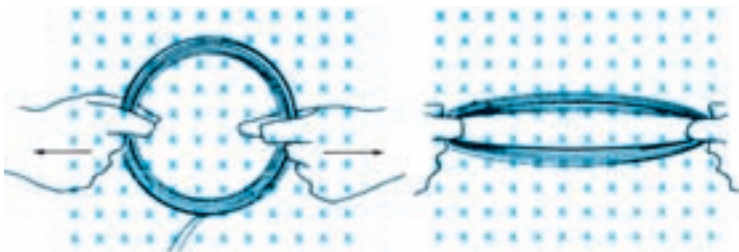
شکل ۲-۴

آزمایش نشان می‌دهد که علاوه بر روش گفته شده، به روش‌های دیگر نیز می‌توان در یک پیچه جریان الکتریکی القا کرد.

اگر پیچه‌ای از یک سیم انعطاف‌پذیر را مطابق شکل ۴-۳ در میدان مغناطیسی یکنواخت B قرار دهیم، سپس پیچه را تغییر شکل دهیم به گونه‌ای که مساحت حلقه‌ی پیچه تغییر کند، خواهیم دید که در حین این عمل جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که:

تغییر مساحت مدار بسته در میدان مغناطیسی نیز می‌تواند عامل ایجاد جریان القایی

شود.



شکل ۴-۳ با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

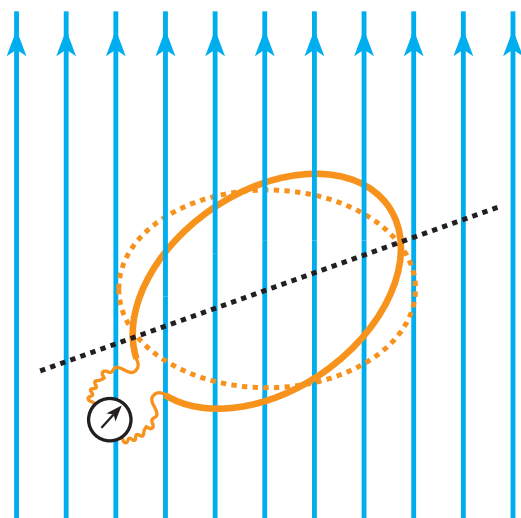
با انجام دادن فعالیت زیر، با یک روش دیگر ایجاد جریان الکتریکی القایی آشنا می‌شوید.

### فعالیت ۴-۱

یک آهنربای میله‌ای را در نزدیکی یک پیچه قرار دهید. بدون آنکه فاصله‌ی آهنربا از پیچه را تغییر دهید، پیچه را بچرخانید. هر تغییری را که در گالوانومتر مشاهده می‌کنید، بنویسید.

با چرخاندن پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت مطابق شکل ۴-۴، بزرگی میدان مغناطیسی و مساحت حلقه‌ی مدار تغییر نمی‌کند، ولی زاویه‌ی بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. از این فعالیت نیز می‌توان نتیجه گرفت که:

تغییر زاویه‌ی بین حلقه و راستای میدان مغناطیسی نیز می‌تواند عامل برقراری جریان الکتریکی القایی شود.



شکل ۴-۴ در حین چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه‌ی بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

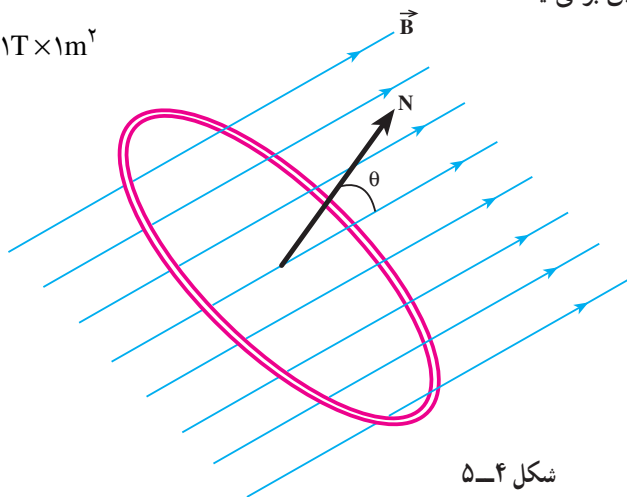
## ۴-۲- شار مغناطیسی

در آزمایش‌های قبل دیدیم که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در حلقه، تغییر مساحت حلقه، و یا تغییر زاویه‌ی بین سطح حلقه و جهت میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در بیچه القا می‌شود. کمیتی به نام شار مغناطیسی، این سه کمیت را دربر دارد. این کمیت نرده‌ای به صورت زیر معرفی می‌شود. فرض کنید حلقه‌ای به مساحت  $A$  مطابق شکل ۴-۵ در میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  قرار دارد. شار میدان مغناطیسی یکنواخت\* که از سطح حلقه می‌گذرد به صورت زیر تعریف و با نماد  $\Phi$  نمایش داده می‌شود.

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۴-۱)$$

که در این رابطه،  $\theta$  زاویه‌ی بین بردار میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  و نیم خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم خط را می‌توان به طور اختیاری در هر یک از دو طرف سطح حلقه رسم کرد، ولی در هر مورد پس از انتخاب دیگر جهت آن را نباید عوض کرد). یکای شار مغناطیسی در SI وبر (Wb) است. از معادله‌ی ۴-۱ چنین برمی‌آید:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$$



شکل ۴-۵

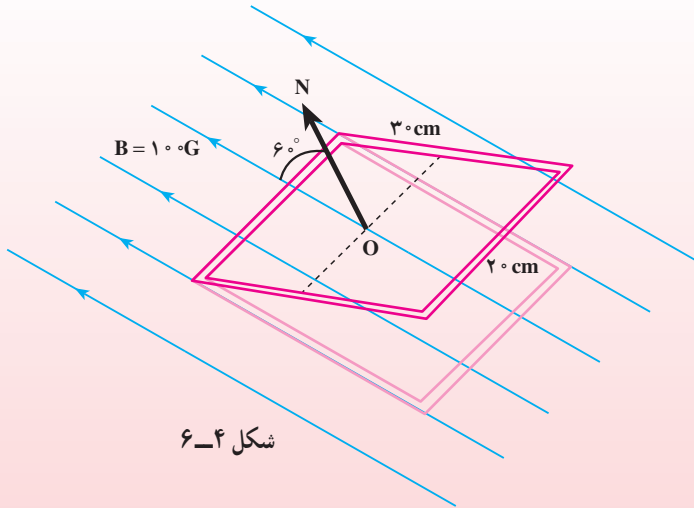
### مثال ۴-۱

الف) شار مغناطیسی عبوری از سطح یک قاب مستطیلی شکل به ابعاد  $3 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  که خط عمود بر آن با میدان مغناطیسی یکنواخت  $100$  گاوس مطابق

\* اگر میدان مغناطیسی یکنواخت نباشد، رابطه‌ی مربوط به شار مغناطیسی پیچیده‌تر می‌شود. این رابطه فراتر از سطح برنامه این کتاب است.

شکل ۴-۶ زاویه‌ی  $6^\circ$  می‌سازد را به‌دست آورید.

ب) اگر این قاب را بچرخانیم به‌طوری که زاویه‌ی خط عمود بر آن با خط‌های میدان مغناطیسی از  $6^\circ$  به  $3^\circ$  کاهش یابد، شار مغناطیسی چه قدر تغییر می‌کند؟



حل: الف) نیم خط  $ON$  را مطابق شکل عمود بر سطح رسم می‌کنیم. زاویه‌ی بین خط‌های میدان و نیم خط  $ON$  برابر  $6^\circ$  است؛ بنابراین داریم:

$$A = 3 \times 2 = 6 \text{ cm}^2 = 6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$B = 10 \text{ G} = 10^{-2} \text{ T}$$

$$\Phi = BA \cos \theta = 10^{-2} \times 6 \times 10^{-2} \cos 6^\circ = 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

ب) در وضعیت جدید داریم:

$$\theta = 3^\circ$$

در نتیجه، به‌دست می‌آوریم:

$$\Phi' = BA \cos \theta = 10^{-2} \times 6 \times 10^{-2} \cos 3^\circ$$

$$\Phi' = 5/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

تغییر شار حاصل از این چرخش برابر است با:

$$\Delta \Phi = \Phi' - \Phi = 5/2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$$

$$\Delta \Phi = 2/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

## تمرین ۴-۱

حلقه‌ای به مساحت  $5\text{ cm}^2$  در یک میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  قرار دارد. با فرض این که خط‌های میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  عمود بر سطح حلقه باشند، اگر بزرگی میدان مغناطیسی بدون تغییر جهت آن به اندازه  $3^\circ/\text{T}$  افزایش یابد، شار مغناطیسی که از سطح حلقه می‌گذرد، چه قدر تغییر می‌کند؟

با انجام دادن آزمایش‌ها و فعالیت‌های پیش درمی‌یابیم که تغییر هریک از کمیت‌های  $A$  و زاویه‌ی بین  $B$  و نیم‌خط عمود بر سطح باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، و تغییر شار مغناطیسی باعث ایجاد جریان الکتریکی القایی در مدار می‌شود. درست شبیه به وضعیتی که یک مولد در مدار باشد، و نیروی محرکه‌ی آن جریانی در مدار ایجاد کرده باشد. علاوه بر این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هر چه تغییر شار سریع‌تر اتفاق افتد، جریان القایی و نیروی محرکه‌ی القایی بزرگ‌تر خواهد شد. مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۲-۴ تا ۴-۴ هر چه حرکتی که باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربه‌ی گالوانومتر بیش‌تر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان بزرگ‌تری به وجود آمده است.

لنز، فیزیکدان آلمانی روس‌تبار، و فارادی پدیده‌ی القای الکترومغناطیسی را فرمول‌بندی کردند، و قانون‌های القای الکترومغناطیسی را بیان کردند.

## ۴-۳- قانون القای الکترومغناطیسی فارادی

بنابر قانون فارادی هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است.

یعنی هرچه آهنگ تغییر شار مغناطیسی بیش‌تر باشد، نیروی محرکه‌ی القایی و در نتیجه جریان ایجاد شده در مدار بیش‌تر خواهد بود. قانون فارادی را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد.

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-4)$$

در این رابطه،  $\mathcal{E}$  نیروی محرکه‌ی القایی برحسب ولت و  $\frac{d\Phi}{dt}$  آهنگ تغییر شار مغناطیسی (یعنی مشتق شار نسبت به زمان) برحسب وبر بر ثانیه ( $\frac{\text{Wb}}{\text{s}}$ ) است. علامت منفی نشان‌دهنده‌ی جهت

نیروی محرکه‌ی القایی است که در بخش بعد در مورد آن بیش‌تر سخن می‌گوییم.

**نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه:** هر پیچه را می‌توان به صورت چند حلقه سیم که به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند، در نظر گرفت. تغییر شار مغناطیسی در هر حلقه‌ی پیچه نیروی محرکه‌ای القا می‌کند. نیروی محرکه‌ی القایی کل، برابر مجموع نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه‌هاست. به بیان دیگر، نیروی محرکه‌ی القایی در هر پیچه با تعداد دورهای پیچه ( $N$ ) نیز نسبت مستقیم دارد؛ یعنی،

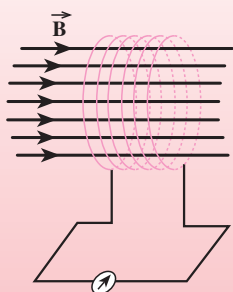
$$\mathcal{E} = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (۳-۴)$$

اگر شار مغناطیسی که از پیچه‌ای با  $N$  حلقه می‌گذرد در بازه‌ی زمانی  $\Delta t$  به اندازه‌ی  $\Phi$  تغییر کرده باشد، آهنگ متوسط تغییر شار مغناطیسی در بازه‌ی زمانی  $\Delta t$  برابر  $\frac{\Phi}{\Delta t}$  خواهد بود. نیروی محرکه‌ی القایی متوسط (که با  $\bar{\mathcal{E}}$  نمایش داده می‌شود) ایجاد شده در این پیچه از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Phi}{\Delta t} \quad (۴-۴)$$

## مثال ۲-۴

پیچه‌ای شامل  $۲۰۰$  دور سیم با مساحت سطح مقطع  $۲$  سانتی‌متر مربع مطابق شکل ۷-۴ در میدان مغناطیسی یکنواختی قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که خط‌های میدان بر سطح آن عمود است. بزرگی میدان مغناطیسی در بازه‌ی زمانی  $۳/۲$  میلی ثانیه و بدون تغییر جهت از  $۱۸\text{ T}$  به  $۲۲\text{ T}$  می‌رسد. اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط چه قدر است؟



شکل ۷-۴

**حل:** ابتدا شاری را که در دو حالت اولیه و نهایی از پیچه می‌گذرد، محاسبه می‌کنیم.

$$\Phi_1 = B_1 A \cos \theta = 0.18 \times 2 \times 10^{-4} \times \cos 0^\circ = 3.6 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

$$\Phi_2 = B_2 A \cos \theta = 0.22 \times 2 \times 10^{-4} \times \cos 0^\circ = 4.4 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$



تغییر شار مغناطیسی که از سطح پیچه می‌گذرد، برابر است با :

$$\Phi_2 - \Phi_1 = 4/4 \times 10^{-5} - 3/6 \times 10^{-5} = 0/8 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

این تغییر شار در بازه‌ی زمانی  $3/2 \times 10^{-3}$  ثانیه روی داده است؛ بنابراین،  
آهنگ متوسط تغییر شار برابر است با :

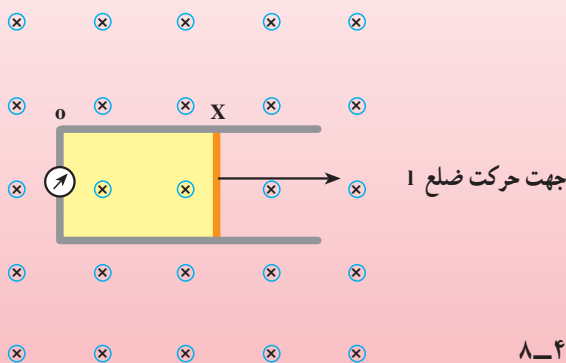
$$\frac{\Phi}{\Delta t} = \frac{0/8 \times 10^{-5}}{3/2 \times 10^{-3}} = 2/5 \times 10^{-3} \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$$

در نتیجه بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط برابر است با :

$$|\bar{\varepsilon}| = \left| -N \frac{\Phi}{\Delta t} \right| = \left| -200 \times 2/5 \times 10^{-3} \right| = 0/5 \text{ V}$$

### مثال ۳-۴

قاب مستطیلی شکلی که از سیم بدون روکش ساخته شده است مطابق شکل ۸-۴ در میدان مغناطیسی یکنواخت و ثابت با بزرگی  $0/18 \text{ T}$  قرار گرفته است. سطح حلقه بر میدان مغناطیسی عمود است. اگر ضلع  $l = 20 \text{ cm}$  با سرعت  $v = 20 \text{ m/s}$  در جهتی که در شکل نشان داده شده است حرکت کند بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی را محاسبه کنید.



شکل ۸-۴

حل: بنابر قانون فارادی، نیروی محرکه‌ی القایی برابر است با  $\frac{d\Phi}{dt}$ ، که

در آن  $\Phi$ ، شار مغناطیسی که از حلقه می‌گذرد، برابر است با :

$$\Phi = AB \cos \theta$$

در این مسئله،  $B$  بزرگی میدان مغناطیسی ثابت است، همچنین  $\theta$  زاویه‌ی میدان مغناطیسی با نیم‌خط عمود بر حلقه ثابت و برابر صفر است و  $\cos \theta = 1$ ، و تنها مساحت حلقه با زمان تغییر می‌کند. مساحت حلقه در هر لحظه برابر است با :

$$A = lx = lvt$$

در نتیجه آهنگ تغییر مساحت با زمان از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d(lvt)}{dt} = lv$$

در نتیجه، داریم :

$$|\varepsilon| = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| -\frac{d}{dt}(AB) \right| = B \frac{dA}{dt}$$

$$|\varepsilon| = lvB = 0.2 \times 2 \times 0.18$$

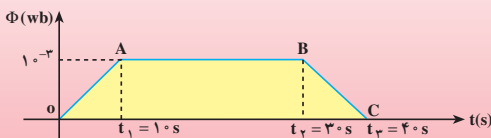
$$= 0.072 \text{ V} = 72 \text{ mV}$$

## تمرین ۲-۴

میدان مغناطیسی عمود بر یک قاب دایره‌ای شکل به قطر  $20$  سانتی‌متر با زمان تغییر می‌کند و در مدت  $5 \text{ s}$  از  $28^\circ / +$  تسلا به  $12^\circ / -$  تسلا می‌رسد (تغییر علامت نشان می‌دهد که جهت میدان نیز وارون شده است). نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در حلقه را حساب کنید.

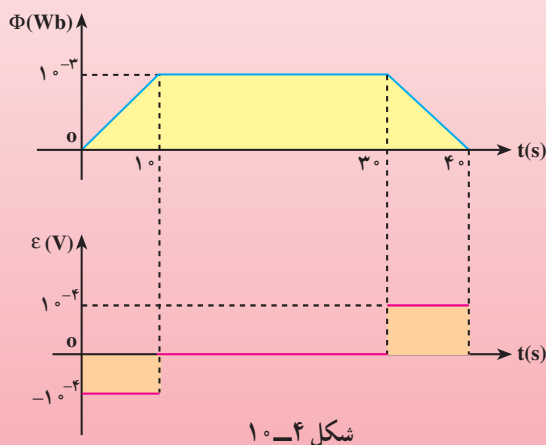
## مثال ۴-۴

نمودار تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در منحنی شکل ۴-۹ داده شده است. نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.



شکل ۴-۹

**حل:** نمودار تغییرات شار مغناطیسی برحسب زمان نشان می‌دهد که در بازه‌ی زمانی  $t_1 = 0 \rightarrow \Delta t_1$  شار به صورت خطی افزایش می‌یابد. در نتیجه، در این بازه نیروی محرکه‌ی القایی که برابر است با  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$ ، مقداری ثابت (برابر شیب خط OA) و منفی خواهد داشت و مقدار آن برابر است با  $10^{-4}$  ولت. در بازه‌ی زمانی  $t_2 = t_1 \rightarrow \Delta t_2$  شار ثابت مانده است. بنابراین،  $\frac{d\Phi}{dt} = 0$  و نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه برابر صفر است. در بازه‌ی زمانی  $t_3 = t_2 \rightarrow \Delta t_3$ ، شار به صورت خطی کاهش یافته است،  $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ ؛ و در نتیجه، نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه مثبت است و مقدار آن برابر است با  $10^{-4}$  ولت. نمودار این تغییرات در شکل ۴-۱۰ رسم شده است.



## ۴-۴ محاسبه‌ی جریان القایی

دیدیم که نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه (و یا در حلقه) جریانی تولید می‌کند که به آن جریان القایی گفته می‌شود. اگر مقاومت پیچه برابر  $R$  باشد، جریان القا شده در آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

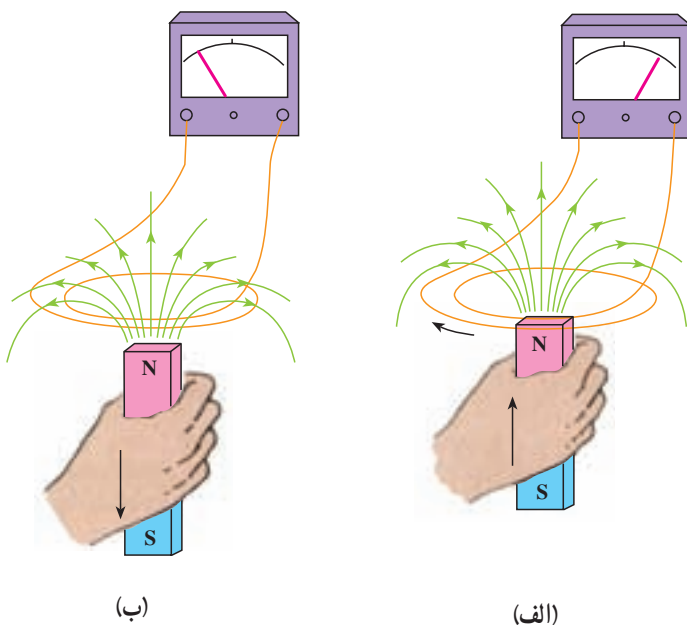
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (4-5)$$

قانون لنز که به صورت زیر بیان می‌شود، در واقع دستورالعملی است برای تعیین جهت جریان القایی.

جریان القایی در مدار در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن با عامل

به وجود آورنده‌ی جریان القایی یعنی تغییر شار مغناطیسی مخالفت می‌کند.

علامت منفی در رابطه‌ی ۵-۴ نشان‌دهنده‌ی همین مخالفت است. در عمل، برای به دست آوردن جهت جریان القایی در یک مدار از قانون لنز استفاده می‌شود. به عنوان مثال، اگر قطب N یک آهنربای میله‌ای را مطابق شکل ۱۱-۴ الف به یک پیچه نزدیک کنیم، شار مغناطیسی که از پیچه می‌گذرد، به دلیل قوی تر شدن میدان در محل پیچه، افزایش می‌یابد. جهت جریان القایی در پیچه همان طور که در شکل ۱۱-۴ الف نشان داده شده است در جهتی است که میدان مغناطیسی حاصل از آن در خلاف جهت میدان آهنربای میله‌ای باشد، تا با افزایش شار مغناطیسی که از پیچه می‌گذرد مخالفت کند. یعنی قطب N آهنربا را به عقب براند.



شکل ۱۱-۴- جریان القایی در جهتی است که با حرکت آهنربا به طرف پیچه مخالفت می‌کند.

### تمرین ۳-۴

قطب N یک آهنربای میله‌ای را مطابق شکل ۱۱-۴ ب از پیچه دور می‌کنیم، با استفاده از قانون لنز جهت جریان القایی را در پیچه تعیین کنید.

## مثال ۶-۴

سیملوله‌ای با  $500\ \Omega$  دور و مقاومت الکتریکی  $10\ \Omega$  و مساحت سطح مقطع  $25\text{cm}^2$  در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. برای اینکه جریانی به شدت  $1\text{mA}$  در سیملوله القا شود، میدان مغناطیسی با چه آهنگی باید تغییر کند؟ فرض کنید سطح مقطع سیملوله بر میدان مغناطیسی عمود است.

حل: زاویه‌ی بین میدان و خط عمود بر سطح سیملوله صفر است، در نتیجه داریم:

$$\Phi = BA$$

چون مساحت هر حلقه‌ی سیملوله ثابت است، تغییر  $\Phi$  در اثر تغییر در بزرگی میدان مغناطیسی است. در نتیجه تغییر شار مغناطیسی برابر است با:

$$\Delta\Phi = A\Delta B$$

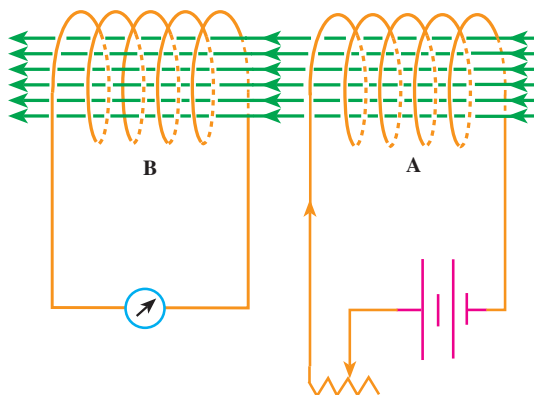
از سوی دیگر، با توجه به رابطه‌ی ۴-۴ اندازه‌ی جریان القایی برابر است با:

$$\begin{aligned} I &= \left| \frac{N}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \left| \frac{N}{R} \frac{A\Delta B}{\Delta t} \right| \\ &= \frac{NA}{R} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| \\ 10^{-3}\text{A} &= \frac{500 \times 25 \times 10^{-4}\text{m}^2}{10\ \Omega} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| \\ \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| &= 8 \times 10^{-3}\text{T/s} \end{aligned}$$

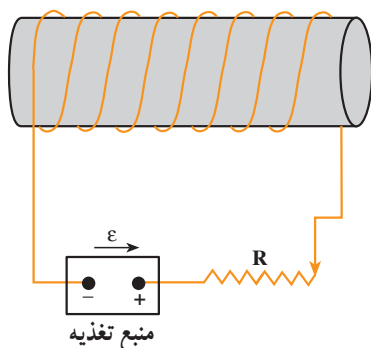
## ۴-۵- خودالقایی

در آزمایش‌ها و فعالیت‌هایی که از ابتدای این فصل تا این‌جا انجام داده‌اید، همواره یک عامل خارجی باعث تغییر شار مغناطیسی و در نتیجه، القای نیروی محرکه و جریان الکتریکی در مدار شده است. برای مثال در شکل ۴-۱۲ تغییر جریان در مدار A باعث تغییر شار مغناطیسی در سیملوله‌ی B و ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در مدار B می‌شود. در ادامه به بررسی این موضوع می‌پردازیم که: تغییر جریان الکتریکی در یک مدار حتی در خود مدار نیروی محرکه‌ای را القا می‌کند. برای این کار مداری مطابق شکل ۴-۱۳ در نظر بگیرید.

فرض کنید که روستا با بیش‌ترین مقاومت در مدار قرار گرفته است و جریان ثابتی از مدار



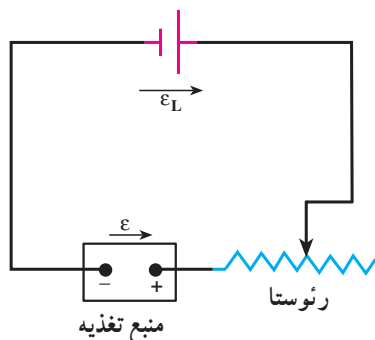
شکل ۴-۱۲- تغییر جریان در سیملوله A باعث ایجاد جریان در سیملوله B می‌شود.



شکل ۴-۱۳- خودالقایی - تغییر جریان در مدار نیروی محرکه‌ای در خود سیملوله القا می‌کند.

می‌گذرد. در نتیجه، شار مغناطیسی ثابت  $\Phi$  از سیملوله می‌گذرد. حال اگر مقاومت رئوستا را به تدریج کاهش دهیم، جریان در سیملوله افزایش می‌یابد. در مدتی که جریان در حال افزایش است، شار مغناطیسی که از سیملوله می‌گذرد افزایش پیدا می‌کند. بنابر قانون فارادی این تغییر شار باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در خود مدار می‌شود. روشن است که در تمام مدتی که جریان ثابتی از مدار می‌گذرد، چون شار مغناطیسی تغییر نمی‌کند نیروی محرکه‌ی القایی وجود ندارد. به این پدیده که تغییر جریان در یک مدار باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در همان مدار می‌شود **خودالقایی** می‌گویند. در این مثال، جهت این نیروی محرکه‌ی القایی چنان است که می‌خواهد مانع افزایش شار مغناطیسی‌ای شود که منبع تغذیه ایجاد می‌کند. افزایش شار مغناطیسی به دلیل افزایش شدت جریانی است که از مدار می‌گذرد، در نتیجه نیروی محرکه‌ی القایی در واقع در جهتی است که با افزایش شدت جریان

مقابله می کند. به عبارت دیگر در این حالت نیروی محرکه ی القایی معادل نیروی محرکه ی باتری ای عمل می کند که در جهت مخالف منبع تغذیه مانند شکل ۴-۱۴ در مدار قرار گرفته باشد.



شکل ۴-۱۴- خودالقایی باعث می شود که سیملوله مانند پیل  $\varepsilon$  در مدار عمل کند.

## ۲-۴ فعالیت

با بحث در گروه خود، نتیجه ی آزمایشی را پیش بینی کنید که در آن مشابه آزمایش بالا عمل شود؛ با این تفاوت که به جای کاهش مقاومت مدار، آن را افزایش دهند. دلیل وجود نیروی محرکه ی القایی و جهت آن را نیز مورد بحث قرار دهید.

به این ترتیب، دریافتیم که :

هرگاه جریانی که از یک سیملوله (یا یک پیچه) می گذرد، تغییر کند، در آن نیروی محرکه ای به وجود می آید که با عامل تغییر جریان مخالفت می کند و به آن نیروی محرکه ی خودالقایی گفته می شود. این پدیده را خودالقایی می نامند.

ضریب خودالقایی (یا القایدگی): در پدیده ی خودالقایی، در اثر عبور یک جریان الکتریکی متغیر از سیملوله، میدان مغناطیسی متغیری به وجود می آید. بزرگی این میدان در هر لحظه متناسب با جریانی است که در آن لحظه از سیملوله می گذرد (به عنوان مثال رابطه های ۳-۷ و ۳-۹ را ملاحظه کنید)، یعنی :

$$B \propto I$$

این میدان مغناطیسی متغیر، شار مغناطیسی متغیری را از سیملوله عبور می دهد که با میدان

مغناطیسی متناسب است و در نتیجه با شدت جریانی که از سیملوله می گذرد متناسب است، یعنی

$$\Phi \rightarrow I$$

اگر ضریب تناسب را با نماد  $b$  نشان دهیم، داریم:

$$\Phi = bI$$

این شار مغناطیسی متغیر در هر حلقه‌ی سیملوله (یا پیچه) نیروی محرکه‌ای القا می‌کند که به صورت زیر است:

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi}{dt}$$

یا:

$$\varepsilon_1 = -b \frac{dI}{dt}$$

در نتیجه اگر سیملوله دارای  $N$  حلقه باشد، نیروی محرکه‌ی القا شده در سیملوله برابر خواهد بود با:

$$\varepsilon_L = N\varepsilon_1$$

$$\varepsilon_L = -Nb \frac{dI}{dt}$$

اگر  $Nb = L$  قرار دهیم، نیروی محرکه‌ی خودالقایی سیملوله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (4-5)$$

$L$  از مشخصات ساختمانی سیملوله است (به تعداد حلقه‌ها، طول سیملوله و... بستگی دارد) و ضریب خودالقایی یا القاییدگی سیملوله نام دارد. یکای خودالقایی «هانری» نام دارد که آن را با نماد  $H$  نمایش می‌دهند. یک هانری ضریب خودالقایی سیملوله‌ای است که هرگاه جریانی که از آن عبور می‌کند با آهنگ یک آمپر بر ثانیه تغییر کند، نیروی محرکه‌ای برابر یک ولت در آن القا شود.

به هر قسمتی از یک مدار که خاصیت خودالقایی داشته باشد، القاگر می‌گویند. پیچه و سیملوله در مداری با جریان متغیر القاگرند.

#### مثال ۴-۷

از سیملوله‌ای به ضریب خودالقایی  $4H$ ، جریان متغیری می‌گذرد که با زمان به صورت  $I = 4t - 3$  تغییر می‌کند ( $I$  برحسب آمپر و  $t$  برحسب ثانیه است). بزرگی نیروی محرکه‌ی القا شده را محاسبه کنید.



حل: داریم

$$|\mathcal{E}| = \left| L \frac{dI}{dt} \right|$$

$\frac{dI}{dt}$  را از رابطه‌ی جریان بر حسب زمان که در مسئله داده شده محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(4t - 3) = 4 \text{ A/s}$$

در نتیجه، به دست می‌آوریم

$$|\mathcal{E}| = 0.4 \times 4 = 1.6 \text{ V}$$

**محاسبه‌ی ضریب خودالقایی سیملوله:** در فصل ۳ دیدیم که میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریانی به شدت  $I$  از سیملوله‌ای به طول  $l$  که دارای  $N$  حلقه است، در داخل سیملوله یکنواخت و موازی با محور سیملوله است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

علاوه بر این دیدیم که اگر سیملوله دارای هسته‌ای باشد، میدان مغناطیسی سیملوله تقویت می‌شود. میدان مغناطیسی سیملوله‌ای که هسته داشته باشد، در داخل سیملوله از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$B = k\mu_0 \frac{N}{l} I \quad (4-6)$$

که در آن  $k$  ضریبی است که به جنس هسته‌ی داخل سیملوله بستگی دارد و به آن تراوایی نسبی مغناطیسی هسته می‌گویند. با توجه به آن که میدان مغناطیسی در داخل سیملوله یکنواخت و موازی با محور سیملوله است، شار مغناطیسی حاصل از آن که از سیملوله می‌گذرد برابر است با:

$$\Phi_{AB} = k\mu_0 \frac{NA}{l} I \quad (4-7)$$

نیروی محرکه‌ی خودالقایی برابر است با:

$$\mathcal{E}_L = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4-8)$$

با قرار دادن  $\Phi$  از رابطه‌ی ۴-۷ در رابطه‌ی ۴-۸ به دست می‌آوریم:

$$\varepsilon_L = -N \frac{d}{dt} \left( k\mu \cdot \frac{NA}{l} I \right)$$

یعنی :

$$\varepsilon_L = -k\mu \cdot \frac{N^2 A}{l} \frac{dI}{dt} \quad (9-4)$$

از مقایسه‌ی رابطه‌های ۴-۵ و ۴-۹ به دست می‌آوریم :

$$L = k\mu \cdot \frac{N^2 A}{l} \quad (10-4)$$

این رابطه نشان می‌دهد که ضریب خودالقایی از مشخصه‌های ساختاری القاگر است و به جریان متغیری که از القاگر می‌گذرد بستگی ندارد.

#### مثال ۴-۱

سیملوله‌ای بدون هسته، با سطح مقطع  $1 \text{ cm}^2$  و طول  $50 \text{ cm}$  در نظر بگیرید. اگر تعداد حلقه‌های این سیملوله برابر  $2000$  باشد، ضریب خودالقایی آن را حساب کنید.

حل: چون سیملوله بدون هسته است،  $k=1$  است بنابراین با استفاده از رابطه‌ی ۴-۱۰ داریم :

$$L = 1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{(2000)^2 \times (10 \times 10^{-4})}{0.5}$$

در نتیجه :

$$L = 10^{-2} \text{ H} = 10 \text{ mH}$$

#### تمرین ۴-۴

دو سیملوله با سطح مقطع و تعداد دور یکسان در نظر بگیرید. اگر طول یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، نسبت ضریب خودالقایی آن‌ها را محاسبه کنید.

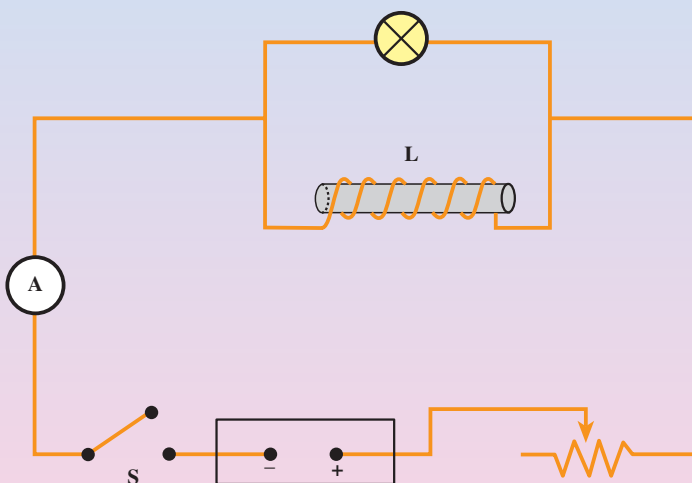
## آزمایش ۲-۴

وسایله‌های آزمایش: لامپ ۱۲ ولتی، منبع تغذیه، رئوستا، کلید، سیم رابط، سیملوله (با ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور) و هسته‌ی آهنی.

۱- مداری مطابق شکل ۴-۱۵ ببندید.

۲- رئوستا را به گونه‌ای تنظیم کنید تا لامپ با روشنایی ضعیف تابش کند.

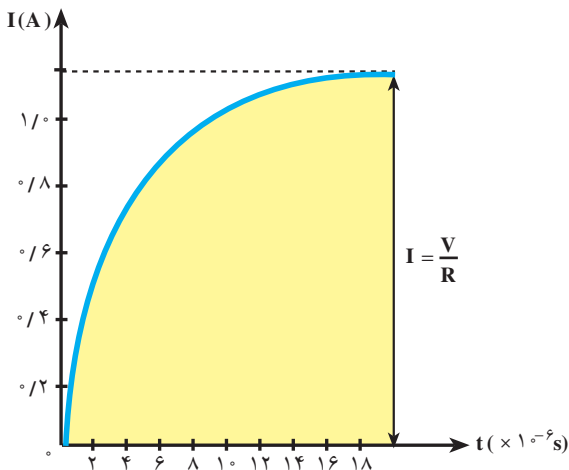
۳- کلید S را سریعاً قطع کنید و آنچه را مشاهده می‌کنید پس از بحث در گروه به کلاس گزارش کنید.



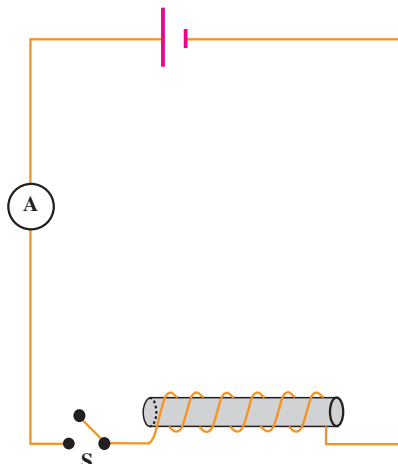
شکل ۴-۱۵

دیدیم که تغییر جریان در یک القاگر باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در آن می‌شود. ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی باعث می‌شود جریان به سرعت به مقدار نهایی خود نرسد. برای مثال مداری مانند شکل ۴-۱۶ الف در نظر بگیرید که در آن یک سیملوله با تعداد دور نسبتاً زیاد به دو سر یک باتری بسته شده است. هنگامی که کلید S را می‌بندیم، جریان به‌طور آنی به مقداری که از قانون اهم ( $I = \frac{V}{R}$ ) به‌دست می‌آید نمی‌رسد، بلکه با زمان تغییر می‌کند. منحنی تغییر جریان با زمان به‌صورت منحنی شکل ۴-۱۶ ب است.

این اثر را می‌توانیم به این صورت توجیه کنیم که به هنگام بستن کلید، جریان از صفر روبه



(ب) چگونگی تغییر جریان با زمان به هنگام بستن کلید



(الف) سیمی به مقاومت  $R$  را به صورت یک سیملوله بسته ایم

شکل ۴-۱۶ اثر خودالقایی در مدار شامل سیملوله (اعداد روی شکل مربوط به یک آزمایش خاص است)

افزایش می‌گذارد و نیروی محرکه‌ی خودالقایی در جهت مخالف نیروی محرکه‌ی مولد در سیملوله القا می‌شود، در نتیجه جریان در مدار کم‌تر از حالتی است که خودالقا در مدار وجود نداشته باشد. یعنی جریان کم‌تر از مقداری است که از رابطه‌ی  $I = \frac{V}{R}$  به دست می‌آید. با گذشت زمان و نزدیک شدن جریان به  $I$ ، آهنگ تغییر جریان کندتر می‌شود. بنابراین نیروی محرکه‌ی خودالقایی نیز کوچک‌تر می‌شود. هنگامی که جریان برابر  $I$  می‌شود، دیگر جریان تغییر نمی‌کند و نیروی محرکه‌ی خودالقایی به صفر می‌رسد.

### ۳-۴ فعالیت

با توجه به مطالب بالا نتیجه‌ی آزمایش ۴-۲ را توجیه کنید.

### ۴-۶ انرژی ذخیره شده در القاگر

هنگامی که در دو سر القاگری اختلاف پتانسیل برقرار شود، از طرف مولد به القاگر انرژی داده می‌شود. بخشی از این انرژی در مقاومت  $R$  تلف می‌شود و بقیه‌ی آن در میدان مغناطیسی سیملوله ذخیره می‌شود، این انرژی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (۴-۱۱)$$

این انرژی در میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان از القاگر ذخیره می‌شود.

#### مثال ۴-۹

سیملوله‌ای با ضریب خودالقایی  $4\text{H}$  و مقاومت  $100\Omega$  مفروض است. سیملوله را مطابق شکل ۴-۱۵ به یک باتری ۶ ولتی وصل می‌کنیم. چه مقدار انرژی در سیملوله ذخیره می‌شود؟

حل: پس از آنکه جریان در سیملوله به مقدار نهایی خود رسید، داریم:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6}{100} = 0.06\text{A}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۴-۱۱ انرژی ذخیره شده در القاگر برابر است با:

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2} LI^2 \\ &= \frac{1}{2} (0.04)(0.06)^2 = 7/2 \times 10^{-4}\text{J} \end{aligned}$$

#### تمرین ۴-۵

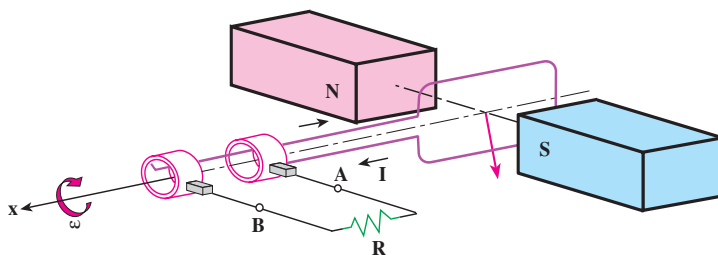
رابطه‌ای برای انرژی ذخیره شده در یک سیملوله‌ی بدون هسته بر حسب ویژگی‌های سیملوله به دست آورید.

#### ۴-۷- جریان متناوب

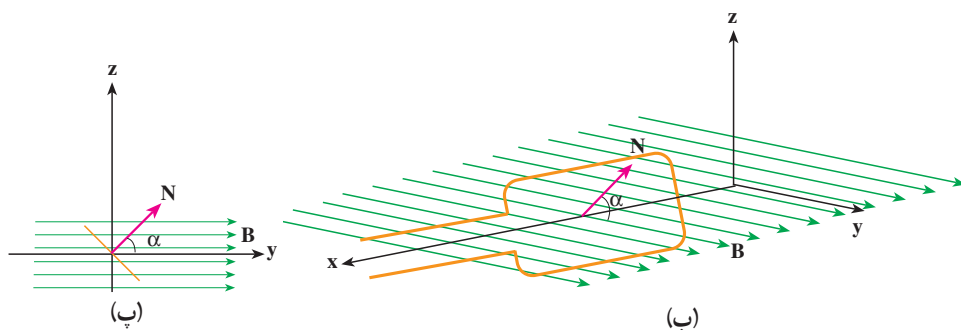
یکی از کاربردهای مهم القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. دیدیم که برای ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی باید شار عبوری از مدار تغییر کند، و شار مغناطیسی‌ای که از یک پیچه می‌گذرد از رابطه‌ی  $\Phi = AB \cos \alpha$  محاسبه می‌شود، که در آن  $\alpha$  زاویه‌ی بین نیم‌خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

ساده‌ترین راه برای تغییر شار، تغییر زاویه‌ی  $\alpha$  است. به همین لحاظ متداول‌ترین روش تولید جریان القایی، تغییر زاویه‌ی  $\alpha$  است.

شکل ۴-۱۷ الف پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت حول محور  $x$  دوران کند. محور  $y$  را منطبق بر راستای میدان مغناطیسی انتخاب کرده‌ایم، شکل‌های ۴-۱۷ ب و پ نشان می‌دهند که چگونه زاویه‌ی  $\alpha$ ، با چرخش پیچه حول محور  $x$ ، تغییر می‌کند.



(الف) پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت می چرخد



شکل ۴-۱۷

اگر زمان یک دور چرخش پیچه  $T$  ثانیه باشد، پیچه در مدت  $t$  ثانیه  $\frac{t}{T}$  دور خواهد چرخید. هر دور کامل برابر  $2\pi$  رادیان است. در نتیجه اگر پیچه در لحظه‌ی  $t = 0$  در وضعیت عمود بر میدان مغناطیسی ( $\phi = 0^\circ$ ) باشد، پس از گذشت  $t$  ثانیه در وضعیت زیر خواهد بود:

$$\phi = 2\pi \frac{t}{T} \quad \text{رادیان} \quad (4-12)$$

$T$  یعنی زمان چرخش یک دور کامل را «دوره» یا «زمان تناوب» می‌نامند.  $\frac{2\pi}{T}$  را با  $\omega$  نمایش می‌دهند و به آن بسامد زاویه‌ای می‌گویند. در نتیجه داریم:

$$\phi = \omega t$$

در نتیجه شار مغناطیسی  $\Phi = AB \cos \alpha$  که در لحظه‌ی  $t$  از پیچه عبور می‌کند برابر است با:

$$\Phi = AB \cos \omega t \quad (4-13)$$

نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه با توجه به قانون فارادی از رابطه‌ی ۴-۳ محاسبه می‌شود

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NAB \frac{d(\cos \omega t)}{dt}$$

و یا

$$\varepsilon = NAB\omega \sin \omega t \quad (4-14)$$

یعنی نیروی محرکه‌ای که در پیچه القا می‌شود با زمان تغییر می‌کند. بیش‌ترین مقدار این نیروی محرکه مربوط به زمانی است که برای آن  $\sin \omega t = 1$  باشد و برابر است با  $\varepsilon_m = NAB\omega$ . در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t \quad (۱۵-۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه‌ی القا شده به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند.

## تمرین ۴-۶

- (الف) نمودار تغییرات شاری که از مدار پیچه در شکل ۴-۱۷ الف می‌گذرد را بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.
- (ب) نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه در شکل ۴-۱۷ الف را بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.

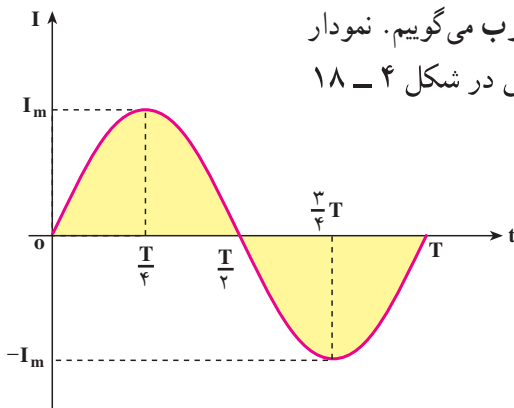
اگر مقاومت مدار برابر  $R$  باشد، جریان حاصل از این نیروی محرکه از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_m}{R} \sin \omega t \quad (۱۶-۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که جریان نیز با زمان تغییر می‌کند. بیش‌ترین مقدار جریانی که از مدار می‌گذرد، مربوط به زمانی است که  $\sin \omega t = 1$  باشد، و برابر است با  $I_m = \frac{\varepsilon_m}{R}$ . در نتیجه می‌توانیم بنویسیم

$$I = I_m \sin \omega t \quad (۱۷-۴)$$

رابطه‌ی ۴-۱۷ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیچه به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. به یک چنین جریانی، جریان متناوب می‌گوییم. نمودار تغییرات جریان متناوب در یک دوره‌ی کامل در شکل ۴-۱۸ رسم شده است.



شکل ۴-۱۸- نمودار تغییرات جریان متناوب سینوسی در یک دوره

## فعالیت ۴-۴

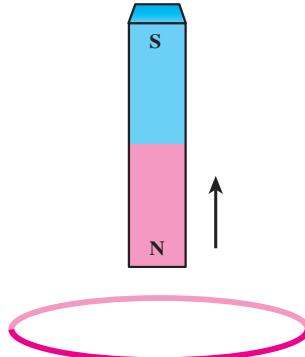
با بحث در گروه خود و با استفاده از نمودار شکل ۴-۱۸ جهت جریان متناوب را در هر بازه‌ی زمانی برابر  $\frac{1}{4}$  دوره مورد بررسی قرار دهید، و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

در صنعت برای ایجاد جریان متناوب از مولدهای مخصوصی استفاده می‌شود که به آن‌ها «مولدهای صنعتی جریان متناوب» گفته می‌شود. در مولدهای صنعتی، پیچ‌ها را ساکن گرفته و آهنربا را در مقابل آن‌ها می‌چرخانند.



## تمرین‌های فصل چهارم

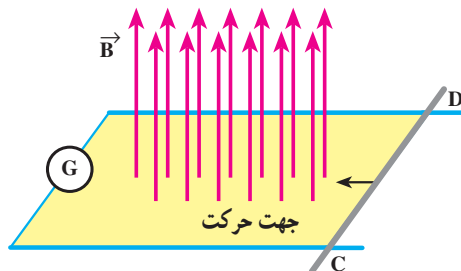
۱- قطب شمال یک آهنربا، مطابق شکل ۴-۱۹ از یک حلقه‌ی فلزی دور می‌شود. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



شکل ۴-۱۹

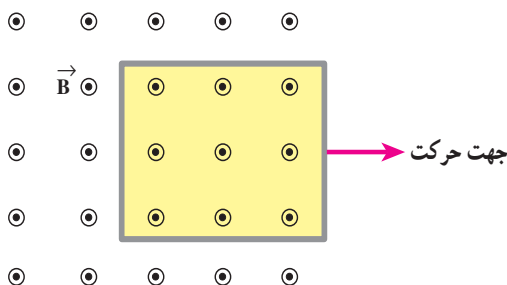
۲- یک آهنربای میله‌ای را به طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک زمین رها می‌کنیم. اگر سطح زمین در محل برخورد آهنربا با آن نرم باشد آهنربا در زمین فرو می‌رود. اگر این آزمایش را بار دیگر در وضعیتی تکرار کنیم که آهنربا در حین سقوط از درون حلقه‌های یک پیچه بگذرد، مقدار فرورفتگی آهنربا در زمین چه تغییری خواهد کرد؟ چرا؟ (از اثر مغناطیسی زمین بر روی آهنربا چشم‌پوشی کنید.)

۳- دو میله‌ی رسانای موازی در صفحه‌ای عمود بر میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  قرار دارند. این میله‌ها توسط گالوانومتری مطابق شکل ۴-۲۰ به یک‌دیگر بسته شده‌اند. میله‌ی رسانای CD می‌تواند روی دو میله‌ی موازی بلغزد. اگر میله‌ی CD در جهت نشان داده شده در شکل به حرکت درآید جهت جریان القایی در مدار در چه سویی است؟



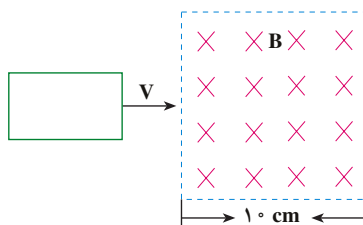
شکل ۴-۲۰

۴- پیچهای مستطیلی را که شکل ۲۱-۴ نشان داده شده است به طرف راست می کشیم و از میدان مغناطیسی برونسو خارج می کنیم. جهت جریان القایی در پیچه در چه سویی است؟



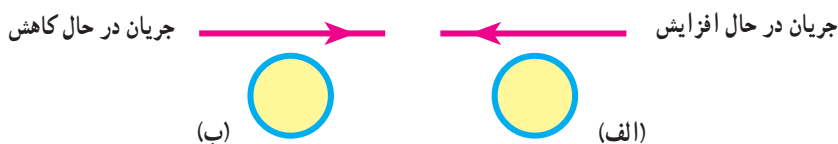
شکل ۲۱-۴

۵- حلقه‌ی فلزی مستطیل شکلی به ابعاد  $3\text{cm} \times 5\text{cm}$  مطابق شکل ۲۲-۴ با سرعت ثابت  $2\text{m/s}$  وارد میدان مغناطیسی یکنواخت  $2\text{T}$  می شود و از طرف دیگر آن خارج می شود. نمودار تغییرات شاری که از حلقه می گذرد و نیروی محرکه‌ی القا شده در آن را بر حسب زمان رسم کنید.



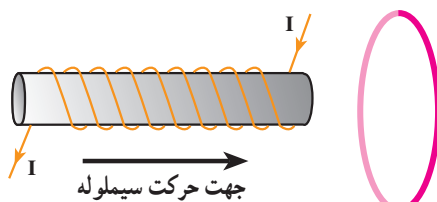
شکل ۲۲-۴

۶- جهت جریان القایی در هر یک از حلقه‌های دایره‌ای نشان داده شده در شکل ۲۳-۴ در چه سویی است؟



شکل ۲۳-۴

- ۷- پیچه‌ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه‌ی آن  $0.4\text{ T}$  و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت  $0.1\text{ s}$  تغییر کرده و به  $0.4\text{ T}$  در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه‌ی پیچه  $5\text{ cm}^2$  باشد،
- الف - اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.
- ب - جهت جریان القایی را تعیین کنید.
- ۸- در شکل ۴-۲۴ اگر سیملوله را در جهت نشان داده شده در شکل به حلقه نزدیک کنیم جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟

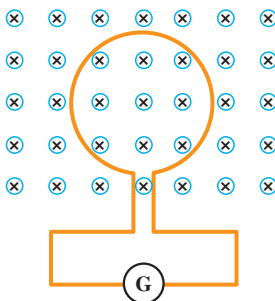


شکل ۴-۲۴

- ۹- پیچه‌ای با سطح مقطع  $3\text{ cm}^2$  دارای ۱۰۰۰ حلقه است و در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت  $0.2\text{ s}$  پیچه بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه‌ی متوسط القایی در آن چه قدر است؟ اندازه‌ی میدان زمین را  $0.5\text{ G}$  در نظر بگیرید.
- ۱۰- اگر شار مغناطیسی عبوری از حلقه‌ای مطابق رابطه‌ی زیر (در SI) تغییر کند:

$$\Phi_B = (4t^2 + 3t - 1) \times 10^{-3}$$

- بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی در حلقه در لحظه‌ی  $t = 2\text{ s}$  چه قدر است؟
- ۱۱- حلقه‌ای مطابق شکل ۴-۲۵ درون یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. اگر اندازه‌ی میدان افزایش یابد، جهت جریان القایی را روی حلقه مشخص کنید.



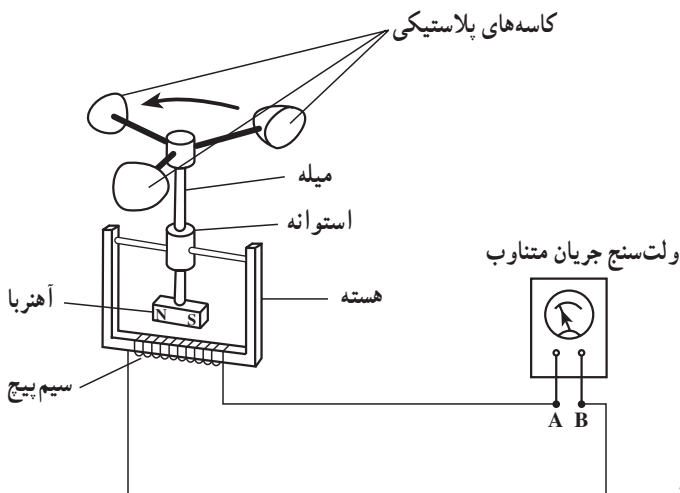
شکل ۴-۲۵

- ۱۲- جریان متناوبی که بیشینه‌ی آن  $2A$  و دوره‌ی آن  $2\pi \times 10^{-2}s$  است از یک رسانای  $5$  اهمی می‌گذرد. (الف) در چه لحظه‌هایی شدت جریان بیشینه خواهد بود؟ در این لحظه‌ها نیروی محرکه‌ی القایی چه قدر است؟ (ب) در لحظه‌ی  $t = \frac{1}{4} \times 10^{-2}s$ ، شدت جریان چه قدر است؟
- ۱۳- شکل ۴-۲۶ دینام یک دوچرخه را نشان می‌دهد، تحقیق کنید چگونه این دینام، برق مورد نیاز برای روشن شدن لامپ دوچرخه را تولید می‌کند.



شکل ۴-۲۶- دینام دوچرخه

- ۱۴- شکل ۴-۲۷ ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله‌ی آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد. (الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه‌ی ولت‌سنج می‌شود؟ (ب) آیا با افزایش سرعت باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟ (پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.



شکل ۴-۲۷

## واژه‌نامه‌ی فارسی - انگلیسی

Attraction	ربایش	Electric potential energy	انرژی پتانسیل الکتریکی
Alternating Current	جریان متناوب	Electric field	میدان الکتریکی
Angular frequency	بسامد زاویه‌ای	Electric dipole	دوقطبی الکتریکی
Bar magnet	آهنربای میله‌ای	Electric field lines	خط‌های میدان الکتریکی
Capacitor	خازن	Electric Motor	موتور الکتریکی
Capacitance	ظرفیت	Electric current	جریان الکتریکی
Cosmic ray	پرتو کیهانی	Ferromagnetism	فرومغناطیس
Conservation of charge	پایستگی بار	Faraday's law of electromagnetic induction	قانون القای الکترومغناطیسی فاراده
Coulomb's Law	قانون کولن	Horseshoe magnet	آهنربای نعلی شکل
Coefficient of resistivity	ضریب دمایی مقاومت ویژه	Internal resistance	مقاومت درونی
Coil	پیچ	Insulator	عایق
Dielectric constant	ثابت دی‌الکتریک	Inductance	ضریب خودالقایی (القاییدگی)
Dielectric breakdown	فروشکست دی‌الکتریک	Inductor	القاگر
Deviation	زاویه‌ی انحراف	Iron Core	هسته‌ی آهنی
Electromagnetic induction	القای الکترومغناطیسی	Induced current	جریان القایی
Electric force	نیروی الکتریکی	Inclination	زاویه‌ی میل
Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی محرکه الکتریکی	Kirohnhoff's laws	قانون‌های کیرشهف
Equivalent resistance	مقاومت معادل	Loop	حلقه
Electric resistance	مقاومت الکتریکی	Lenz's law	قانون لنز
		Magnetic flux	شار مغناطیسی

Magnetic permeability	تراوایی مغناطیسی	Polarized	قطبیده
Magnetic field	میدان مغناطیسی	Repulsion	راشش
Magnetic field lines	خط‌های میدان مغناطیسی	Resistor	مقاومت
Magnetic Domain	حوزه‌ی مغناطیسی	Resistivity	مقاومت ویژه
Magnetic axis	محور مغناطیسی	Right hand rule	قاعده‌ی دست راست
Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی	Rheostat	رئوستا
Magnetic induction	القای مغناطیسی	Relative magnetic Permeability	تراوایی نسبی مغناطیسی
Magnetic Energy	انرژی مغناطیسی	Surface charge density	چگالی سطحی بار
Net charge	بار خالص	South pole	قطب جنوب
Node	گره	Solenoid	سیملوله
North pole	قطب شمال	Series Circuits	مدارهای متوالی
Potential difference	اختلاف پتانسیل	Self - induction	خودالقایی
Permanent magnet	آهنربای دائمی	to Charge	پرکردن (خازن)
Permittivity	ضریب گذردهی	to discharge	خالی کردن (خازن)
Parallel Circuits	مدارهای موازی	Temporary magnet	آهنربای موقت
Parallel plate capacitor	خازن تخت (خازن با صفحه‌های موازی)	Variable resistor	مقاومت متغیر
Paramagnetism	پارامغناطیس	Voltage drop	افت پتانسیل

## فهرست مراجع

- 1 \_ Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999 by Holt Rinehart and Winston.
- 2 \_ Physics For Scientists and Engineers Paul A. Tipler 1999 by W. H. Freedman and Company.
- 3 \_ College Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999, 2000, SAUNERS COLLEGE PUBLISHING.
- 4 \_ Fundamentals of Physics.  
David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker 2001 John Wiley & Sons, Inc.
- 5 \_ PHYSICS. PRINCIPLES WITH APPLICATIONS Douglas C. Gioncoli 1991  
Prentice - Hall International Editions.
- 6 \_ UNDERSTANDING PHYSICS Robin Millar 1994 Collins Educational.
- 7 \_ Physics Classical and Modern, Frederick J. Keller W. Edward Gettys, Malcolm J. Skove 1993 Mc Graw Hill.
- 8 \_ UNIVERSITY PHYSICS, Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2000 Addison Wesley Longman, Inc.
- 9 \_ Contemporary College Physics. Jones / Childers 1999 by Mc Graw Hill Companies.
- 10 \_ Physics 2 David Sanq 2001 Cambridge University Press.



معلمان محترم، صاحب نظران، دانش آموزان عزیز و اولیای آنان می توانند نظر اصلاحی خود را در باره ی مطالب  
این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۳۶۳ ۱۵۸۵۵ - گروه درسی مربوط و یا پیام نگار (Email:  
talif@talif.sch.ir) ارسال نمایند.

دفتر نامه ریزی و تیسف کتاب های درسی