

## الکتریسیته ساکن



صفحه‌های لمسی، امروزه کاربردی گسترده در زندگی روزمره پیدا کرده‌اند، از صفحه‌های رایانه گرفته تا گوشی‌های تلفن همراه و ابزارهای پزشکی و صنعتی. این صفحه‌ها به روش‌های مختلفی عمل می‌کنند که یکی از متداول‌ترین آنها مبتنی بر استفاده از فازنها است. با تماس انگشت با یک صفحه لمسی، ظرفیت الکتریکی در آن محل عوض می‌شود که مدارهای الکترونیکی دستگاه می‌توانند آن تغییر را آشکار کنند.

از آذرخش گرفته (شکل ۱-۱) تا درخشش لامپی کوچک، از آنچه اتم‌ها را به شکل مولکول به هم پیوند می‌دهد، تا پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب (شکل ۱-۲)، و همچنین بسیاری از پدیده‌های دیگر مانند قابلیت چسبیدن نوار سلوفان بر ظروف و حتی بالا رفتن یک مارمولک از دیوار و بسیاری از وسیله‌های اطراف ما، همگی منشأ الکتریکی دارند. مبانی فیزیکی مرتبط با این پدیده‌ها نخستین بار مورد توجه فیلسوفان یونان قدیم قرار گرفت که دریافتند اگر قطعه‌ای از کهر با پارچه پشمی مالش داده شود و سپس به خرده‌های کاه نزدیک گردد، آن خرده‌ها به سوی کهرها کشیده می‌شوند. امروز می‌دانیم این کشش ناشی از یک نیروی الکتریکی است. در واقع واژه الکتریسته از واژه یونانی **الکترون**<sup>۱</sup> گرفته شده است که به معنای کهریاست.



**شکل ۱-۱** توصیف آذرخش مبتنی بر اصول الکتریسته ساکن است.

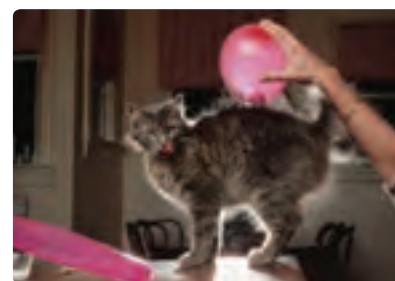
وقتی لباس‌های بافتنی را از تن خارج می‌کنیم، یا پس از اینکه چند قدم بر روی فرش راه می‌رویم، دستگیره فلزی در را با دست بگیریم، عملاً وجود الکتریسته را به صورت یک شوک الکتریکی حس می‌کنیم. در این فصل، به مطالعه بارهای ساکن می‌پردازیم که به آن **الکتریسته ساکن** (الکتروستاتیک) می‌گویند و ضمن یادآوری مطالب الکتریسته دوره اول متوسطه، به جزئیات دقیق‌تری از چگونگی ایجاد بار الکتریکی در یک جسم، عوامل مؤثر بر نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی ذره‌ای، میدان الکتریکی، انرژی پتانسیل الکتریکی و اختلاف پتانسیل الکتریکی، توزیع بار در یک جسم رسانا و کاربرد خازن‌ها می‌پردازیم.



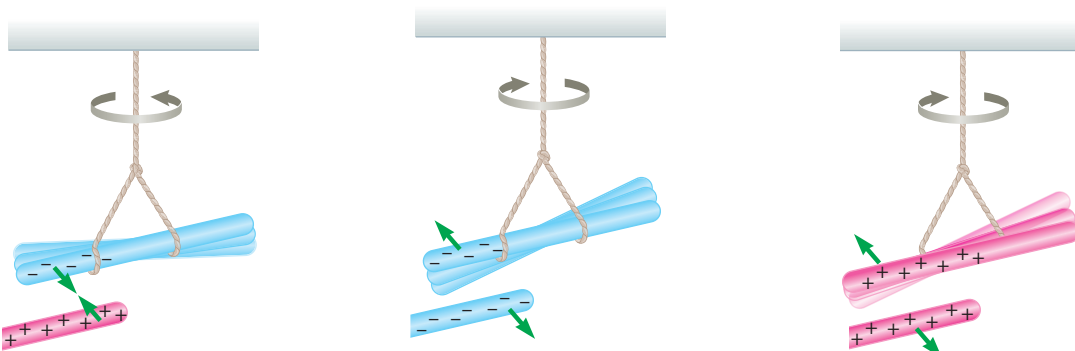
**شکل ۱-۲** انتقال پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب به صورت الکتریکی صورت می‌گیرد.

## ۱-۱ بار الکتریکی

در کتاب علوم تجربی پایه هشتم دیدید که معمولاً وقتی دو جسم با یکدیگر مالش داده می‌شوند، هر دوی آنها دارای بار الکتریکی می‌شوند (شکل ۱-۳) و بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند (شکل ۱-۴). از این تجربه‌ها نتیجه گرفتیم که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد. این دو نوع بار الکتریکی توسط دانشمند آمریکایی بنیامین فرانکلین، بار مثبت و بار منفی نام‌گذاری شد. او می‌توانست آنها را هر چیز دیگری نیز بنامد، اما استفاده از علامت‌های جبری به جای نام‌های دیگر این مزیت را دارد که وقتی در یک جسم از این دو نوع بار به مقدار مساوی وجود داشته باشد، جمع جبری بارهای جسم صفر می‌شود که به معنای خنثی بودن آن جسم است.



**شکل ۱-۳** مالش بادکنک به بدن گربه سبب ایجاد بار الکتریکی در آنها و در نتیجه برافراشته شدن موهای گربه می‌شود.



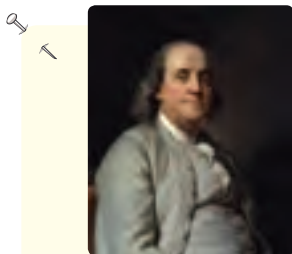
پ) وقتی میله پلاستیکی مالش داده شده با پارچه پشمی را به میله شیشه‌ای مالش داده شده با پارچه ابریشمی نزدیک کنیم، همدیگر را جذب می‌کنند.

ب) وقتی دو میله پلاستیکی را با پارچه پشمی مالش دهیم، همدیگر را دفع می‌کنند.

الف) وقتی دو میله شیشه‌ای را با پارچه ابریشمی مالش دهیم، همدیگر را دفع می‌کنند.

**شکل ۱-۴**

۱- واژه یونانی الکترون به صورت elektron نوشته می‌شود.



### بنیامین فرانکلین (۱۷۹۰ - ۱۷۰۶م)

بنیامین فرانکلین دانشمند، نویسنده و سیاستمدار آمریکایی، در شهر بوستون به دنیا آمد و در شهر فیلادلفیا دیده از جهان فروست. فرانکلین در حدود سال ۱۷۴۴ میلادی با مبحث الکتریسته آشنا شد و عمده کشفیات مهم و بزرگ خویش را در بین سال‌های ۱۷۳۷ و ۱۷۵۱ به انجام رسانید و به شهرت علمی بی‌سابقه‌ای رسید. جالب است که او برخلاف سایر دانشمندان بزرگ، پس از چهل سالگی کارهای علمی اساسی خود را آغاز کرد. مهم‌ترین اثر فرانکلین، کتاب «در باب الکتریسته» است که بسیاری آن را با کتاب «اصول ریاضیات» اسحاق نیوتون مقایسه کرده‌اند. فرانکلین در این کتاب شالوده و بنیاد اصول علم الکتریسته را بر مبنای تجربیات و مشاهدات علمی خود تشریح کرده است. در واقع تجربیات متعدد و مهم فرانکلین آغازگر دوره‌ای جدید در مبحث الکتریسته بوده است و بسیاری از واژگانی که ما امروزه در الکتریسته به کار می‌گیریم نخستین بار توسط فرانکلین به کار برده شده است. توانایی و مهارت فرانکلین در انجام آزمایش و بیان واضح وی از مفاهیم فیزیکی و بالاخره کشفیات مهم او موجب ارج و قرب علوم تجربی در قرن هجدهم شد.

نوع باری که دو جسم بر اثر مالش پیدا می‌کنند، به جنس آنها بستگی دارد. همان‌طور که در کتاب علوم تجربی پایه هشتم خود دیدید باردار بودن یک جسم و نوع بار آن را می‌توانیم با الکتروسکوپ (برق‌نما) تعیین کنیم (شکل ۱-۵).



ب) جسمی باردار را به کلاهک الکتروسکوپ بدون بار نزدیک کرده یا تماس داده‌ایم.



الف) تصویری از یک الکتروسکوپ درجه‌بندی‌شده بدون بار

### شکل ۱-۵

یکای بار الکتریکی در SI، کولُن (C) است. توجه کنید یک کولُن مقدار بار بزرگی است. مثلاً در یک آذرخش نوعی، باری از مرتبه  $10^6$  به زمین منتقل می‌شود و از این رو، در این فصل غالباً با بارهایی از مرتبه میکروکولُن ( $\mu C$ ) و نانو کولُن (nC) سروکار داریم. به عنوان مثال، در مالش شانه پلاستیکی با موهای سر، بارهای منتقل شده از مرتبه نانو کولُن (nC) است.

### پرسش ۱-۱

چرا وقتی روکش پلاستیکی را روی یک ظرف غذا می‌کشید و آن را در لبه‌های ظرف فشار می‌دهید، روکش در جای خود ثابت باقی می‌ماند؟

### ۱-۲ پایستگی و کوانتیده بودن بار الکتریکی

در یک اتم خنثی، تعداد الکترون‌ها برابر با تعداد پروتون‌های هسته است. بنابراین، جمع جبری همه بارها (بار خالص) دقیقاً برابر با صفر است. در تجربه‌هایی مانند مالش اجسام به یکدیگر، الکترون‌ها تولید نمی‌شوند و یا از بین نمی‌روند، بلکه صرفاً از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شوند. اندازه بار منفی الکترون دقیقاً برابر با اندازه بار مثبت پروتون است. این مقدار را بار بنیادی (با نماد  $e$ ) می‌گویند که برابر است با<sup>۱</sup>

$$e = 1/60217653 \times 10^{-19} C \approx 1/60 \times 10^{-19} C$$

۱- اندازه‌گیری بار الکترون نخستین بار توسط رابرت میلیکان در سال ۱۹۱۳ میلادی انجام شد. این نتیجه اندازه‌گیری مربوط به سال ۲۰۰۵ میلادی است.

### جدول ۱-۱ سری الکتريسيته مالشی (تریبولکتريک)<sup>۱</sup>

#### انتهای مثبت سری

موی انسان  
شیشه  
نایلون  
پشم  
موی گربه  
سُرب  
ابریشم  
آلومینیم  
پوست انسان  
کاغذ  
چوب  
پارچه کتان  
کهربا  
برنج، نقره  
پلاستیک، پلی اتیلن  
لاستیک  
تفلون

#### انتهای منفی سری

در هنگام مالش، با انتقال تعدادی الکترون از یک جسم به جسمی دیگر، تعادل بارها در اتم خنثی بر هم می خورد و جسمی که الکترون از دست می دهد، تعداد الکترون هایش کمتر از تعداد پروتون های آن می شود و بار الکتريکی خالص آن مثبت می گردد و همچنین، جسمی که الکترون اضافی دریافت می کند، الکترون هایش از پروتون های آن فزونی می یابد و بار الکتريکی خالص آن منفی می شود. به دست آوردن یا از دست دادن الکترون دو جسم در تماس با یکدیگر را می توان براساس جدولی موسوم به **سری الکتريسيته مالشی** (تریبولکتريک؛ Tribos در لغت یونانی به معنای مالش است) معلوم کرد (جدول ۱-۱). در این جدول مواد پایین تر، الکترون خواهی بیشتری دارند؛ یعنی اگر دو ماده در این جدول در تماس با یکدیگر قرار گیرند، الکترون ها از ماده بالاتر جدول به ماده ای که پایین تر قرار دارد منتقل می شود. مثلاً اگر تفلون با نایلون مالش یابد، الکترون ها از نایلون به تفلون منتقل می شوند. در مورد بارهای الکتريکی دو اصل وجود دارد. نخستین آنها **اصل پایستگی بار** است که بیان می دارد: مجموع جبری همه بارهای الکتريکی در یک دستگاه منزوی<sup>۲</sup> ثابت است؛ یعنی بار می تواند از جسمی به جسم دیگر منتقل شود، ولی هرگز امکان تولید یا نابودی یک بار خالص وجود ندارد. تاکنون هیچ آزمایشی این اصل را نقض نکرده است.

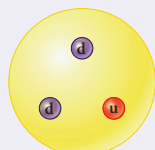
دومین اصل، **کوانتیده بودن بار** است. در تجربه هایی مانند مالش اجسام به یکدیگر اگر جسم خنثی الکترون به دست آورد یا از دست بدهد، همواره بار الکتريکی مشاهده شده جسم، مضرب درستی از بار بنیادی  $e$  است:

$$q = \pm ne \quad , \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1-1)$$

یک مثال آشنا از کوانتیده بودن یک کمیت، تعداد دانش آموزان یک کلاس یا تعداد تخم مرغ های درون یک ظرف است. برای مثال، ما نمی توانیم  $24/3$  دانش آموز در یک کلاس و یا  $12/4$  تخم مرغ در یک ظرف داشته باشیم.

### خوب است بدانید

(الف) پروتون از دو کوارک بالا (u) و یک کوارک پایین (d) ساخته شده است.



(ب) نوترون از یک کوارک بالا (u) و دو کوارک پایین (d) ساخته شده است.

الکترون یک ذره بنیادی است و زیرساختار ندارد؛ یعنی از اجزای دیگری تشکیل نشده است. اما پروتون و نوترون برخلاف الکترون از ذراتی بنیادی به نام کوارک<sup>۳</sup> ساخته شده اند. کوارک ها بار  $\pm \frac{1}{3}e$  یا  $\pm \frac{2}{3}e$  دارند، ولی این در تناقض با اصل کوانتیده بودن بار نیست؛ زیرا هیچ کوارک مستقلاً مشاهده نشده است؛ یعنی این بارهای کسری نمی توانند به طور مستقل دیده شوند. مثلاً یک پروتون از دو کوارک بالا<sup>۴</sup> (u) هر یک با بار  $+\frac{2}{3}e$  و یک کوارک پایین<sup>۵</sup> (d) با بار  $-\frac{1}{3}e$  ساخته شده است که بار خالص پروتون را برابر  $+e$  به دست می دهد، یا نوترون از یک کوارک بالا و دو کوارک پایین ساخته شده است که بار خالص صفر را به دست می دهد.

۱- نیازی به حفظ این جدول نیست.

۲- منظور از دستگاه منزوی در اینجا دستگاهی است که نه از محیط اطراف خود بار بگیرد و نه به آن بار بدهد.

۳- up

۴- down

۵- Quark

## مثال ۱-۱

وقتی روی فرش راه می‌روید و بدنتان بار الکتریکی پیدا می‌کند، هنگام دست دادن با دوستان، ممکن است با انتقال باری در حدود  $1\text{ nC}$  به او شوک خفیفی وارد کنید. در این انتقال بار، چند الکترون بین شما و دوستان منتقل شده است؟  
**پاسخ:** از رابطه ۱-۱ داریم:

$$q = ne$$

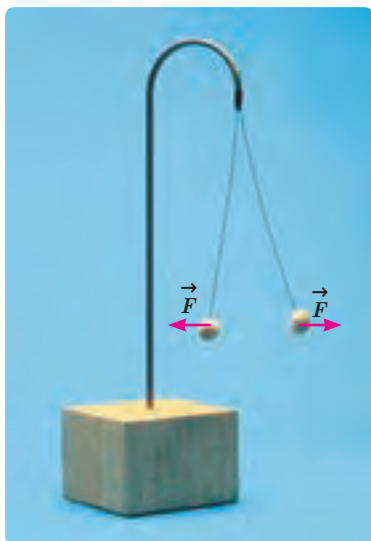
$$n = \frac{q}{e} = \frac{1 \times 10^{-9} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6 \times 10^9 \text{ الکترون}$$

## تمرین ۱-۱

عدد اتمی اورانیوم  $Z = 92$  است. بار الکتریکی هسته اتم اورانیوم چقدر است؟ مجموع بار الکتریکی الکترون‌های اتم اورانیوم (خنثی) چه مقدار است؟ بار الکتریکی اتم اورانیوم (خنثی) چقدر است؟

## ۳-۱ قانون کوئن

همان‌طور که می‌دانیم نیروی الکتریکی که دو جسم باردار برهم وارد می‌کنند می‌تواند جاذبه یا دافعه باشد. اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، این نیرو دافعه است (شکل ۱-۶). و اگر ناهمنام باشند، این نیرو جاذبه است.



**شکل ۱-۶** گوی‌های باردار همنام یکدیگر را با نیرویی هم‌اندازه دفع کرده‌اند.

## فعالیت ۱-۱ (کار در کلاس)



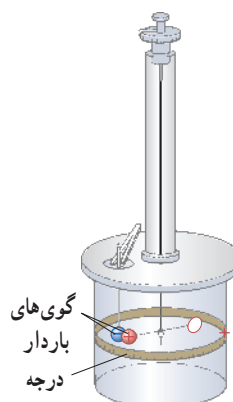
مطابق شکل، دو نی پلاستیکی را از نزدیکی یک انتهای آنها خم کنید و پس از مالش دادن با پارچه‌ای پشمی نزدیک یکدیگر قرار دهید. اگر نی‌ها به خوبی باردار شده باشند، نیروی دافعه آنها را می‌توانید به وضوح بر روی انگشتان خود حس کنید.

نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار، به چه عامل‌هایی بستگی دارد و اندازه این نیروها را از چه رابطه‌ای می‌توان محاسبه کرد؟ شارل آگوستین کوئن، دانشمند فرانسوی برای نخستین بار با انجام آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای توانست عامل‌های مؤثر بر نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار را که اصطلاحاً بار نقطه‌ای خوانده می‌شود، شناسایی کند. نتیجه آزمایش‌های او امروزه به نام **قانون کوئن** خوانده می‌شود. شکل ۱-۷ طرحی از آزمایش کوئن را نشان می‌دهد.



شارل آگوستین کوئن (۱۸۰۶ – ۱۷۳۶م)

شارل آگوستین کوئن در فرانسه به دنیا آمد. او در دانشگاه مباحث متنوعی از قبیل فلسفه، ریاضیات، نجوم و شیمی را آموخت، و در طی دوازده سال پس از فارغ‌التحصیلی شغل‌های متنوعی در شاخه‌های مختلف مهندسی داشت و مدتی را نیز خارج از فرانسه گذراند. کوئن پس از بازگشت به پاریس در سال ۱۷۸۵ میلادی تقریباً هم‌زمان با بنیامین فرانکلین آزمایش معروف خود را در مورد اینکه نیروی بین دو بار ذره‌ای با مربع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد، به چاپ رساند. نتیجه این آزمایش که به قانون کوئن معروف شده است از هر آزمون و تجربه‌ای سربلند بیرون آمده است و تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافت نشده است. کوئن معتقد بود چنین قانونی برای قطب‌های مغناطیسی نیز برقرار است، گرچه هیچ‌وقت نتوانست به چنین رابطه‌ای برسد. نام کوئن یکی از ۷۲ نامی است که روی برج ایفل ثبت شده است.



قانون کوئن بیان می‌دارد:

اندازه نیروی الکتریکی (الکتروستاتیکی) بین دو بار نقطه‌ای<sup>۱</sup> که در راستای خط واصل آنها اثر می‌کند، با حاصل ضرب بزرگی آنها متناسب است و با مربع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد. بنابراین، اندازه این نیرو برابر است با

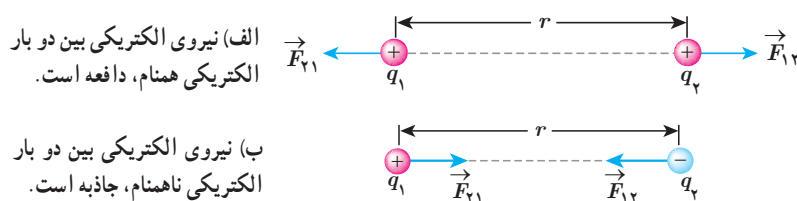
$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2} \quad (۲-۱)$$

که در آن  $q_1$  و  $q_2$  بارهای الکتریکی دو بار نقطه‌ای برحسب کولن (C)،  $r$  فاصله بین دو بار برحسب متر (m)، و  $F$  بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر هر بار برحسب نیوتون (N) است. در این رابطه  $k$  ثابت الکتروستاتیکی یا ثابت کوئن نام دارد و برابر است با<sup>۲</sup>

$$k = 8.98755179 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2 \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$$

در شکل ۱-۸،  $\vec{F}_{12}$  نیرویی است که بار نقطه‌ای  $q_1$  به بار نقطه‌ای  $q_2$  وارد می‌کند و  $\vec{F}_{21}$  نیرویی است که بار نقطه‌ای  $q_2$  به بار نقطه‌ای  $q_1$  وارد می‌کند. این دو نیروی الکتریکی (بنا به قانون سوم نیوتون) هم‌اندازه، هم‌راستا، و در خلاف جهت همدیگرند. به عبارتی:

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



شکل ۱-۸

۱- در این بخش با نیروهای بین ذره‌های باردار (بارهای نقطه‌ای) سر و کار داریم. البته اگر فاصله یک جسم باردار با جسم باردار دیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هریک از دو جسم در مقایسه با فاصله بین آنها چشم‌پوشی کرد، می‌توان دو جسم را به صورت ذره‌های باردار در نظر گرفت.  
۲- به ذهن سپردن این اعداد لازم نیست.

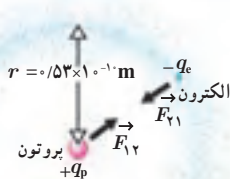
ثابت کوئن ( $k$ ) را می‌توان بر حسب یک ضرب ثابت دیگر به نام ضرب گذردهی الکتریکی خالص ( $\epsilon_0$ ) نیز نوشت:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

که در آن

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N.m}^2$$

## مثال ۱-۲



الف) در مدل بور برای اتم هیدروژن، فاصله الکترون از پروتون هسته در حالت پایه  $5/3 \times 10^{-11} \text{ m}$  است (شکل را ببینید). اندازه نیروی الکتریکی که پروتون به الکترون وارد می‌کند را محاسبه کنید.

ب) در هسته اتم هلیوم دو پروتون به فاصله تقریبی  $r = 2/4 \times 10^{-15} \text{ m}$  از هم قرار دارند. اندازه نیرویی که پروتون‌ها بر هم وارد می‌کنند را محاسبه کنید.

پاسخ:

الف) با استفاده از قانون کولن برای بزرگی نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار داریم:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = k \frac{|q_e||q_p|}{r^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2) \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5/3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 8/2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

ب) با استفاده از قانون کولن داریم:

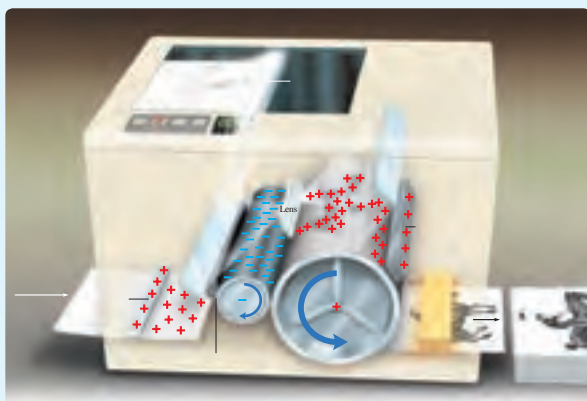
$$F = k \frac{|q_p||q_p|}{r^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2) \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(2/4 \times 10^{-15} \text{ m})^2} = 40 \text{ N}$$

که این به مراتب بزرگ‌تر از نیروی محاسبه شده در قسمت الف است. این نیروی بزرگ، از جنس دافعه است. بنابراین، هسته اتم باید فرو بپاشد. از اینجا نتیجه می‌گیریم که باید نیروی دیگری وجود داشته باشد که مانع فروپاشی هسته شود. به این نیرو، نیروی هسته‌ای گفته می‌شود.

## خوب است بدانید

تمامی اجسام به علت جرمشان بر یکدیگر نیروی گرانشی نیز وارد می‌کنند که همواره از نوع جاذبه است. بزرگی این نیرو برای الکترون و پروتون اتم هیدروژن از مرتبه  $10^{-47} \text{ N}$  است. بنابراین، در حدود  $10^4$  بار کوچک‌تر از نیروی الکتریکی بین این دو ذره است و این نشان می‌دهد نیروی گرانشی به مراتب ضعیف‌تر از نیروی الکتریکی است.

## فعالیت ۱-۲



شکل روبه‌رو تصویری از مرحله‌های ایجاد یک رونوشت در دستگاه فتوکپی را نشان می‌دهد. در مورد چگونگی کار دستگاه‌های فتوکپی تحقیق کنید.

## خوب است بدانید: DNA



اطلاعات ژنتیکی در مولکول‌های خاصی به نام دِنا (DNA) وجود دارد. در واقع دِنا دارای اطلاعات و دستورهای برای تعیین و ایجاد صفات ارثی ما و همهٔ جانداران است. در مولکول‌های دِنا چهار نوع باز به نام‌های آدنین (A)، سیتوزین (C)، گوانین (G) و تیمین (T) وجود دارد. دِنا مولکولی دورشته‌ای است که به صورت مارپیچ دوگانه پیچیده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است این دو رشته توسط نیروهای الکتریکی به یکدیگر پیوند خورده‌اند. مثلاً در شکل می‌بینیم که همواره آدنین و تیمین در دو طرف رشته و مقابل هم قرار دارند. به همین ترتیب G و C نیز در دو طرف رشته و مقابل هم قرار دارند.

بارهای مثبت در یک طرف رشته و بارهای منفی در طرف دیگر، دو رشته را به هم زیپ می‌کنند. این جاذبه آن‌قدر هست که رشته‌ها از هم نگسلند، اما به حد کافی ضعیف نیز هست تا در فرایند رونویسی از هم گسیخته گردد.

برهم‌نهی نیروهای الکتروستاتیکی: اگر به جای دو ذرهٔ باردار، تعدادی بار نقطه‌ای داشته

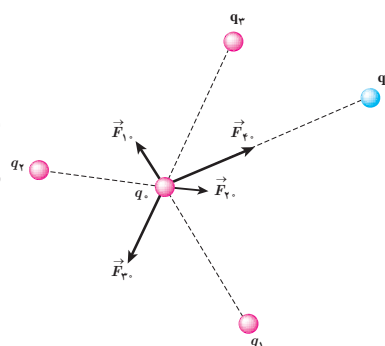
باشیم، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذرهٔ باردار چگونه تعیین می‌شود؟ تجربه نشان می‌دهد که در این وضعیت، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برآیند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر در غیاب سایر ذره‌ها، بر آن ذره وارد می‌کند. این موضوع که از آزمایش نتیجه شده است را **اصل برهم‌نهی** نیروهای الکتروستاتیکی می‌گویند.

فرض کنید  $n$  ذرهٔ باردار داشته باشیم که در نزدیکی بار نقطه‌ای  $q$  قرار دارند. آن‌گاه نیروی خالص (برآیند) وارد بر بار نقطه‌ای  $q$  با جمع برداری زیر داده می‌شود:

$$\vec{F}_{T_q} = \vec{F}_{1_q} + \vec{F}_{2_q} + \dots + \vec{F}_{n_q}$$

شکل ۱-۹ نیروی وارد بر بار  $q$  از سوی چهار بار دیگر را نشان می‌دهد.

در این کتاب، مثال‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آن‌ها نیروهای الکتریکی وارد بر یک ذرهٔ باردار در یک راستا قرار دارند یا عمود بر یکدیگرند.<sup>۱</sup>



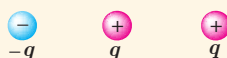
شکل ۱-۹ نیروی برآیند وارد بر بار  $q$ .

در اینجا برابر است با

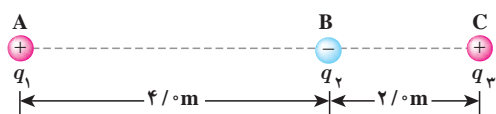
$$\vec{F}_{T_q} = \vec{F}_{1_q} + \vec{F}_{2_q} + \vec{F}_{3_q} + \vec{F}_{4_q}$$

## پرسش ۱-۲

سه ذرهٔ باردار مانند شکل روبه‌رو، روی یک خط راست قرار دارند و فاصلهٔ بارهای سمت راست و چپ از بار میانی برابر است. الف) جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار الکتریکی میانی را تعیین کنید. ب) اگر ذرهٔ سمت راست به جای  $q$ ، بار  $-q$  داشته باشد، جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار میانی چگونه خواهد بود؟



۱- بررسی حالت‌هایی که نیروها هم راستا و یا عمود برهم نیستند، خارج از برنامهٔ درسی این کتاب بوده و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.



سه ذره با بارهای  $q_1 = +2/5 \mu C$ ،  $q_2 = -1/5 \mu C$  و  $q_3 = +4/5 \mu C$  در نقطه‌های A، B و C مطابق شکل روبه‌رو ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار  $q_2$  را محاسبه کنید.

**پاسخ:** نیروی الکتریکی خالصی که بر بار  $q_2$  وارد می‌شود، برآیند دو نیرویی است که از طرف بارهای  $q_1$  و  $q_3$  بر آن وارد می‌شوند. برای محاسبه این نیرو، نیرویی را که هر یک از بارهای  $q_1$  و  $q_3$  در نبود دیگری، بر بار  $q_2$  وارد می‌کند، محاسبه می‌کنیم. نیروی الکتریکی وارد بر  $q_2$ ، برآیند این دو نیرو است.

فاصله بین بارهای  $q_1$  و  $q_2$  را با  $r_{12}$  و فاصله بین بارهای  $q_2$  و  $q_3$  را با  $r_{23}$  نشان می‌دهیم. با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

$$F_{12} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r_{12}^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/5 \times 10^{-6} \text{ C})(1/5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4.0 \text{ m})^2}$$

$$= 2/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

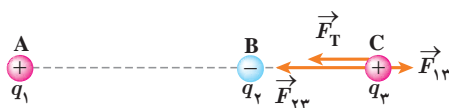
$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/5 \times 10^{-6} \text{ C})(4/5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2.0 \text{ m})^2}$$

$$= 9/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

نیرویی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند، دافعه و نیرویی که بار  $q_3$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند جاذبه است.

مطابق شکل، نیروهای  $\vec{F}_{12}$  و  $\vec{F}_{23}$  در جهت‌های مخالف یکدیگرند و برآیند آنها برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{23} + \vec{F}_{12}$$



بنابراین، اندازه نیروی برآیند برابر با تفاضل اندازه آنهاست:

$$F_T = F_{23} - F_{12} = 6/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

و جهت آن در جهت نیروی بزرگ‌تر ( $\vec{F}_{23}$ )، یعنی از سمت راست به طرف چپ، است. اگر محور  $x$  را روی خط واصل سه بار و جهت مثبت آن را به سمت راست در نظر بگیریم و بردار یکه محور  $x$  را،  $\vec{i}$  بنامیم، داریم:

$$\vec{F}_T = (-6/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$

## تمرین ۲-۱

در مثال ۳-۱، نیروی خالص وارد بر بار  $q_2$  را به دست آورید.

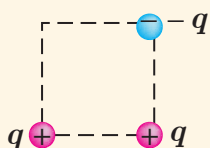
## پرسش ۳-۱

سه ذره باردار مطابق شکل روبه‌رو، در سه گوشه یک مربع قرار دارند.

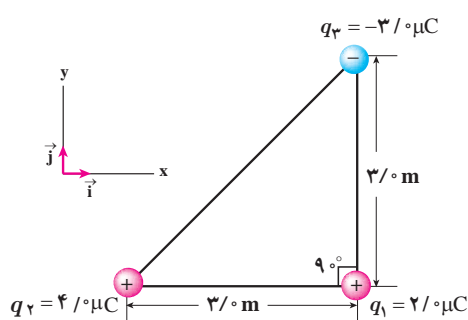
الف) جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار سمت راست پایینی را تعیین کنید.

ب) اگر ذره سمت چپ پایینی به جای  $q$ ، بار  $-q$  داشته باشد، جهت نیروی الکتریکی خالص وارد

بر بار سمت راست پایینی چگونه خواهد بود؟



## مثال ۱-۴



سه ذره باردار مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ای ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی خالص وارد بر ذره واقع در رأس قائمه را به دست آورده و اندازه این نیرو را محاسبه کنید.

**پاسخ:** نیروی الکتریکی بین بارهای  $q_1$  و  $q_2$  دافعه و نیروی بین بارهای  $q_2$  و  $q_3$ ، جاذبه است. با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

$$F_{21} = k \frac{|q_2||q_1|}{r_{21}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 8 \times 10^{-3} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده،  $\vec{F}_{21}$  در جهت مثبت محور  $x$  است. بنابراین،  $\vec{F}_{21} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$  می‌شود. به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای  $q_2$  و  $q_3$  داریم:

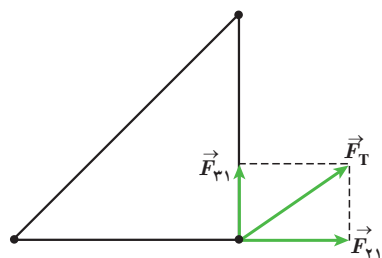
$$F_{32} = k \frac{|q_3||q_2|}{r_{32}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(3 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده،  $\vec{F}_{32}$  در جهت مثبت محور  $y$  است. بنابراین،  $\vec{F}_{32} = (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$  می‌شود. پس برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر بار  $q_1$  برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{32} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

و بزرگی آن با استفاده از رابطه فیثاغورس، چنین به دست می‌آید:

$$F_T = \sqrt{F_{21}^2 + F_{32}^2} = \sqrt{(8 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (6 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 1 \times 10^{-2} \text{ N}$$

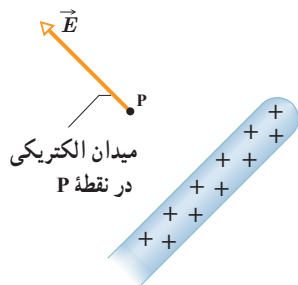
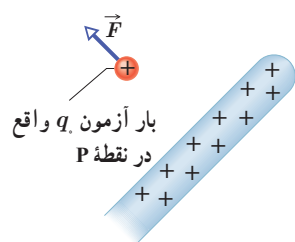


## تمرین ۱-۳

- در مثال ۱-۴ الف) اگر علامت بار  $q_2$  تغییر کند جهت نیروی برآیند وارد بر بار  $q_1$  چگونه خواهد شد؟  
 ب) اگر علامت بار  $q_2$  تغییر نکند، جهت نیروی برآیند وارد بر بار  $q_1$  چگونه خواهد شد؟  
 پ) آیا اندازه نیروی برآیند وارد بر بار  $q_1$  در قسمت‌های الف و ب با مقدار به دست آمده در مثال ۱-۴ متفاوت است؟

## ۱-۴ میدان الکتریکی

در بخش ۱-۱ دیدیم که دو بار الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار دارند، برهم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. ولی این پرسش مطرح می‌شود که بارهای  $q_1$  و  $q_2$  چطور حضور یکدیگر را حس می‌کنند؟ به عبارت دیگر، این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می‌توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ در فیزیک پاسخ این پرسش این گونه است که بار  $q_1$  خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می‌کند که به آن اصطلاحاً **میدان الکتریکی** بار  $q_1$  گفته می‌شود. وقتی بار  $q_2$  را در نقطه‌ای از فضای پیرامون بار  $q_1$  قرار دهیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی‌ای قرار می‌گیرد که بار  $q_1$  پیش‌تر در آن نقطه ایجاد کرده است. بنابراین، بار  $q_1$ ، نه با تماس با بار  $q_2$  بلکه به وسیله میدان الکتریکی خودش بر بار  $q_2$  نیرو وارد می‌کند.



**شکل ۱-۱۰** میله باردار میدانی الکتریکی ایجاد می‌کند و به وسیله این میدان بر بار آزمون نیرو وارد می‌کند.

میدان الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف یک جسم باردار الکتریکی به صورت زیر تعیین می‌شود: نخست بار کوچک و مثبت  $q$  موسوم به **بار آزمون** را در آن نقطه قرار می‌دهیم و سپس نیروی الکتریکی  $\vec{F}$  وارد بر آن را اندازه می‌گیریم. آن‌گاه میدان الکتریکی  $\vec{E}$  ناشی از جسم باردار در آن نقطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

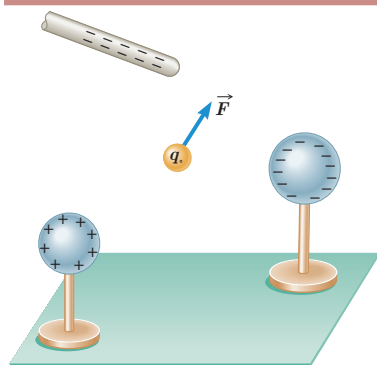
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (۳-۱)$$

بنا به تعریف میدان الکتریکی (رابطه ۳-۱)، میدان الکتریکی کمیتی برداری است که اندازه آن برابر  $E = \frac{F}{q_0}$  و جهت آن همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون است. مثلاً شکل ۱-۱۰ قسمتی از میله باردار را نشان می‌دهد که بر بار آزمون واقع در نقطه  $P$  نیرو وارد می‌کند. پس میدان در این نقطه، براساس این نیرو تعریف می‌شود.

در رابطه ۳-۱ یکای میدان الکتریکی ( $\vec{E}$ )، نیوتون بر کولن (N/C) است. بزرگی برخی از میدان‌های الکتریکی در جدول ۲-۱ داده شده است.

جدول ۲-۱ بزرگی برخی از مقادیر میدان‌های الکتریکی			
چشمه	بزرگی میدان (N/C)	چشمه	بزرگی میدان (N/C)
سیم کشی‌های داخل منزل	$۱۰^{-۲}$	در نزدیکی شانه باردار	$\approx ۱۰^۲$
امواج رادیویی	$\approx ۱۰^{-۱}$	در نزدیکی فرستنده رادار	$۷ \times ۱۰^۳$
گوشی همراه	$۳۵ - ۵۰$	جو (توفان تندری)	$۱۰^۴$
$۳۰$ سانتی متری از یک دستگاه پخش صوت	$۹۰$	در نزدیکی سطح کلاهک مولد وان دوگراف	$۲ \times ۱۰^۶$
جو (هوای آرام)	$\approx ۱۵۰$	فرو ریزش الکتریکی در هوا	$۳ \times ۱۰^۶$
آفتاب (متوسط)	$۱۰^۳$	در سطح هسته اورانیم	$۲ \times ۱۰^{۱۱}$

### مثال ۱-۵



بار آزمون نشان داده شده در شکل  $q = +۳/۰ \times ۱۰^{-۸} \text{ C}$  است و از سوی دو گوی و یک میله باردار نیرویی برابر با  $F = ۶/۰ \times ۱۰^{-۵} \text{ N}$  در جهت نشان داده شده بر آن وارد می‌شود.

الف) میدان الکتریکی در محل بار آزمون را تعیین کنید.

ب) اگر بار  $+۱۲ \times ۱۰^{-۸} \text{ C}$  را به جای  $q$  قرار دهیم، چه نیرویی به آن وارد می‌شود؟

**پاسخ:** الف) بزرگی میدان الکتریکی با استفاده از رابطه ۱-۳ برابر است با

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{6/0 \times 10^{-5} \text{ N}}{3/0 \times 10^{-8} \text{ C}} = 2/0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

که جهت آن در همان سوی نیروی  $\vec{F}$  نشان داده شده در شکل است.

ب) دوباره با استفاده از رابطه ۱-۳ داریم:

$$F = q_0 E = (12 \times 10^{-8} \text{ C})(2/0 \times 10^3 \text{ N/C}) = 24 \times 10^{-5} \text{ N}$$

جهت این نیرو نیز در همان سوی نیروی  $\vec{F}$  نشان داده شده در شکل است.

### خوب است بدانید: میدان الکتریکی مخازن نفت کش ها

وقتی آب به سطحی برخورد کند و از آن بپاشد، قطره های آب باردار می شوند. معمولاً قطره های بزرگ تر، دارای بار مثبت و قطره های کوچک تر، دارای بار منفی می شوند. قطره های بزرگ تر نسبتاً سریع فرو می افتند و قطره های کوچک تر که دارای بار منفی اند بیشتر در هوا می مانند. اگر تهویه هوا کم باشد، تعداد قطره های موجود در هوا به طور چشمگیری افزایش می یابد و بدین ترتیب، یک میدان الکتریکی بزرگ (حدود  $800 \text{ N/C}$ ) ایجاد می شود؛ این وضعیتی است که معمولاً در حمام رخ می دهد. به همین ترتیب، در حین تمیز کردن مخازن کشتی های نفت کش، وقتی قطره های آب به صورت افشانه از شیلنگ خارج شده و بر کف مخزن یا دیواره های آن می پاشند، باردار می شوند و در نتیجه مخزن پر از بخار آب باردار می شود. ممکن است این ذرات باردار با نوک فلزی آب فشان شیلنگ جرقه بزنند. اگر مخزن محتوای بخار نفت خام باشد، این جرقه ها می توانند بخار را مشتعل کنند و باعث انفجار مخزن گردند. برای رفع این خطر، پیش از تمیز کردن مخزن، یک گاز بی اثر به درون آن پمپ می شود تا اکسیژن موجود به اندازه ای کاهش یابد که از بروز انفجار جلوگیری کند.

### ۱-۵ میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار

می خواهیم میدان الکتریکی ناشی از ذره ای با بار  $q$  را در نقطه  $A$  که به فاصله  $r$  از بار  $q$  قرار دارد (شکل ۱-۱۱)، محاسبه کنیم. برای این محاسبه از رابطه ۱-۳ استفاده می کنیم. اگر بار آزمون  $q_0$  در نقطه  $A$  قرار گیرد، بار  $q$  به آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می کند. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی  $\vec{F}$  را محاسبه می کنیم و با جای گذاری در رابطه  $E = F/q_0$ ، بزرگی میدان الکتریکی بار  $q$  را در نقطه  $A$  به دست می آوریم:

$$F = k \frac{|q| |q_0|}{r^2} \quad \text{و} \quad E = \frac{F}{q_0}$$

در نتیجه:

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad (1-4)$$

رابطه ۱-۴ عامل های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از ذره ای با بار  $q$  را مشخص می کند. طبق این رابطه، میدان با اندازه بار  $q$ ، نسبت مستقیم و با مربع فاصله از آن، نسبت وارون دارد. همان طور که پیش تر دیدیم جهت بردار میدان الکتریکی  $\vec{E}$  در نقطه  $A$ ، همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون است که به طور فرضی در نقطه  $A$  می گذاریم.



**شکل ۱-۱۱** می خواهیم میدان حاصل از ذره باردار  $q$  را در نقطه  $A$  محاسبه کنیم.



مولد وان دوگراف<sup>۱</sup> وسیله‌ای است که با استفاده از تسمه‌ای متحرک، بار الکتریکی را بر روی یک کلاهک توخالی فلزی جمع می‌کند. فرض کنید کلاهک این مولد، کره‌ای با شعاع  $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}$  است و باری به بزرگی  $1.0 \times 10^{-6} \text{ C}$  روی آن جمع می‌شود. با فرض آنکه همه این بار در مرکز کره قرار داشته باشد، بزرگی میدان الکتریکی این بار را در فاصله‌های  $1.0 \text{ m}$ ،  $2.0 \text{ m}$ ،  $3.0 \text{ m}$  و  $4.0 \text{ m}$  از مرکز کره به دست آورید و سپس با نقطه‌یابی، نمودار بزرگی میدان الکتریکی را برحسب فاصله از مرکز کره رسم کنید.

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۴-۱ بزرگی میدان را در نقطه‌های مورد نظر به دست می‌آوریم:

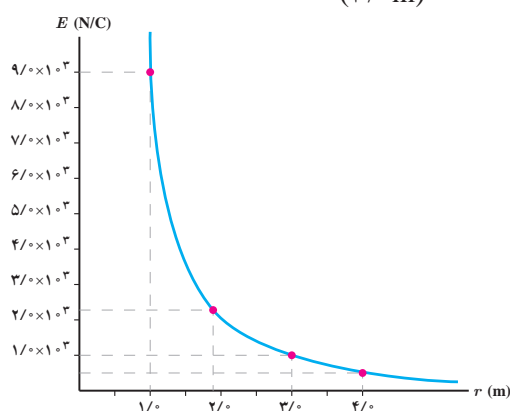
$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

$$E_1 = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1.0 \text{ m})^2} = 9.0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2.0 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2.3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_3 = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3.0 \text{ m})^2} = 1.0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_4 = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4.0 \text{ m})^2} = 0.5625 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 0.56 \times 10^3 \text{ N/C}$$



با استفاده از این نتایج نمودار  $E$  برحسب  $r$ ، مانند نمودار روبه‌رو خواهد شد.

برای مشاهده تجربی نتایج مثال ۶-۱ می‌توان به آزمایش شکل زیر توجه کرد. در این شکل، دو شمع یکی در فاصله‌ای نزدیک و دیگری در فاصله‌ای دور از کلاهک یک مولد وان دوگراف قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید شعله شمع نزدیک‌تر به سمت کلاهک کشیده شده است، در حالی که شعله شمع دورتر تغییر چندانی نکرده است. دلیل آن است که کلاهک مولد وان دوگراف بار منفی بزرگی دارد که یون‌های مثبت درون شعله شمع نزدیک‌تر را به سمت خود می‌کشد، در حالی که شمع دیگر در فاصله دوری از کلاهک قرار گرفته است که تحت تأثیر میدان الکتریکی ضعیف‌تری قرار می‌گیرد.



## تمرین ۴-۱

طبق مدل بور برای اتم هیدروژن، در حالت پایه فاصله الکترون از پروتون هسته برابر با  $5/3 \times 10^{-11} \text{ m}$  است. الف) اندازه میدان الکتریکی ناشی از پروتون هسته را در این فاصله تعیین کنید. ب) در چه فاصله‌ای از پروتون هسته، بزرگی میدان الکتریکی برابر با بزرگی میدان الکتریکی حاصل از مولد وان دوگراف مثال پیش در فاصله  $1/0 \text{ m}$  از مرکز کلاهیگ آن است؟

**برهم نهی میدان‌های الکتریکی:** اگر چند بار الکتریکی ذره‌ای داشته باشیم، میدان الکتریکی ناشی از این بارها، در نقطه‌ای از فضا چگونه تعیین می‌شود؟ در بخش ۱-۴ دیدیم اگر چند بار نقطه‌ای مانند  $q_1, q_2, \dots$  داشته باشیم نیروی الکتریکی برآیند حاصل از این بارها بر بار آزمون  $q_0$  با استفاده از اصل برهم نهی نیروهای کولنی از رابطه زیر به دست می‌آید:

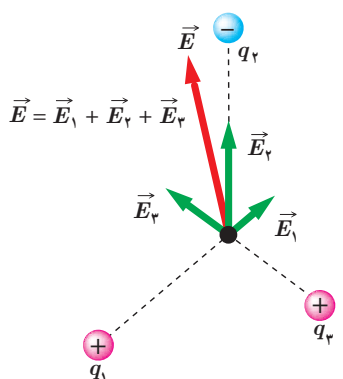
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} + \dots$$

حال اگر بخواهیم میدان الکتریکی را در محل بار آزمون به دست آوریم، با استفاده از تعریف میدان الکتریکی ( $\vec{E} = \vec{F}/q_0$ ) دو طرف معادله بالا را بر  $q_0$  تقسیم می‌کنیم. آن‌گاه خواهیم داشت:

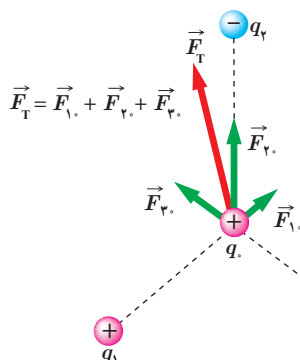
$$\frac{\vec{F}_T}{q_0} = \frac{\vec{F}_{10}}{q_0} + \frac{\vec{F}_{20}}{q_0} + \dots$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (5-1)$$

این رابطه که موسوم به **اصل برهم نهی میدان‌های الکتریکی** است، نشان می‌دهد که میدان الکتریکی ناشی از چند بار الکتریکی در نقطه‌ای از فضا، برابر مجموع میدان‌هایی است که هر بار در نبود سایر بارها در آن نقطه از فضا ایجاد می‌کند؛ یعنی برای یافتن میدان الکتریکی خالص حاصل از چند ذره باردار در نقطه‌ای از فضا باید نخست میدان الکتریکی ناشی از هر ذره را در آن نقطه به دست آورد و سپس این میدان‌ها را به صورت برداری با یکدیگر جمع کرد. مثلاً شکل ۱۲-۱ میدان الکتریکی خالص در محل بار آزمون را نشان می‌دهد. در این کتاب، صرفاً مثال‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها میدان‌های الکتریکی در یک نقطه، در یک راستا قرار دارند یا عمود بر یکدیگرند.<sup>۱</sup>



ب) میدان الکتریکی  $\vec{E}$  در محل بار آزمون، جمع برداری میدان‌های  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$  در محل این بار است.

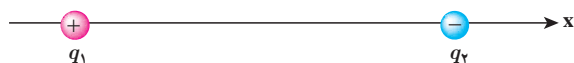


الف) نیروی  $\vec{F}_T$ ، نیروی برآیند وارد بر بار آزمون  $q_0$  است.

شکل ۱۲-۱

۱- بررسی حالت‌هایی که میدان‌ها هم‌راستا و یا عمود برهم نیستند، خارج از برنامه درسی این کتاب بوده و نباید مورد ارزشیابی قرار بگیرد.

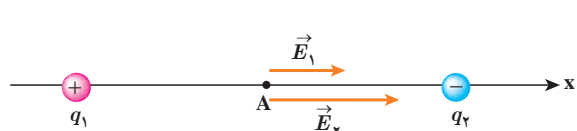
مطابق شکل، دو ذره با بارهای  $q_1 = 4 \mu\text{C}$  و  $q_2 = -6 \mu\text{C}$  در فاصله  $8 \text{ m}$  از یکدیگر ثابت شده‌اند. اندازه میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های زیر به دست آورید:



(الف) در وسط خط واصل دو ذره،

(ب) در نقطه‌ای روی خط واصل دو ذره به فاصله  $8 \text{ m}$  از  $q_1$  و  $16 \text{ m}$  از  $q_2$ .

**پاسخ:** در غیاب هر یک از دو ذره، میدان حاصل از بار دیگر را محاسبه می‌کنیم. میدان حاصل از مجموعه دو بار، برآیند این دو میدان خواهد بود.



(الف) در شکل اگر بار آزمون را در نقطه A واقع در وسط خط واصل دو ذره قرار دهیم، بار  $q_1$  آن را دفع و بار  $q_2$  آن را جذب می‌کند. بنابراین، همان‌طور که شکل نشان می‌دهد،  $\vec{E}_1$

و  $\vec{E}_2$  در نقطه A هم جهت و به سوی بار  $q_2$  (در سوی مثبت محور x) هستند.

بنابر اصل برهم‌نهی میدان‌های الکتریکی داریم:

$$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = E_1 \vec{i} + E_2 \vec{i}$$

مقادیر  $E_1$  و  $E_2$  را با استفاده از رابطه ۱-۴ به دست می‌آوریم:

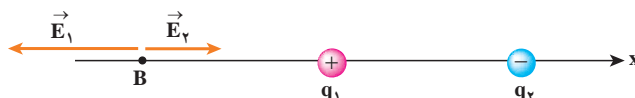
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2.3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 3.375 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 3.4 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین:

$$\vec{E}_A = (2.3 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (3.4 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (5.7 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

(ب) اکنون اگر بار آزمون را در نقطه B قرار دهیم شکل میدان‌های الکتریکی به صورت زیر در می‌آید:



با استفاده از اصل برهم‌نهی میدان‌های الکتریکی داریم:

$$\vec{E}_B = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = -E_1 \vec{i} + E_2 \vec{i}$$

که در آن  $E_1$  و  $E_2$  برابرند با

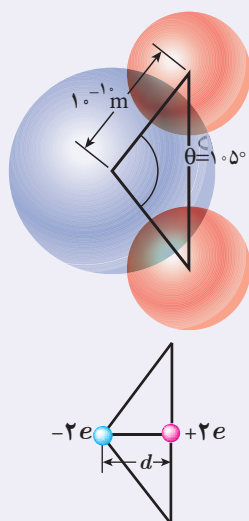
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(8 \text{ m})^2} = 5.625 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 5.6 \times 10^2 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{(16 \text{ m})^2} = 2.109 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 2.1 \times 10^2 \text{ N/C}$$

بنابراین:

$$\vec{E}_B = (-5.6 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i} + (2.1 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i} = (-3.5 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i}$$

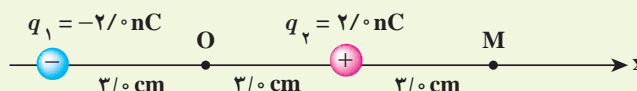
## خوب است بدانید



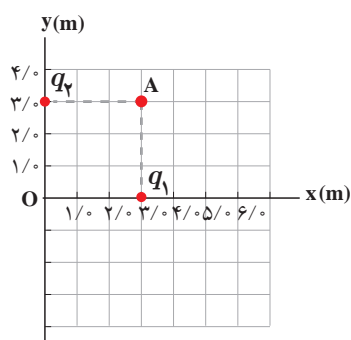
**دوقطبی الکتریکی** آرایشی از بارهای الکتریکی است که در آن دو ذره با بزرگی بار  $q$  یکسان و علامت مخالف در فاصله  $d$  از هم روی محوری که به آن محور دوقطبی گفته می‌شود قرار گرفته‌اند. مولکول آب ( $H_2O$ ) از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن ساخته شده است. اتم اکسیژن الکترون‌های دو اتم هیدروژن را به سمت خود می‌کشد و بدین ترتیب اتم‌های هیدروژن بار مثبت و خودش بار منفی پیدا می‌کند. این سه اتم مطابق شکل به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که خطوط وصل‌کننده مراکز اتم‌های هیدروژن به مرکز اتم اکسیژن، زاویه  $105^\circ$  با یکدیگر می‌سازند. با فرض اینکه کل بار مثبت ( $+2e$ ) دقیقاً در میانه خطی باشد که مراکز اتم‌های هیدروژن را به هم متصل می‌کند و بار منفی ( $-2e$ ) دقیقاً در مرکز اتم اکسیژن قرار داشته باشد، یک دوقطبی الکتریکی خواهیم داشت. بررسی میدان الکتریکی دوقطبی و نیز اثر میدان الکتریکی خارجی بر دوقطبی، اهمیت زیادی در شناخت رفتار الکتریکی مولکول‌های قطبی (مانند مولکول آب) در میدان‌های الکتریکی دارد.

## تمرین ۱-۵

شکل زیر، آرایشی از دو بار الکتریکی هم‌اندازه و غیرهمنام (دوقطبی الکتریکی) را نشان می‌دهد که در آن فاصله دو بار از هم  $6\text{ cm}$  است. میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های O و M به دست آورید.



## مثال ۱-۸



شکل روبه‌رو، دو بار نقطه‌ای  $q_1$  و  $q_2$  را در صفحه  $xy$  نشان می‌دهد. میدان الکتریکی خالص را در نقطه O (مبدأ مختصات) تعیین کنید. ( $q_1 = q_2 = 5\text{ }\mu\text{C}$ )

**پاسخ:** در نقطه O میدان‌های الکتریکی مانند شکل زیر می‌شوند؛ چون بارها با هم برابر و فاصله آنها تا نقطه O نیز یکسان است، پس اندازه میدان‌ها در این نقطه با هم برابرند:

$$E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{r^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3\text{ m})^2} = 5 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_1 = (-5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} \quad \text{و} \quad \vec{E}_2 = (-5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{j}$$

در نتیجه میدان الکتریکی خالص برابر است با

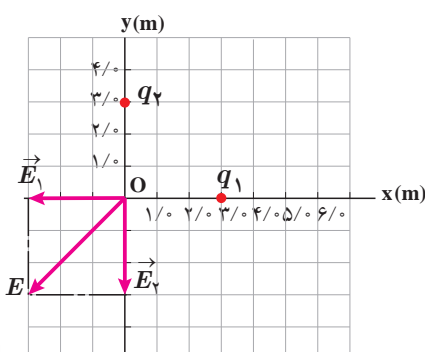
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$\vec{E} = (-5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (-5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{j}$$

و از آنجا اندازه میدان الکتریکی خالص چنین می‌شود:

$$E = \sqrt{(-5 \times 10^3 \text{ N/C})^2 + (-5 \times 10^3 \text{ N/C})^2}$$

$$= 7.07 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 7.1 \times 10^3 \text{ N/C}$$

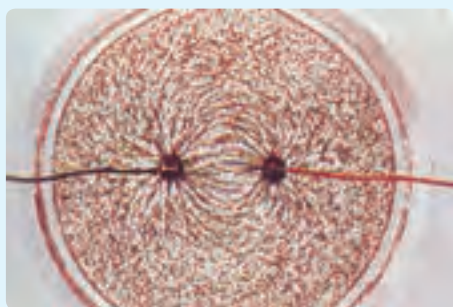


میدان الکتریکی خالص حاصل از آرایش بار مثال ۱-۸ را در نقطه A تعیین کنید.

### ۱-۶ خطوط میدان الکتریکی

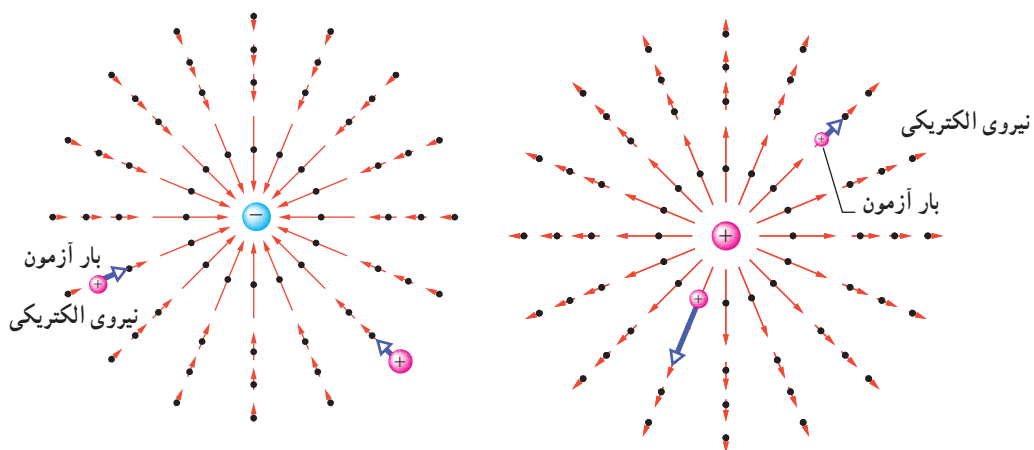
پیش از این دیدیم بارهای الکتریکی در فضای پیرامون خود میدان الکتریکی ایجاد می کنند. آیا می توانید بردار میدان الکتریکی را در نقاط پیرامون یک ذره باردار مثبت یا منفی تجسم کنید؟ مایکل فاراده نخستین بار در میانه قرن نوزدهم میلادی روشی را برای تجسم این بردارها ارائه کرد. برای مجسم کردن میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام باردار از خط‌های جهت‌داری موسوم به خطوط میدان الکتریکی استفاده می کنیم.

### فعالیت ۱-۳ (کاردر کلاس)



درون یک ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی با عمق کم، مقداری پارافین مایع یا روغن کرچک به عمق حدود  $5\text{cm}$  بریزید و داخل آن دو الکتروند نقطه‌ای قرار دهید. الکترونها را با سیم به پایانه‌های مثبت و منفی یک مولد ولتاژ بالا، مانند مولد وان‌دوگراف وصل کنید. روی سطح پارافین، مقدار کمی بذر چمن یا خاکشیر بپاشید. مولد را روشن کنید. اکنون به سمت‌گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروند توجه کنید. شکل سمت‌گیری دانه‌ها در این فضا را رسم کنید.

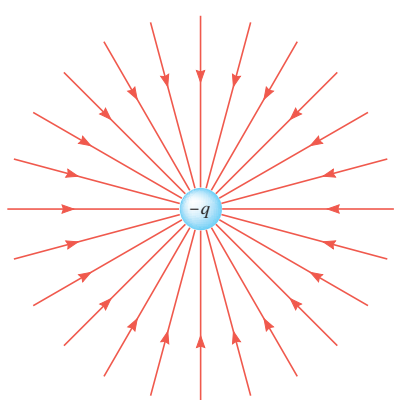
اگر یک بار آزمون را در نزدیکی یک ذره باردار مثبت یا منفی قرار دهیم، بسته به نوع بار، نیروی الکتریکی وارد به بار آزمون در جهت دور شدن از ذره (شکل ۱-۱۳ الف) و یا در جهت نزدیک شدن به آن (شکل ۱-۱۳ ب) خواهد بود.



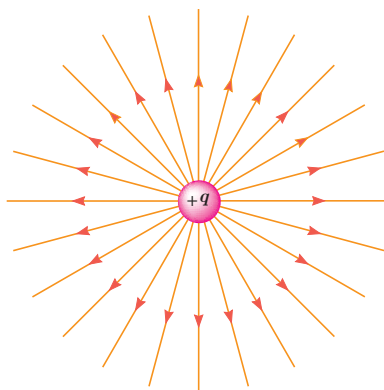
الف) میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار مثبت ساکن. ب) میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار منفی ساکن.

شکل ۱-۱۳

خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت با بردار میدان الکتریکی در آن نقطه است (شکل ۱۴-۱).



ب) خطوط میدان الکتریکی به سمت ذره باردار  $-q$  است.



الف) خطوط میدان الکتریکی در جهت دور شدن از ذره باردار  $+q$  است.

شکل ۱۴-۱

بنابراین، طرحی که از سمت‌گیری دانه‌ها در فعالیت ۳-۱ دیدید، در واقع طرحی از خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو الکترود بوده است.

قاعده‌های رسم خطوط میدان الکتریکی عبارت‌اند از:

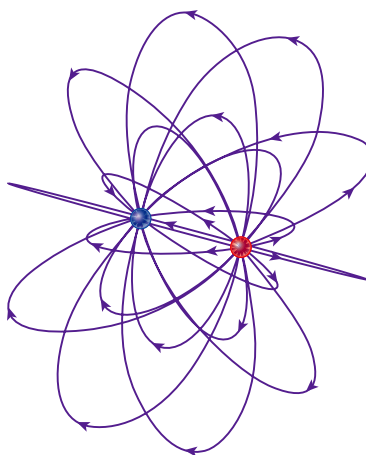
۱- در هر نقطه، بردار میدان الکتریکی باید مماس بر خط میدان الکتریکی عبوری از آن نقطه و در همان جهت باشد (شکل ۱۵-۱).

۲- میزان تراکم خطوط میدان در هر ناحیه از فضا نشان‌دهنده اندازه میدان در آن ناحیه است؛ هر جا خطوط میدان متراکم‌تر باشد، اندازه میدان بیشتر است (شکل ۱۶-۱).

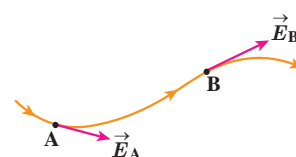
۳- در آرایشی از بارها خطوط میدان الکتریکی از بارهای مثبت شروع و به بارهای منفی ختم می‌شوند.

۴- خطوط میدان بر ایند هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند (شکل ۱۷-۱) یعنی از هر نقطه فضا فقط یک خط میدان الکتریکی می‌گذرد.

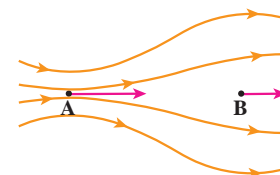
تجسم واقعی خطوط میدان، در فضا است، و بنابراین طرحی سه‌بعدی دارد (شکل ۱۸-۱).



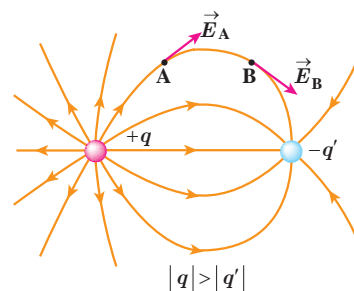
شکل ۱۸-۱ نمایش سه‌بعدی خطوط میدان برای یک دوقطبی الکتریکی.



شکل ۱۵-۱ میدان الکتریکی در هر نقطه برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است.



شکل ۱۶-۱ اطراف نقطه A خطوط میدان متراکم‌تر از اطراف نقطه B است. بنابراین، بزرگی میدان در نقطه A بیشتر از نقطه B است.



شکل ۱۷-۱ خطوط میدان از بارهای مثبت شروع و به بارهای منفی ختم می‌شوند و هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند.

به نظر شما چرا خطوط میدان الکتریکی برآیند هرگز یکدیگر را قطع نمی کنند؟



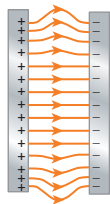
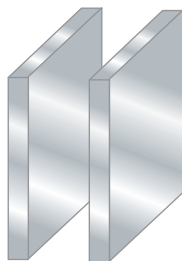
شکل ۱-۱۹ سمت گیری دانه ها در فضای بین دو الکترود صفحه ای موازی

**میدان الکتریکی یکنواخت :** اگر دوباره اسباب فعالیت ۱-۳ را سوار کنید و این بار الکترودهای نقطه ای را با دو صفحه فلزی موازی جایگزین کنید و دوباره به سمت گیری دانه ها در فضای بین دو الکترود توجه کنید، طرحی از خطوط میدان الکتریکی را مشاهده می کنید که در شکل ۱-۱۹ نشان داده شده است. خطوط این میدان، در فضای بین دو صفحه و دور از لبه های صفحات، مستقیم، موازی و هم فاصله اند؛ یعنی بردار میدان در تمام نقاط بین دو صفحه هم اندازه و هم جهت است. به چنین میدانی، میدان الکتریکی یکنواخت گفته می شود (شکل ۱-۲۰).

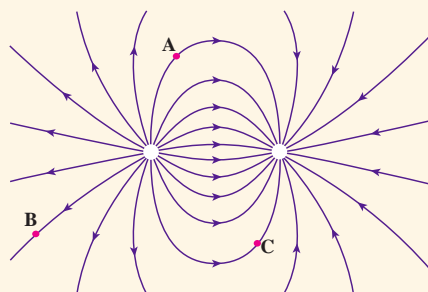
**نیروی الکتریکی وارد بر بار الکتریکی در یک میدان الکتریکی :** گرچه برای تعریف میدان الکتریکی یک جسم باردار از بار آزمون مثبت استفاده کردیم، ولی وجود این میدان مستقل از بار آزمون است. بنابراین، اگر بار الکتریکی  $q$  در میدان الکتریکی  $\vec{E}$  ناشی از اجسام باردار دیگری قرار گیرد، این میدان بر آن نیروی  $\vec{F}$  را وارد می کند. نیروی  $\vec{F}$  از رابطه زیر به دست می آید :

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (۱-۶)$$

بزرگی این نیرو از رابطه  $F = |q|E$  به دست می آید، و جهت آن اگر  $q$  مثبت باشد، در همان جهت  $\vec{E}$  و اگر  $q$  منفی باشد، در خلاف جهت  $\vec{E}$  خواهد بود.



شکل ۱-۲۰ طرحی از خطوط میدان یکنواخت بین دو صفحه رسانای موازی با بارهای هم اندازه و ناهم نام



بار  $-q$  را در نقطه های  $A$ ،  $B$  و  $C$  از میدان الکتریکی غیریکنواخت شکل روبه رو قرار دهید و جهت نیروی الکتریکی وارد بر این بار منفی را تعیین کنید.



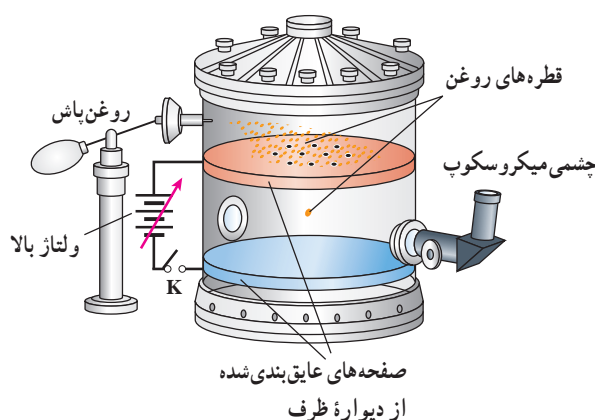
تولید مثل برخی از گل ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده ها به واسطه میدان الکتریکی، از یک گل به زنبور و از زنبور به گل دیگر منتقل می شوند. در این باره تحقیق کنید.

## مثال ۱-۹: آزمایش قطره - روغن میلیکان



رابرت اندرو میلیکان<sup>۲</sup> (۱۸۶۸-۱۹۵۳م)  
فیزیک‌دان خبره آمریکایی که در سال  
۱۹۲۳ میلادی به خاطر کار خود در تعیین  
بار الکترون و نیز اثر فوتوالکتریک برنده  
جایزه نوبل گردید.

همان‌طور که پیش‌تر دیدیم بار الکتریکی با هر مقداری ظاهر نمی‌شود؛ بلکه همواره مضرب درستی از بار بنیادی  $e$  است ( $q = \pm ne$ ). آزمایش کلاسیک فیزیک‌دان آمریکایی رابرت میلیکان به توضیح این امر می‌پردازد. این آزمایش اکنون به نام آزمایش قطره - روغن میلیکان<sup>۱</sup> معروف است. میلیکان بین دو ورقه فلزی موازی و افقی میدان الکتریکی قائم یکنواخت  $\vec{E}$  را توسط یک منبع ولتاژ بالا ایجاد کرد (که می‌توانست آن را قطع و وصل کند). او در مرکز ورقه بالایی چندین روزنه کوچک ایجاد کرده بود که از طریق آنها قطره‌های روغن حاصل از یک روغن پاش به ناحیه بین دو ورقه می‌پاشید. بیشتر این قطره‌ها در اثر مالش با دهانه خروجی روغن پاش، باردار می‌شدند. میلیکان با تغییر دادن میدان الکتریکی بین صفحات به حرکت قطره‌های روغن در این فضا توجه کرد و با تحلیل این حرکت و با در نظر گرفتن مقاومت هوا، نیروی الکتریکی وارد بر هر قطره را محاسبه کرد و از آنجا بار الکتریکی هر قطره را تعیین کرد. میلیکان با تکرار آزمایش قطره - روغن به دفعات زیاد و با قطره - روغن‌های متفاوت دریافت که بار قطره‌ها برابر بار بنیادی  $e$  یا مضرب درستی از این مقدار است. شکل زیر اسباب واقعی آزمایش اولیه میلیکان و طرحی از آن اسباب را نشان می‌دهد.



اسباب آزمایش اولیه میلیکان و طرحی از آن

اکنون وضعیتی را در نظر بگیرید که قطره روغن در فضای بین دو صفحه معلق است. اگر جرم این قطره روغن  $1.6 \times 10^{-15} \text{ kg}$  و میدان الکتریکی دارای بزرگی  $5 \times 10^5 \text{ N/C}$  و رو به پایین باشد، تعداد الکترون‌هایی که قطره جذب کرده یا از دست داده است، چقدر است؟

**پاسخ:** چون قطره روغن در میدان الکتریکی معلق است و وزن همواره رو به پایین اثر می‌کند، بنابراین، نیروی الکتریکی باید مطابق شکل رو به بالا بر قطره روغن اثر کند. چون جهت نیروی الکتریکی رو به بالا و جهت میدان الکتریکی رو به پایین است، نتیجه می‌گیریم که بار قطره روغن باید منفی باشد؛ یعنی باید قطره روغن الکترون به دست آورده باشد. حال به دنبال تعداد الکترون‌هایی هستیم که این قطره به دست آورده است. از شرط تعادل نیروها داریم:

$$|q|E = mg \Rightarrow \text{وزن} = \text{نیروی الکتریکی}$$

نیروی الکتریکی



وزن

$$|q| = \frac{mg}{E} = \frac{(8/2 \times 10^{-15} \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg})}{1/0 \times 10^5 \text{ N/C}} \approx 8/0 \times 10^{-19} \text{ C}$$

از طرفی می‌دانیم  $|q| = ne$  است. در نتیجه

$$n = \frac{8/0 \times 10^{-19} \text{ C}}{1/60 \times 10^{-19} \text{ C}} = 5$$

بنابراین، قطرهٔ روغن ۵ الکترون به‌دست آورده است.

## تمرین ۷-۱

روی سطح بادکنکی به جرم  $10^{-6} \text{ g}$  بار الکتریکی  $20 \text{ nC}$  ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی قرار می‌دهیم. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را در صورتی که بادکنک معلق بماند، تعیین کنید. از نیروی شناوری وارد به بادکنک چشم‌پوشی کنید.

## فعالیت ۵-۱



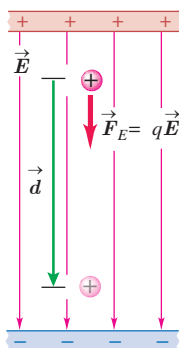
رسوب‌دهندهٔ الکتروستاتیکی (ESP) دود و غبار را از گازهای زائدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌آید جدا می‌سازد. رسوب‌دهنده‌ها انواع مختلفی دارند. در مورد اساس کار این رسوب‌دهنده‌ها تحقیق کنید. شکل‌های روبه‌رو تأثیر رسوب‌دهنده را در کاهش آلودگی هوای ناشی از یک دودکش نشان می‌دهد.

## ۷-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی

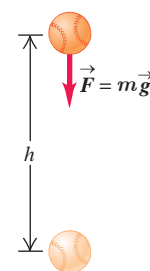
دو ذرهٔ باردار الکتریکی شکل ۲۱-۱ را در نظر بگیرید که در آن، بار  $+q_1$  در جای خود ثابت و بار  $+q_2$  در فضای اطراف آن رها شده است. می‌دانیم بار  $+q_2$  بر اثر میدان الکتریکی حاصل از بار  $+q_1$  از آن رانده و دارای انرژی جنبشی می‌شود. طبق قانون پایستگی انرژی، انرژی جنبشی نمی‌تواند خود به خود به وجود آمده باشد. به نظر شما این انرژی جنبشی از کجا آمده است؟ این انرژی، ناشی از تغییر (در اینجا کاهش) انرژی پتانسیلی است که به نیروی الکتریکی بین دو ذرهٔ شکل ۲۱-۱ وابسته است و همان‌طور که در کتاب فیزیک سال دهم دیدید به آن **انرژی پتانسیل الکتریکی** می‌گوییم. برای آنکه به توصیفی کمی از این انرژی دست یابیم، میدان الکتریکی یکنواختی را مطابق شکل ۲۲-۱ در نظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحهٔ باردار برقرار شده است.

اگر بار الکتریکی  $+q$  را از مجاورت صفحه مثبت رها کنیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی (با چشم‌پوشی از گرانش)، به طرف صفحه منفی شروع به حرکت می‌کند و به تدریج تندی و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد. این وضعیت، شبیه چیزی است که در کتاب فیزیک سال دهم دیدیم. در آنجا نیز مشاهده کردیم که وقتی جسمی به جرم  $m$  از ارتفاع  $h$  رها می‌شود، جسم رو به پایین حرکت کرده و انرژی جنبشی

شکل ۱- ۲۱ دو ذرهٔ باردار  $+q_1$  و  $+q_2$  در فضای اطراف بار  $+q_1$  رها شده است.



شکل ۱- ۲۲ دو ذرهٔ باردار  $+q$  در میدان الکتریکی یکنواخت رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود (از نیروی گرانشی چشم‌پوشی شده است).



شکل ۱-۲۳ جسم در میدان گرانشی یکنواخت زمین رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.

آن بر اثر کاهش انرژی پتانسیل گرانشی به تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۱-۲۳). همچنین دیدیم که کار نیروی گرانشی برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است ( $W_g = -\Delta U_g$ ).

در اینجا نیز می‌توان گفت: کار نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره باردار در میدان الکتریکی یکنواخت  $\vec{E}$  در یک جابه‌جایی مشخص برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی در همان جابه‌جایی است؛ یعنی:

$$W_E = -\Delta U_E \quad (۷-۱)$$

گرچه این رابطه برای یک میدان الکتریکی یکنواخت بیان شد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر میدان الکتریکی برقرار است.

بار ذره‌ای  $q$  را در میدان الکتریکی یکنواخت  $\vec{E}$  در نظر بگیرید که جابه‌جایی  $\vec{d}$  را موازی میدان الکتریکی، انجام می‌دهد (شکل ۱-۲۲). طبق تعریف کار که در سال قبل دیدید، کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی ثابت  $\vec{F}_E$  در طی جابه‌جایی  $\vec{d}$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_E = (F_E \cos\theta) d = F_E d \cos\theta$$

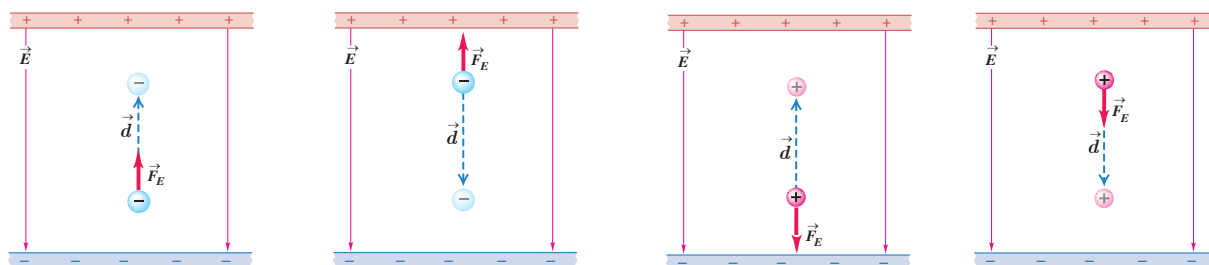
با توجه به اینکه  $F_E = |q|E$  است، این رابطه به صورت زیر می‌شود:

$$W_E = |q| E d \cos\theta$$

اکنون با استفاده از رابطه ۷-۱ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار ذره‌ای  $q$  چنین محاسبه می‌شود:

$$\Delta U_E = -W_E = -|q| E d \cos\theta \quad (۸-۱)$$

که در آن،  $\theta$  زاویه بین نیروی  $\vec{F}_E$  و جابه‌جایی  $\vec{d}$  است. (در این کتاب، در استفاده از رابطه ۸-۱، صرفاً با جابه‌جایی‌های هم‌راستا با میدان الکتریکی و یا عمود بر میدان الکتریکی سروکار خواهیم داشت). در این رابطه، بار الکتریکی ( $q$ ) برحسب کولن (C)، بزرگی میدان الکتریکی ( $E$ ) برحسب نیوتون بر کولن (N/C)، اندازه جابه‌جایی ( $d$ ) برحسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی ( $\Delta U_E$ ) برحسب ژول (J) است. توجه کنید که این رابطه چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است.



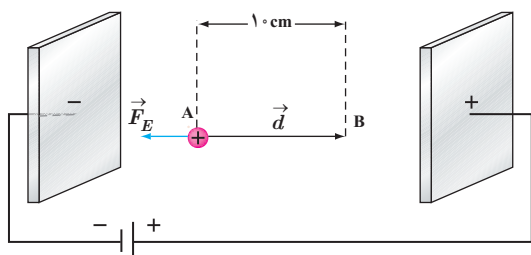
(ت) بار منفی را در خلاف جهت میدان الکتریکی  $\vec{E}$  جابه‌جا می‌کنیم: میدان الکتریکی کار مثبت  $W_E$  را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی  $U_E$  کاهش می‌یابد.

(پ) بار منفی را در جهت میدان الکتریکی  $\vec{E}$  جابه‌جا می‌کنیم: میدان الکتریکی کار منفی  $W_E$  را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی  $U_E$  افزایش می‌یابد.

(ب) بار مثبت را در خلاف جهت میدان الکتریکی  $\vec{E}$  جابه‌جا می‌کنیم: میدان الکتریکی کار منفی  $W_E$  را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی  $U_E$  افزایش می‌یابد.

(الف) بار مثبت را در جهت میدان الکتریکی  $\vec{E}$  جابه‌جا می‌کنیم: میدان الکتریکی کار مثبت  $W_E$  را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی  $U_E$  کاهش می‌یابد.

شکل ۱-۲۴



در یک میدان الکتریکی یکنواخت  $E = 2.0 \times 10^3 \text{ N/C}$ ، پروتونی از نقطه A با سرعت  $\vec{v}$  در خلاف جهت میدان الکتریکی پرتاب شده است. پروتون سرانجام در نقطه B متوقف می‌شود. بار پروتون  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و جرم آن  $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  است. الف) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی پروتون در این جابه‌جایی چقدر است؟

ب) تندی پرتاب پروتون را پیدا کنید (از وزن پروتون و مقاومت هوا چشم‌پوشی شود).

پاسخ:

الف) با توجه به رابطه ۸-۱ داریم:

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|Ed \cos \theta = -(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(2.0 \times 10^3 \text{ N/C})(1.0 \times 10^{-2} \text{ m})(\cos 180^\circ) = 3.2 \times 10^{-17} \text{ J}$$

ب) طبق قضیه کار-انرژی جنبشی می‌توان نوشت:

$$W_E = \Delta K \Rightarrow -\Delta U_E = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2)$$

$$-3.2 \times 10^{-17} \text{ J} = \frac{1}{2}(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(v_f^2 - v_i^2) \Rightarrow v_f = 1.96 \times 10^5 \text{ m/s} \approx 2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$$

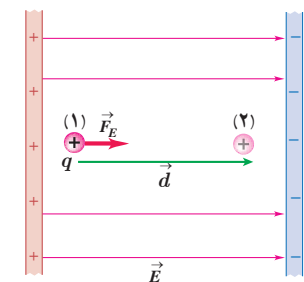
## تمرین ۸-۱

در مثال ۱-۱۰ اگر جای قطب‌های باتری عوض شود و پروتون را در نقطه A از حالت سکون رها کنیم، پروتون با چه تندی‌ای به نقطه B می‌رسد؟

## ۸-۱ پتانسیل الکتریکی

در بخش قبل دیدیم تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک ذره باردار به بار الکتریکی آن بستگی دارد؛ مثلاً با دوبرابر شدن بار ذره، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز دوبرابر می‌شود. بنابراین، نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار ذره، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است. به این نسبت، **اختلاف پتانسیل الکتریکی** دونقطه‌ای می‌گوییم که ذره میان آنها جابه‌جا شده است (شکل ۲۵-۱) و آن را با  $\Delta V$  نمایش می‌دهیم:

$$\Delta V = V_f - V_i = \frac{\Delta U_E}{q} \quad (9-1)$$



شکل ۲۵-۱ نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است.

که در آن  $V$  کمیتی زرده‌ای موسوم به پتانسیل الکتریکی است که مقدار آن در نقطه‌های ۱ و ۲ به ترتیب  $V_f$  و  $V_i$  است. در این رابطه، اختلاف پتانسیل الکتریکی ( $\Delta V$ ) برحسب ژول بر کولن (J/C) است که آن را به افتخار *الساندرو ولتا*، ولت می‌نامند و با نماد  $V$  نمایش می‌دهند.



الساندرو ولتا (۱۸۲۷ - ۱۷۴۵م)

الساندرو ولتا در ایتالیا به دنیا آمد. نخست به شغل معلمی روی آورد و تا سن سی سالگی به این کار ادامه داد. سپس در دانشگاه پادوا به استادی فیزیک برگزیده شد. در آنجا وظیفه داشت علاوه بر تدریس، آزمایشگاهی نیز دایر کند. وقتی در دانشگاه تدریس می کرد دستگاهی به نام الکتروفور را اختراع کرد و شرح جزئیات دستگاه را برای جوزف پرستلی فرستاد. ولتا با استفاده از این دستگاه قوانین فیزیکی زیادی را کشف کرد، در سال ۱۷۹۱ لوئیجی گالوانی استاد زیست شناسی و فیزیولوژی دانشگاه بولونیا موقعی که سرگرم تشریح قورباغه ای در آزمایشگاهش بود، یک گیره برنجی را در نخاع جانور قرار داد و متوجه شد که پس از برخورد ماهیچه پای قورباغه با جاقوی جراحی، خصوصاً وقتی قسمت بالای جاقو با گیره تماس پیدا کند، ماهیچه به شدت منقبض می شود و علت انقباض ماهیچه پای قورباغه را الکتریسیته ای پنداشت که در بدن جانور به وجود می آید. اما ولتا برخلاف گالوانی عقیده داشت منشأ پیدایش این الکتریسیته از بدن جانور نیست و در نامه ای به تاریخ ۱۸۰۰ میلادی درباره ی پیل توضیح داد که امروزه پیل ولتا خوانده می شود. پیل ولتا از تعدادی صفحات نقره، مقوای آغشته به یک محلول الکترولیت و روی درست شده است که به ترتیب روی هم چیده شده اند. این پیل یک منبع الکتریسیته بود که امروزه به نام باتری خشک مورد استفاده قرار می گیرد. اختراع ولتا راه تازه ای را در پیشرفت علم گشود و با استفاده از پیل ولتا، دانشمندان توانستند در مدت زمان کوتاهی آب را به دو عنصر اکسیژن و هیدروژن تجزیه کنند.

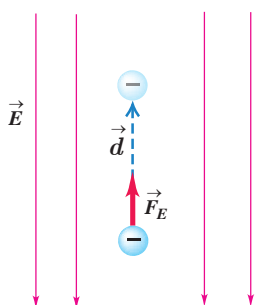
گرچه این رابطه را برای میدان الکتریکی یکنواخت بیان کردیم، اما برای میدان های الکتریکی غیریکنواخت نیز برقرار است. توجه کنید که در این رابطه علامت  $q$  باید در نظر گرفته شود. جدول ۳-۱ برخی از اختلاف پتانسیل ها (ولتاژهای) متداول را نشان می دهد.

در تشابه با انرژی پتانسیل گرانشی، در اینجا نیز می توانیم برای انرژی پتانسیل الکتریکی، مرجعی اختیار کنیم که در آن انرژی پتانسیل الکتریکی ذره و پتانسیل الکتریکی صفر باشد. بنابراین، پتانسیل الکتریکی در هر نقطه از میدان با رابطه زیر بیان می شود :

$$V = \frac{U_E}{q} \quad (۱-۱)$$

جدول ۳-۱ برخی از ولتاژهای متداول	
۶۰-۹۰ mV	پتانسیل استراحت نورو
۱/۵V	باتری قلمی
۱۲V	باتری اتومبیل
۱۱۰-۱۲۰V	برق خانگی در برخی از کشورها
۲۲۰-۲۴۰V	برق خانگی در ایران و اغلب کشورها
۲۴۰۰۰V	مولد نیروگاه برق
۱۰ <sup>۴</sup> -۱۰ <sup>۶</sup> V	خطوط انتقال برق ولتاژ بالا
۱۰ <sup>۸</sup> -۱۰ <sup>۹</sup> V	آذرخش

### مثال ۱-۱۱



در نتیجه برخورد پرتوهای کیهانی با مولکول های هوا، الکترون هایی از این مولکول ها کنده می شوند. در نزدیکی سطح زمین، میدان الکتریکی با بزرگی  $15 \text{ N/C}$  و جهت رو به پایین وجود دارد. الف) اگر یکی از این الکترون ها، تحت تأثیر این میدان  $50 \text{ m}$  رو به بالا جابه جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می کند؟ ب) اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه ای که الکترون بین آنها جابه جا شده چقدر است؟

**پاسخ:** الف) با استفاده از رابطه ۱-۸ برای تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون داریم

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|Ed \cos \theta = -(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})(15 \text{ N/C})(50 \text{ m}) \cos 0^\circ$$

$$= -1/20 \times 10^{-14} \text{ J}$$

ب) با استفاده از رابطه ۱-۹ برای اختلاف پتانسیل داریم

$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = \frac{-1/20 \times 10^{-14} \text{ J}}{-1/60 \times 10^{-19} \text{ C}} = 7/50 \times 10^4 \text{ V} = 75/0 \text{ kV}$$

## تمرین ۹-۱

الف) نشان دهید در یک میدان الکتریکی یکنواخت، با حرکت در سوی خطوط میدان، بدون توجه به نوع بار، پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد و بالعکس با حرکت در خلاف جهت خطوط میدان، بدون توجه به نوع بار، پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد.  
 ب) نشان دهید در میدان الکتریکی یکنواخت، با حرکت در جهت عمود بر خطوط میدان، پتانسیل الکتریکی تغییر نمی‌کند.

شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا گوشی تلفن همراه از آنها استفاده می‌شود (شکل ۱-۲۶) و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها ولتاژهای متفاوتی دارند؛ مثلاً باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ ولتی یا بیشترند. هر باتری دو پایانه دارد که یکی با مثبت و دیگری با منفی نشان داده می‌شود. بنا به قرارداد، اختلاف پتانسیل الکتریکی دو سر باتری برابر با پتانسیل پایانه مثبت منهای پتانسیل پایانه منفی است. اگر پتانسیل پایانه منفی را با  $V_-$  و پتانسیل پایانه مثبت را با  $V_+$  نشان دهیم، داریم:

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

بنابراین، وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی پتانسیل پایانه مثبت به اندازه ۱۲ ولت از پتانسیل پایانه منفی آن بیشتر است؛ مثلاً اگر پتانسیل پایانه منفی را برابر با  $-4V$  فرض کنیم، پتانسیل پایانه مثبت برابر  $+8V$  خواهد شد. می‌توان پایانه منفی را مرجع پتانسیل در نظر گرفت؛ در این صورت، پتانسیل پایانه مثبت برابر  $+12V$  می‌شود. معمولاً (به خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین یا نقطه‌ای از مدار را برابر صفر می‌گیرند و به آن نقطه، اصطلاحاً نقطه زمین می‌گویند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به آن می‌سنجند. نقطه زمین را در مدارهای الکتریکی با نماد  $\perp$  نشان می‌دهند.

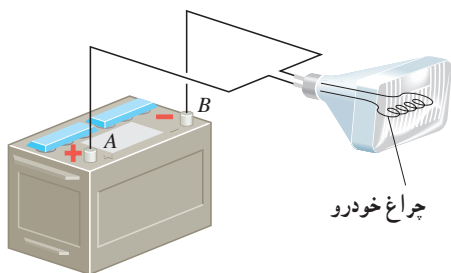


شکل ۱-۲۶ برخی از باتری‌های متداول

## تمرین ۱۰-۱

اگر پایانه مثبت یک باتری ۱۲ ولتی را مرجع پتانسیل در نظر بگیریم، پتانسیل پایانه منفی آن چند ولت خواهد شد؟

## مثال ۱۲-۱



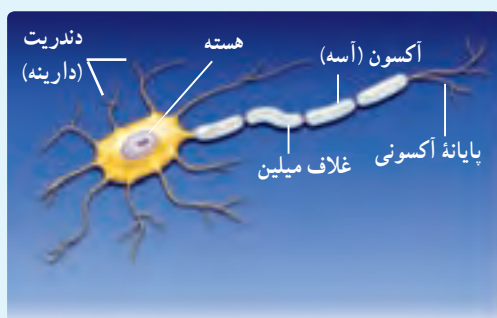
اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر  $12V$  است. اگر بار الکتریکی  $50\%$  کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟  
**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۹-۱ داریم:

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

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_+ - V_-) = (-50\% C)(+12V) = -600 J$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه  $600 J$  کاهش یافته است.

## فعالیت ۱-۶



عمل مغز اساساً بر مبنای کنش‌ها و فعالیت‌های الکتریکی است. سیگنال‌های عصبی چیزی جز عبور جریان‌های الکتریکی نیست. مغز این سیگنال‌ها را دریافت می‌کند و اطلاعات به صورت سیگنال‌های الکتریکی در امتداد اعصاب گوناگون منتقل می‌شوند. هنگام انجام هر عمل خاصی، سیگنال‌های الکتریکی زیادی تولید می‌شوند. این سیگنال‌ها حاصل کنش الکتروشیمیایی در یاخته‌های عصبی موسوم به نورون هستند. درباره چگونگی کار نورون‌ها تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

**رابطه اختلاف پتانسیل دو نقطه و اندازه میدان الکتریکی یکنواخت:** همان‌طور که پیش‌تر گفتیم اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه از میدان الکتریکی، مستقل از نوع و اندازه بار جابه‌جا شده بین دو نقطه است. بنابراین، می‌توانیم فرض کنیم بار جابه‌جا شده بین دو نقطه مثبت است. همچنین فرض کنید این بار مثبت را در میدان الکتریکی یکنواخت  $\vec{E}$  هم‌جهت با خطوط میدان به اندازه  $d$  جابه‌جا کنیم. بنا به رابطه ۱-۸ و با توجه به مثبت بودن  $q$  و صفر بودن زاویه  $\theta$  داریم

$$\Delta U_E = -|q|Ed \cos 0^\circ = -qEd$$

از طرفی با استفاده از رابطه ۱-۹ داریم

$$\Delta U_E = q\Delta V$$

با برابر قرار دادن دو رابطه بالا به رابطه زیر می‌رسیم

$$\Delta V = -Ed$$

توجه کنید که این رابطه را برای حرکت در جهت میدان الکتریکی به دست آوردیم. اگر در خلاف جهت میدان حرکت می‌کردیم به رابطه  $\Delta V = Ed$  می‌رسیدیم. پس در هر دو حالت می‌توان گفت:

$$|\Delta V| = Ed \quad (1-11)$$

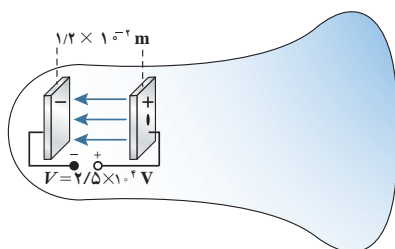
در این رابطه  $\Delta V$  بر حسب ولت،  $E$  بر حسب نیوتون بر کولن، و  $d$  بر حسب متر است. بنابراین می‌توان نوشت:  $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$ .

## مثال ۱-۱۳

لامپ‌های تصویر تلویزیون‌ها و نمایشگرهای قدیمی، لامپ پرتو-کاتدی (CRT) بودند. در این لامپ، الکترون‌ها در میدان الکتریکی یکنواخت بین دو صفحه باردار، مطابق شکل، شتاب می‌گیرند و با صفحه نمایشگر برخورد می‌کنند. اگر صفحه‌ها در فاصله  $1/2 \times 10^{-2} \text{ m}$  از یکدیگر باشند و اختلاف پتانسیل بین آنها  $2/5 \times 10^4 \text{ V}$  باشد، بزرگی میدان الکتریکی بین صفحه‌ها را تعیین کنید.

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۱-۱۱ داریم:

$$E = \frac{|\Delta V|}{d} = \frac{2/5 \times 10^4 \text{ V}}{1/2 \times 10^{-2} \text{ m}} = 2/0.8 \times 10^6 \text{ V/m} \approx 2/1 \text{ MV/m}$$





کار انجام شده توسط نیروی خارجی: فرض کنید در یک میدان الکتریکی یکنواخت، ذره‌ای با بار  $q$  را با اعمال نیرویی از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر جابه‌جا کنیم (شکل ۱-۲۷). در حین این حرکت، نیروی خارجی ما کار خارجی  $W_{\text{خارجی}}$  را روی بار انجام می‌دهد، در حالی که نیروی الکتریکی نیز کار  $W_E$  را روی آن انجام داده است. با استفاده از قضیه کار-انرژی جنبشی، تغییر انرژی جنبشی بار  $q$  چنین می‌شود:

$$\Delta K = W_{\text{خارجی}} + W_E = W_{\text{خارجی}} - q\Delta V \quad (۱۲-۱)$$

که در آن از رابطه‌های ۱-۷ ( $W_E = -\Delta U_E$ ) و ۱-۹ ( $\Delta U_E = q\Delta V$ ) استفاده کرده‌ایم. حال فرض کنید که تندی بار  $q$  در ابتدا و انتهای این جابه‌جایی یکسان باشد (یعنی  $\Delta K = 0$ ). آنگاه معادله بالا به صورت زیر درمی‌آید:

$$W_{\text{خارجی}} = -W_E = q\Delta V \quad (\text{برای } \Delta K = 0) \quad (۱۳-۱)$$

شکل ۱-۲۷ نیروی دست، بار  $q$  را در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه‌جا می‌کند.

در این حالت خاص، بسته به علامت و بزرگی  $q$  و  $\Delta V$ ، کار خارجی  $W_{\text{خارجی}}$  می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد.

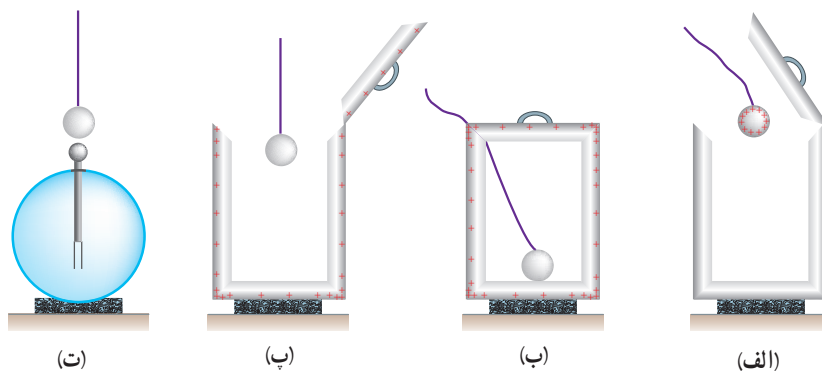
### تمرین ۱-۱۱

در شکل ۱-۲۷ الف) با فرض آنکه بار  $q$  در ابتدا و انتهای جابه‌جایی ساکن باشد، آیا کار نیروی دست، مثبت است یا منفی؟  
ب) آیا بار  $q$  به نقطه‌ای با پتانسیل بیشتر حرکت کرده است یا به نقطه‌ای با پتانسیل کمتر؟ توضیح دهید.

### ۹-۱ میدان الکتریکی در داخل رساناها

جسم رسانایی را در نظر بگیرید. به نظر شما اگر باری اضافی به این جسم داده شود، چگونه در آن توزیع می‌شود؟ اگر این جسم در میدان الکتریکی خارجی قرار گیرد، توزیع میدان در داخل و خارج آن چگونه می‌شود؟ در ادامه به توضیح آزمایشی می‌پردازیم که به قسمتی از این پرسش‌ها پاسخ می‌دهد. توزیع بار الکتریکی در رسانا - آزمایش فاراده: نخستین بار بنیامین فرانکلین برای پی بردن به اینکه بار الکتریکی داده شده به رسانای خنثی چگونه در آن توزیع می‌شود، آزمایشی را در سال ۱۷۵۵ میلادی انجام داد. تقریباً ۸۰ سال بعد (۱۸۳۶ میلادی) این آزمایش توسط مایکل فاراده انگلیسی به گونه‌ای دیگر تکرار شد. در ادامه به توضیح نوعی از آزمایش فاراده می‌پردازیم که اندکی با آزمایش اصلی او متفاوت است.

ظرف رسانایی با درپوش فلزی را در نظر بگیرید که روی پایه نارسانایی قرار دارد و روی درپوش آن دسته‌ای عایق نصب شده است. ابتدا ظرف بدون بار است. یک گوی فلزی را که از نخ عایقی آویزان است بردار و سپس وارد ظرف می‌کنیم (شکل ۱-۲۸ الف). اکنون گوی را با کف ظرف تماس می‌دهیم و سپس درپوش فلزی را می‌بندیم (شکل ۱-۲۸ ب). آنگاه درپوش فلزی را با دسته عایقش برمی‌داریم (شکل ۱-۲۸ پ).



شکل ۲۸-۱ شرحی تصویری از آزمایش فاراده

پس از خارج کردن گوی فلزی از ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود عقربه الکتروسکوپ تکان نمی‌خورد (شکل ۱-۲۸-ت). همچنین اگر ظرف را به الکتروسکوپ نزدیک کنیم، مشاهده می‌شود که عقربه‌های الکتروسکوپ از هم فاصله می‌گیرند.

از این آزمایش نتیجه می‌گیریم که بار اضافی داده شده به یک رسانا روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود. شکل ۱-۲۹ طرحی از توزیع بار داده شده در سطح خارجی یک رسانا را نشان می‌دهد.

بررسی‌های دقیق نشان می‌دهند پس از مدت زمان کوتاهی از دادن بار به رسانا (از مرتبه  $10^{-9}$  s)، بار در سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود و نحوه توزیع بار در رسانا به گونه‌ای است که میدان الکتریکی در داخل رسانا صفر شود. به عبارت دیگر در شرایط الکتروستاتیکی، میدان الکتریکی در داخل رسانا نمی‌تواند صفر نباشد؛ زیرا اگر این میدان صفر نباشد، بر الکترون‌های آزاد داخل رسانا نیروی الکتریکی (طبق رابطه  $\vec{F} = q\vec{E}$ ) وارد می‌کند و سبب ایجاد جریان الکتریکی در داخل رسانا می‌شود که این بدین معناست که بارها در تعادل الکتروستاتیکی قرار ندارند.

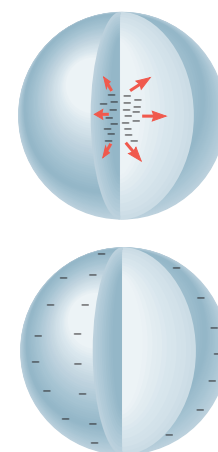
**رسانای خنثی در میدان الکتریکی:** در علوم هشتم با پدیده القا آشنا شدیم. در شکل ۱-۳۰ جسم رسانای خنثایی که بر روی آن بار القا می‌شود در میدان الکتریکی خارجی میله قرار گرفته است. وقتی یک رسانای خنثی را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، باز هم در مدت زمان کوتاهی (از مرتبه  $10^{-9}$  s) الکترون‌های آزاد تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی، طوری روی سطح خارجی توزیع می‌شوند (القا می‌شوند) که میدان الکتریکی ناشی از آنها اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی کند و بدین ترتیب میدان الکتریکی خالص درون رسانا صفر شود. شکل ۱-۳۱ یک گوی رسانا را نشان می‌دهد که در میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است. نحوه توزیع بار روی گوی به گونه‌ای است که میدان الکتریکی در داخل رسانا صفر شده است.

چون میدان الکتریکی درون رسانایی که در تعادل الکتروستاتیکی است برابر با صفر است، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره باردار در داخل رسانا نیز صفر می‌شود. بنابراین، کار نیروی الکتریکی در هر جابه‌جایی دلخواهی در داخل رسانا صفر می‌شود. در نتیجه همه نقاط رسانا پتانسیل یکسانی دارند. به عبارت دیگر:

$$F_E = 0 \Rightarrow \Delta U_E = -W_E = 0$$

و در نتیجه

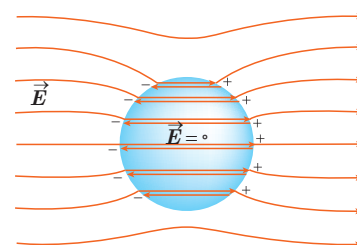
$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = 0 \Rightarrow V_r - V_i = 0 \Rightarrow V_i = V_r$$



شکل ۲۹-۱ بار اضافی داده شده به یک رسانا در سطح خارجی آن توزیع می‌شود.



شکل ۱-۳۰ نزدیک کردن میله باردار منفی به گوی فلزی خنثایی که روی پایه عایقی قرار گرفته است، موجب ایجاد بارهای القایی مثبت و منفی در دو طرف گوی فلزی می‌شود.



شکل ۱-۳۱ یک گوی رسانای خنثی در میدان الکتریکی خارجی. میدان الکتریکی خارجی باعث جدا شدن بارهای مثبت و منفی در دو وجه رسانا شده است، به طوری که میدان حاصل از این بارها، میدان خارجی در داخل رسانا را خنثی می‌کند. (توجه کنید که دو خط هر جفت خطوط میدان نشان داده شده در داخل رسانا منطبق برهم اند و برای آنکه دیده شوند، با فاصله اندکی از هم رسم شده‌اند.)



الف) در شكل شخصي را داخل يك قفس توري فلزي مي بينيد كه نوعي از قفس فاراده است. در مورد قفس فاراده و کاربردهايش تحقيق و به كلاس گزارش كنيد.

ب) تحقيق كنيد چرا معمولاً شخصي كه در داخل اتومبيل يا هواپيماست از خطر آذرخش در امان مي ماند.

پ) با اعضاي گروه خود آمايش هاي ديگري را طراحي و اجرا كنيد كه نشان دهد بار اضافي داده شده به رسانا، روي سطح خارجي آن قرار مي گيرد.

### فناوري و کاربرد

يكي از کاربردهاي صنعتي پديده القاي بار الكتريكي، رنگ پاشي الكتروستاتيكي است (شكل ۱-۳۲-الف). در نوعي از اين روش رنگ پاشي، سطح فلزي اي كه قرار است رنگ شود به زمين متصل مي شود. از طرفي قطره هاي ريز رنگ هنگام خروج از دهانه رنگ پاش باردار مي شوند. با نزديك شدن قطره هاي رنگ به هدف فلزي، بارهاي القايي با علامت مخالف بر روي فلز ظاهر مي شوند و به اين ترتيب، قطره ها را به سطح فلز جذب مي كنند (شكل ۱-۳۲-ب). اين روش رنگ پاشي، پاشيده شدن رنگ از افشانه قطره ها را کاهش مي دهد و رنگ يكنواختي بر سطح جسم فلزي ايجاد مي كند.



ب) اساس اين رنگ پاشي مبتني بر پديده القاي بار الكتريكي است.



الف) تصويري از رنگ پاشي الكتروستاتيكي

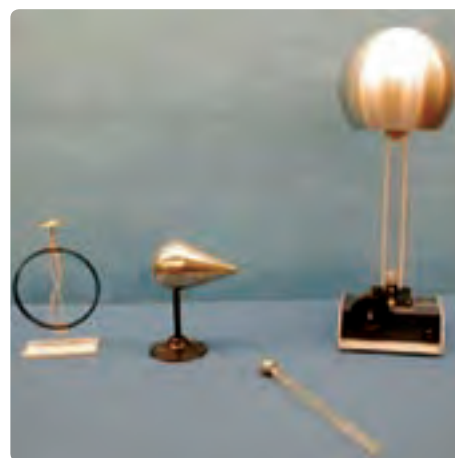
شكل ۱-۳۲

چگالي سطحي بار الكتريكي رسانا: براي اينكه بتوانيم تراكم بار الكتريكي در بخش هاي مختلف سطح يك جسم را با هم مقايسه كنيم كميتي به نام **چگالي سطحي بار** را تعريف مي كنيم. اگر مساحت سطحي كه بار روي آن توزيع شده است برابر  $A$  و بار الكتريكي موجود در آن سطح برابر  $Q$  باشد چگالي سطحي بار كه با نماد  $\sigma$  نشان داده مي شود از رابطه زير به دست مي آيد:

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (۱-۱۴)$$

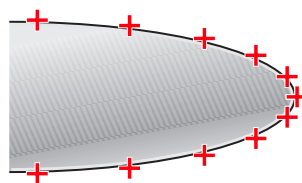
در اين رابطه چگالي سطحي بار ( $\sigma$ ) برحسب كولن بر مترمربع ( $C/m^2$ ) مي شود. اکنون مي خواهيم چگالي سطحي بار الكتريكي در رسانا را بررسي كنيم.ديديم كه بار الكتريكي روي

سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود. برای اینکه دریابیم بار الکتریکی داده‌شده به یک رسانا چگونه روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود از تعریف چگالی سطحی بار استفاده می‌کنیم. به این منظور آزمایش زیر را در نظر بگیرید که اسباب آن در شکل ۱-۳۳ نشان داده شده است. یک جسم رسانای دوکی‌شکل را روی پایه عایق قرار دهید و آن را با تماس با کلاهک مولد وان دوگراف باردار کنید. گلوله‌ای فلزی را که به دسته‌ای عایق متصل است با بخش پهن دوک تماس داده و سپس گلوله را به سر الکتروسکوپ تماس دهید. همین آزمایش را پس از خنثی کردن الکتروسکوپ و گوی فلزی با تماس با دستتان، با نوک تیز دوک انجام دهید. خواهید دید، انحراف صفحه‌های الکتروسکوپ با نوک تیز دوک بیشتر از انحراف صفحه‌ها با بخش پهن آن است. آزمایش‌هایی از این دست نشان می‌دهد تراکم بار و چگالی سطحی بار در نقاط تیز سطح جسم رسانای باردار از نقاط دیگر آن بیشتر است (شکل ۱-۳۴).



شکل ۱-۳۳ اسباب آزمایش چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی یک جسم رسانای باردار

شکل ۱-۳۴ چگالی بار در نقاط تیزتر سطح یک جسم رسانای باردار بیشتر است.



## فعالیت ۱-۸



دو قطعه ورقه آلومینیومی نازک به ابعاد  $3\text{cm} \times 4\text{cm}$  را مجاله کنید و به سرهای دو تکه نخ هم اندازه به طول  $30\text{cm}$  وصل کنید. پس از آنکه جسم فلزی دوکی‌شکل را با مولد وان دوگراف باردار کردید، یکی از آونگ‌ها را مقابل نوک تیز و دیگری را مقابل بخش پهن دوک بیاویزید. چه مشاهده می‌کنید؟ مشاهده خود را توجیه کنید.

## مثال ۱-۱۴

سطح فلزی بزرگ بارداری را در نظر بگیرید که بار الکتریکی در سطح آن و دور از لبه‌ها به طور یکنواخت توزیع شده است. اگر چگالی بار روی این سطح  $2.0 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$  باشد، در بخشی از این سطح به شکل مربعی به ضلع  $1.0 \text{ mm}$  چقدر بار قرار گرفته است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه ۱-۱۴ و تبدیل یکاها در SI، خواهیم داشت:

$$Q = \sigma A = (2.0 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2)(1.0 \times 10^{-3} \text{ m} \times 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}) = 2.0 \times 10^{-12} \text{ C} = 2.0 \text{ pC}$$



در مورد برق‌گیرهای ساختمان تحقیق کنید و بررسی کنید آنها چگونه ساختمان‌ها را از گزند آذرخش در امان نگه می‌دارند.

### خوب است بدانید: تخلیه هاله‌ای<sup>۱</sup>

همان‌طور که دیدیم در قسمت‌های نوک تیز اجسام رسانا، چگالی سطحی بار الکتریکی بیشتر است. با اسباب آزمایش فعالیت ۳-۱ می‌توان نشان داد که خطوط میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز متراکم‌تر و در نتیجه میدان الکتریکی قوی‌تر است (شکل الف). اگر بزرگی این میدان از یک مقدار حدی فراتر برود، این میدان شدید می‌تواند الکترون‌ها را از مولکول‌های هوا بکند و به آنها شتاب دهد. برخورد این الکترون‌ها با مولکول‌های دیگر موجب برانگیختگی این مولکول‌ها می‌شود و در نتیجه نوری تولید می‌شود که قابل مشاهده است (شکل ب). هنگام وقوع این پدیده، جنبش مولکولی، دما، و فشار هوا در محل وقوع این پدیده زیاد می‌شود که این معمولاً همراه با صدای جِلَز وِلَز و هیس ماندنی است که در حین تخلیه‌های جرقه‌ای شنیده می‌شود. به این جرقه‌های الکتریکی که در نوک تیز اجسام رسانای بلند و نازک ایجاد می‌شود، تخلیه هاله‌ای یا آتش سنت المو<sup>۲</sup> گفته می‌شود.



(ب)  
تخلیه هاله‌ای



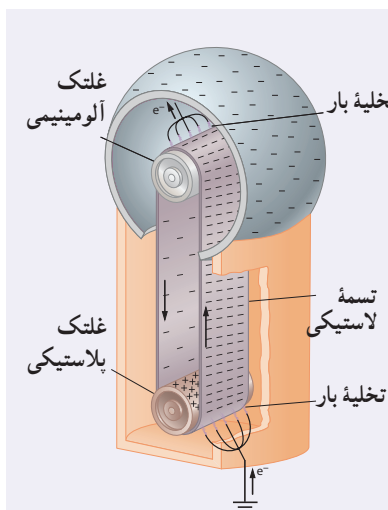
(الف)  
اسباب آزمایش فعالیت ۳-۱ به‌طوری‌که در آن الکترودها با یک صفحه تخت رسانا و یک رسانای دوکی شکل جایگزین شده‌اند. میدان الکتریکی در نقاط تیزتر جسم دوکی شکل قوی‌تر است.

### خوب است بدانید: 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 نمونه ساده مولد وان دوگراف، غلتک پایینی توسط یک موتور الکتریکی می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود.

<sup>۱</sup> Corona discharge

<sup>۲</sup> St. Elmo fire



معمولاً غلتک پایینی از جنس پلاستیک پلی اتیلن و غلتک بالایی از جنس آلومینیم است. بر اثر مالش تسمه ای لاستیکی با غلتک پایینی، این غلتک بنا بر سری الکتریسیته مالشی، بار مثبت پیدا می کند. غلتک پایینی که بار مثبت دارد، در یک شانه فلزی که متصل به زمین است، بار منفی القا می کند. بار منفی توسط این شانه روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می شود. در غلتک بالایی، تسمه لاستیکی باردار منفی، الکترون ها را از نوک های شانه فلزی دفع می کند و نیز بار منفی از تسمه به شانه و سپس از شانه به سطح خارجی کلاهک منتقل می شود. به این ترتیب، بار الکتریکی منفی روی سطح خارجی کلاهک انباشته می شود. با انتخاب جنس های دیگری برای غلتک که در سری الکتریسیته مالشی پایین تر از لاستیک قرار دارند (مانند تفلون) می توان بار الکتریکی مثبت روی کلاهک ایجاد کرد.

## ۱-۱۰ خازن

خازن وسیله ای الکتریکی است که می تواند بار و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند؛ مثلاً باتری های یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در خازن فلاش دوربین ذخیره می کنند (شکل ۱-۳۵). باتری ها معمولاً می توانند انرژی را فقط با آهنگ نسبتاً کمی به مدار بدهند که این آهنگ برای گسیل نور از فلاش دوربین بسیار کم است، اما وقتی خازن باردار می شود، می تواند انرژی را با آهنگ بسیار زیادی برای فلاش زدن آماده کند.



شکل ۱-۳۵ انرژی فلاش دوربین در یک خازن ذخیره شده است.

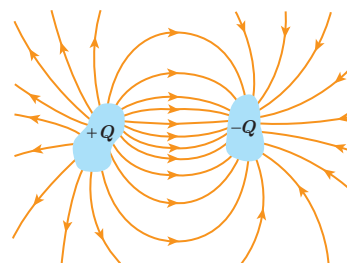
شکل ۱-۳۶ چند خازن را در اندازه ها و شکل های مختلف نشان می دهد. شکل ۱-۳۷ اجزای اصلی یک خازن معمولی را نشان می دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. این رساناها را صفحه های خازن می نامیم.



شکل ۱-۳۶ تصویری از چند خازن مختلف

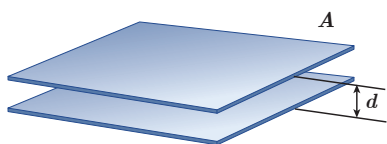
شکل ۱-۳۸ آرایش خازنی موسوم به خازن تخت<sup>۱</sup> را نشان می دهد که شامل دو صفحه رسانای موازی با مساحت  $A$  است که به فاصله  $d$  (که در برابر ابعاد صفحه ها ناچیز است) از هم قرار گرفته اند. گرچه نمادی که برای نشان دادن یک خازن به کار می بریم (+-) مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن ها با هر شکلی استفاده می شود. خازن ها به طور گسترده ای در مدارهای الکترونیکی وسایلی مانند رادیو، تلویزیون، رایانه، گوشی همراه و... به کار می روند؛ مثلاً شکل ۱-۳۹ مدار یک تقویت کننده (آمپلی فایر) را نشان می دهد که در آن چندین خازن به کار رفته است. برخی از این خازن ها با پیکان هایی مشخص شده اند.

باردار (شارژ) کردن خازن: روش ساده و مرسوم برای باردار کردن خازن قرار دادن آن در مدار الکتریکی ساده ای است که یک باتری دارد (شکل ۱-۴۰ الف). وقتی کلید  $K$  بسته (وصل) شود بار از طریق سیم های رسانا جریان می یابد. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحه خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانه باتری یکسان شود. وقتی یک خازن باردار می شود، صفحه های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی با علامت مخالف می شود:  $+Q$  و  $-Q$ . با این حال،



شکل ۱-۳۷ اجزای اصلی یک خازن باردار

۱- parallel - plate capacitor

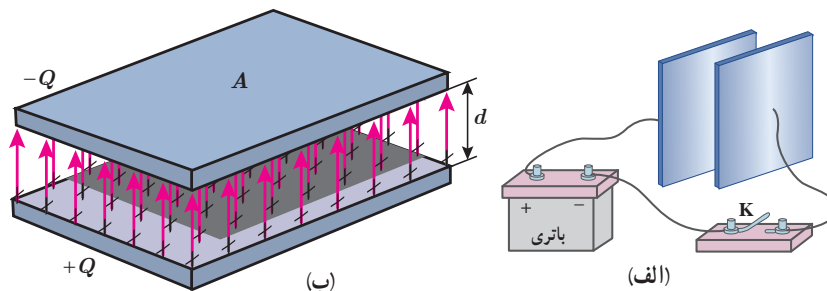


**شکل ۱-۳۸** یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت  $A$  ساخته شده است که به فاصله  $d$  از هم قرار گرفته اند.



**شکل ۱-۳۹** مدار یک تقویت کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن ها با پیکان مشخص شده اند.

بار یک خازن را به صورت  $Q$  نشان می دهند که همان بار صفحه مثبت است. بین دو صفحه خازن باردار یک میدان الکتریکی ایجاد می شود که خطوط این میدان از صفحه مثبت به منفی است (شکل ۱-۴۰ ب).



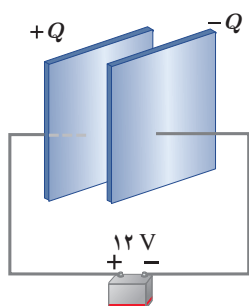
**شکل ۱-۴۰** الف) یک روش برای باردار کردن خازن، اتصال صفحه های آن به یک باتری است. ب) صفحه های این خازن بارهایی هم اندازه و با علامت مخالف پیدا می کنند. میدان الکتریکی از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است.

**ظرفیت خازن:** اگر اختلاف پتانسیل بین صفحه های خازن ( $\Delta V$ ) را زیاد کنیم، بار خازن ( $Q$ ) نیز به همان نسبت زیاد می شود. به عبارتی نسبت  $\frac{Q}{\Delta V}$  همواره مقداری ثابت است که به این نسبت ثابت، ظرفیت خازن می گویند و آن را با  $C$  نشان می دهند. ظرفیت خازن به اندازه بار خازن و نیز اختلاف پتانسیل دو صفحه آن بستگی ندارد. عبارت ظرفیت الکتریکی را نخستین بار ولتا در تشابه با ظرفیت گرمایی به کار برد. بنابه دلایل تاریخی، قدر مطلق اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  بین دو صفحه خازن را با  $V$  نمایش می دهند. بنابراین:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (۱۵-۱)$$

در رابطه ۱۵-۱ یکای بار الکتریکی، کولن ( $C$ )، یکای اختلاف پتانسیل، ولت ( $V$ ) و بنابراین یکای ظرفیت، کولن بر ولت ( $C/V$ ) می شود که به پاس خدمات مایکل فاراده، فاراد ( $F$ ) نامیده شده است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و عملاً ظرفیت اکثر خازن های متداول در محدوده پیکوفاراد ( $10^{-12} F$ ) تا میلی فاراد ( $10^{-3} F$ ) است. گرچه امروزه فناوری ساخت خازن ها، دستیابی به ظرفیت هایی بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

### مثال ۱-۱۵



صفحه های خازنی را مطابق شکل به پایه های یک باتری با اختلاف پتانسیل ۱۲V وصل می کنیم. اگر بار خازن  $24 \mu C$  شود،  
الف) ظرفیت خازن را محاسبه کنید.  
ب) اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل ۳۶V وصل کنیم، بار الکتریکی آن چقدر می شود؟

پاسخ:

(الف) با استفاده از رابطه ۱-۱۵ داریم:

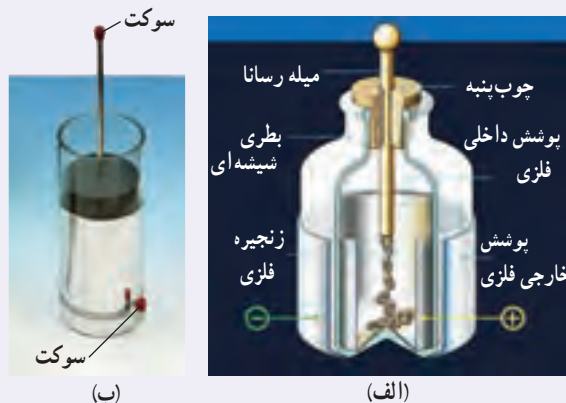
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{24 \times 10^{-6} \text{ C}}{12 \text{ V}} = 2 \times 10^{-6} \text{ F} = 2 \mu\text{F}$$

(ب) با توجه به اینکه ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است از ظرفیت به دست آمده در قسمت الف استفاده می‌کنیم. آنگاه با

استفاده از رابطه ۱-۱۵ می‌توان نوشت:

$$Q = CV = (2 \times 10^{-6} \text{ F})(36 \text{ V}) = 72 \times 10^{-6} \text{ C} = 72 \mu\text{C}$$

### خوب است بدانید: بطری لیدن<sup>۱</sup>



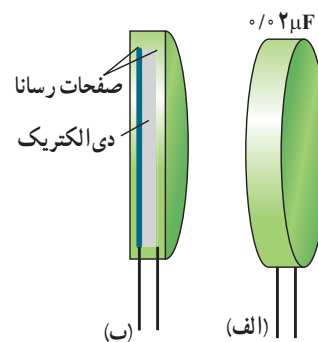
بطری لیدن، قدیمی‌ترین نوع خازن است که در میانه سده هجدهم در شهر لیدن که امروزه در هلند واقع شده است، ساخته شد. در یک نوع ابتدایی، این خازن از یک بطری شیشه‌ای ساخته شده است که سطح درونی و بیرونی آن با ورقه نازک قلع پوشیده شده است. ورقه درونی توسط سیم یا زنجیری فلزی به میله فلزی ثابت داخل بطری اتصال دارد (شکل الف). امروزه برای باردار کردن بطری لیدن، روی بدنه فلزی و سر میله فلزی سوکت (جای فیش)‌هایی نصب شده است (شکل ب) که از طریق

آنها، خازن توسط قطب‌های یک مولد ولتاژ یا مانند مولد وان دوگراف یا مولد ویم چرست<sup>۲</sup> باردار می‌شود. ظرفیت یک بطری لیدن با اندازه متوسط از مرتبه ۱ nF است. آزمایش با بطری لیدن خطرناک است و باید تحت نظارت مربی یا دبیر محترم انجام شود.

### ۱۱-۱ خازن با دی الکتریک

اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با ماده‌ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن دی الکتریک گفته می‌شود پُر کنیم (شکل ۱-۴۱) برای ظرفیت خازن چه پیش می‌آید؟ مایکل فاراده نخستین بار در سال ۱۸۳۷ میلادی، با استفاده از وسایل ساده‌ای دریافت که ظرفیت خازن با ضریبی موسوم به ثابت دی الکتریک ماده عایق (که آن را با  $\kappa$  نشان می‌دهند) افزایش می‌یابد؛ یعنی اگر ظرفیت خازن بدون دی الکتریک را با  $C_0$  نمایش دهیم آن‌گاه ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر است با

$$C = \kappa C_0 \quad (1-16)$$



شکل ۱-۴۱ (الف) بیرون و (ب) درون یک خازن که بین صفحه‌های فلزی آن لایه عایقی قرار گرفته است.

جدول ۱-۴ ثابت دی الکتریک چند ماده عایق را نشان می‌دهد.

فرض کنید خازنی را نخست توسط یک باتری باردار و سپس از باتری جدا کرده‌ایم. اکنون فضای داخل این خازن را با یک دی الکتریک پر می‌کنیم. توجه کنید که دی الکتریک‌ها بر دو نوع اند: قطبی و غیرقطبی. وقتی یک دی الکتریک قطبی (مانند آب،  $\text{NH}_3$ ،  $\text{HCl}$ ) در میدان الکتریکی بین دو صفحه

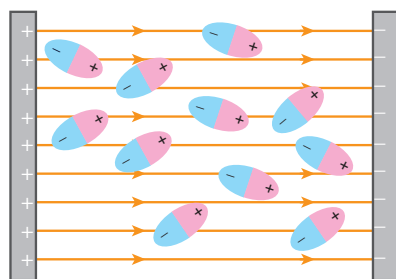
<sup>۱</sup> – Leyden jar

<sup>۲</sup> – Wimshurst Machine

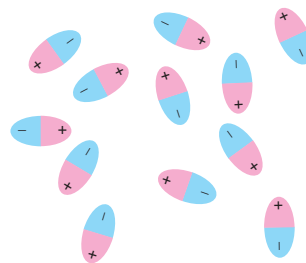
<sup>۳</sup> – از حروف الفبای یونانی که کاپا خوانده می‌شود.

جدول ۱-۴ ثابت دی الکتریک برخی عایق‌ها در دمای $20^{\circ}\text{C}$	
ماده دی الکتریک	ثابت دی الکتریک
هوای ۱ atm	۱/۰۰۰۶
تفلون	۲/۱
پارافین	۲/۲
پلی استیرن	۲/۶
میلار	۳/۱
پی وی سی	۳/۴
کاغذ	۳/۵
کوارتز	۴/۳
شیشه پیرکس	۵
میکا	۷
آب خالص	۸۰
تیتانید استرانسیوم	۳۱۰

خازن قرار می‌گیرد، سر منفی مولکول‌های دوقطبی به طرف صفحه مثبت و سر مثبت آنها به طرف صفحه منفی کشیده می‌شود و در نتیجه این مولکول‌های دوقطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی بین دو صفحه خازن هم ردیف کنند (شکل ۱-۴۲).



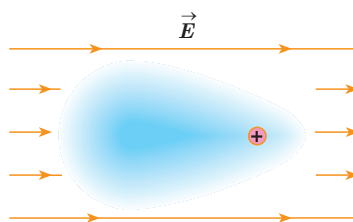
(ب) در حضور میدان الکتریکی، مولکول‌های قطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی خارجی هم ردیف کنند.



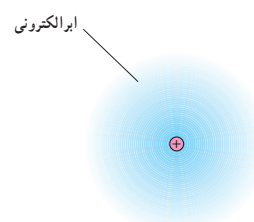
(الف) در نبود میدان الکتریکی، سمت‌گیری مولکول‌های دوقطبی نامنظم است.

شکل ۱-۴۲

وقتی یک دی الکتریک غیرقطبی (مانند متان، بنزن و...) در میدان بین دو صفحه خازن قرار می‌گیرد بر اثر القا قطبیده می‌شود؛ یعنی میدان الکتریکی اعمال شده باعث می‌شود که ابر الکترونی مولکول‌های دی الکتریک در خلاف جهت میدان جابه‌جا شود (شکل ۱-۴۳) و به این ترتیب، مرکز بارهای مثبت و منفی مولکول‌ها از هم جدا شده و اصطلاحاً مولکول‌ها **قطبیده** شوند.



(ب) در حضور میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند و ابر الکترونی در خلاف جهت میدان جابه‌جا می‌شود.



(الف) در نبود میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی برهم منطبق‌اند.

شکل ۱-۴۳

می‌توان نشان داد این رفتار مولکول‌های دی الکتریک (قطبی یا غیرقطبی) در میدان الکتریکی بین صفحه‌های خازن، سبب افزایش ظرفیت خازن می‌شود.

به عنوان مثالی از کاربرد دی الکتریک، خازن تختی را در نظر بگیرید. آزمایش و محاسبه نشان می‌دهد که ظرفیت یک خازن تخت با مساحت صفحه‌های  $A$  و فاصله جدایی صفحه‌های  $d$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (۱۷-۱)$$

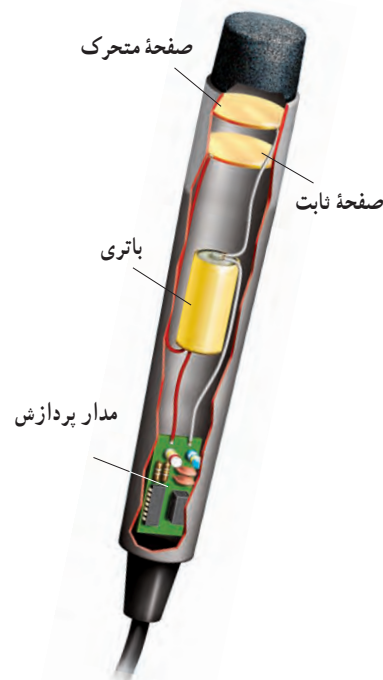
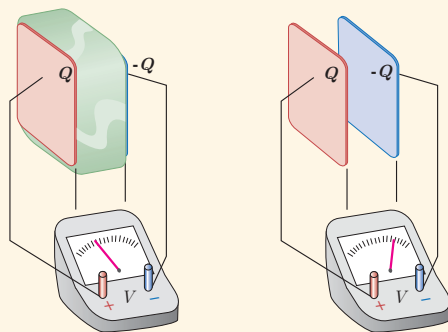
که در آن  $\epsilon_0$  همان ضریب گذردهی الکتریکی خلأ ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ) است. مثالی کاربردی از این رابطه، میکروفون خازنی است که بر اثر تغییر ظرفیت یک خازن تخت سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کند (شکل ۱-۴۴).

حال اگر فضای بین صفحه‌های این خازن را با یک دی‌الکتریک با ثابت دی‌الکتریک  $K$  کاملاً پر کنیم، طبق رابطه ۱-۱۶ برای ظرفیت خازن جدید داریم:

$$C = K \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1-18)$$

### پرسش ۱-۶

در شکل زیر صفحه‌های باردار یک خازن تخت را که بین آنها هواست، به ولت‌سنج وصل می‌کنیم. با وارد کردن دی‌الکتریک در بین صفحه‌ها، اختلاف پتانسیل دو صفحه کاهش می‌یابد. علت آن را توضیح دهید. (توجه کنید که این آزمایش با بیشتر ولت‌سنج‌های معمولی و رایج ممکن نیست.)

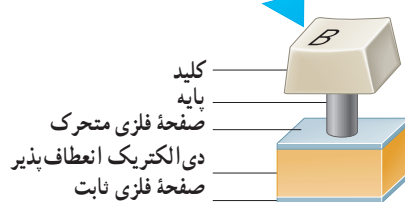


شکل ۱-۴۴ در یک میکروفون خازنی، با ارتعاش صفحه متحرک (دیافراگم) خازن بر اثر صدا، فاصله صفحه‌های خازن تغییر می‌کند بنابراین ظرفیت خازن تخت تغییر می‌کند که به ایجاد یک سیگنال الکتریکی می‌انجامد.

### مثال ۱-۱۶



(الف)



(ب)

برخی از صفحه کلیدهای رایانه (شکل الف) بر مبنای تغییر ظرفیت خازن عمل می‌کنند. هر کلید این صفحه به یک سر پایه‌ای نصب شده است که سر دیگر آن به یک صفحه فلزی متحرک متصل است. این صفحه فلزی خود توسط یک دی‌الکتریک انعطاف پذیر از صفحه فلزی ثابتی جدا شده است و در واقع این دو صفحه یک خازن تخت را تشکیل می‌دهند (شکل ب). با فشار دادن کلید، صفحه متحرک به صفحه ثابت نزدیک می‌شود و ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. این تغییر ظرفیت به صورت سیگنالی الکتریکی توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود و بدین ترتیب، مشخص می‌شود که کدام کلید فشار داده شده است.

فاصله بین صفحه‌ها عموماً  $5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$  است که این فاصله با فشار دادن کلید به  $1.50 \times 10^{-3} \text{ m}$  می‌رسد. مساحت صفحه‌ها  $9.50 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  است و خازن از ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک  $3.50$  پر شده است. تغییر ظرفیتی که با فشار دادن کلید، توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود چقدر است؟

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۱۸-۱ ظرفیت خازن پیش از فشار دادن کلید برابر است با

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} = 3/50 (8/85 \times 10^{-12} \text{ F/m}) \frac{(9/50 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}{(5/00 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

$$= 0/589 \times 10^{-12} \text{ F} = 0/589 \text{ pF}$$

پس از فشردن کلید، فاصله بین صفحه‌ها به  $10^{-3} \text{ m} \times 1/50$  می‌رسد و با محاسبه‌ای مشابه به  $C = 19/6 \times 10^{-12} \text{ F} = 19/6 \text{ pF}$  می‌رسیم. بنابراین، تغییر ظرفیت خازن که به صورت سیگنالی آشکار می‌شود از تفاضل دو مقدار بالا به دست می‌آید:

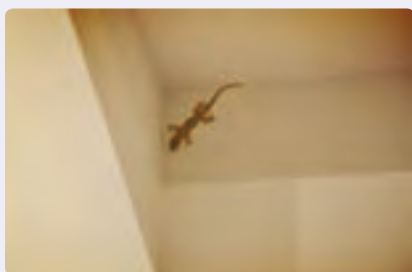
$$\Delta C = 19/6 \text{ pF} - 0/589 \text{ pF} = 19/0 \text{ pF}$$

### فعالیت ۱-۱۰



در حسگر کیسه هوای برخی از خودروها از یک خازن استفاده می‌شود. درباره چگونگی عملکرد این حسگرها تحقیق کنید و نتیجه آن را به کلاس گزارش دهید.

### خوب است بدانید: نیروی وان دروالس و چسبیدن مارمولک‌ها به دیوار



نیروی وان دروالس برای توصیف نیروی جاذبه الکتریکی بین مولکول‌ها استفاده می‌شود. دلیل این نام‌گذاری این است که وان دروالس در سال ۱۸۷۳ نخستین پیشنهاد را برای نیروهای الکتریکی بین ذره‌های سازنده گاز به منظور توصیف برخی از ویژگی‌های گازهای غیرآرمانی و مایعات ارائه کرد. منشأ نیروی وان دروالس برهم‌کنش الکتریکی بین دوقطبی‌های الکتریکی است. براساس نیروی وان دروالس می‌توان بسیاری از چسبندگی‌ها از جمله چسبندگی پای مارمولک روی دیوار را توضیح داد.

پای مارمولک تعداد بی‌شماری مو موسوم به ستا دارد که هر مو صدها برجستگی یا سرمثلی دارد که به کاردک معروف‌اند. وقتی مارمولک یک مو را بر دیوار می‌فشارد تمام این کاردک‌ها توسط نیروی وان دروالس به دیوار می‌چسبند. این نیرو ناشی از برهم‌کنش الکتریکی دوقطبی‌های موجود در کاردک‌ها و دوقطبی‌هایی است که این کاردک‌ها بر سطح دیوار القا می‌کنند. وقتی مارمولک پای خود را بر دیوار قرار می‌دهد دوقطبی‌های موجود در دو سطح، یکدیگر را جذب می‌کنند. گرچه نیروی وان دروالس ضعیف است، اما مجموع این نیروهای بی‌شمار می‌تواند مارمولک را بر سطح دیوار نگه دارد.

**فروریزش الکتریکی:** اثر دیگر حضور دی الکتریک‌ها در خازن، افزایش حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن است. اگر اختلاف پتانسیل دو صفحه یک خازن را به اندازه کافی زیاد کنیم، تعدادی از الکترون‌های اتم‌های ماده دی الکتریک، توسط میدان الکتریکی ایجاد شده بین دو صفحه، کنده می‌شوند و مسیرهایی رسانا درون دی الکتریک<sup>۱</sup> ایجاد می‌شود (شکل ۴۵-۱) که سبب تخلیه خازن می‌گردد. به این پدیده **فروریزش الکتریکی**<sup>۲</sup> ماده دی الکتریک می‌گویند. فروریزش الکتریکی در عایق بین دو صفحه خازن‌ها معمولاً، با ایجاد یک جرقه همراه است و در بیشتر مواقع خازن را می‌سوزاند. خازن‌ها معمولاً با مقدار ظرفیت آنها و اختلاف پتانسیل پیشینه‌ای که می‌توانند تحمل کنند مشخص می‌شوند (شکل ۴۶-۱).

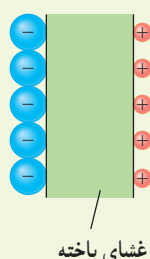


**شکل ۴۵-۱** نقش‌های لیچنبرگ. فروریزش الکتریکی باعث تشکیل مسیرهای رسانشی سرخس شکلی در دی الکتریک شده است.



**شکل ۴۶-۱** تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل پیشینه قابل تحمل نوشته شده است.

## تمرین ۱۲-۱



یک یاخته عصبی (نورون) را می‌توان با یک خازن تخت مدل‌سازی کرد، به طوری که غشای سلول به عنوان دی الکتریک و یون‌های باردار با علامت مخالف که در دو طرف غشا هستند به عنوان بارهای روی صفحه‌های خازن عمل کنند (شکل روبه‌رو). ظرفیت یک سلول عصبی و تعداد یون‌های لازم (بافرض آنکه هر یون یک بار یونیده باشد)، برای آنکه یک اختلاف پتانسیل  $85\text{mV}$  ایجاد شود چقدر است؟ فرض کنید غشا دارای ثابت دی الکتریک  $\epsilon_r = 3$ ، ضخامت  $10\text{nm}$  و مساحت سطح  $10^{-10}\text{m}^2$  است.

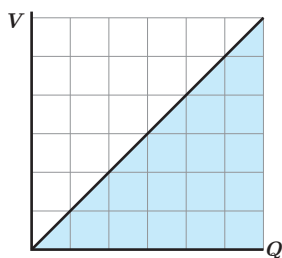
## فعالیت ۱۱-۱

خازن‌ها انواع متعددی دارند؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند. درباره خازن‌های مختلف مانند خازن‌های ورقه‌ای، میکا، سرامیکی، الکتrolیتی، خازن‌های متغیر، ابرخازن‌ها و ظرفیت آنها تحقیق کنید. هر گروه می‌تواند روی یک نوع خازن تحقیق کند.

## ۱۲-۱ انرژی خازن

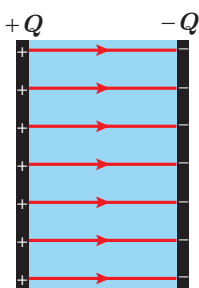
وقتی صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شوند در خازن انرژی ذخیره می‌شود. برای اینکه انرژی ذخیره شده در خازن را مشاهده کنیم، کافی است دو سر یک خازن پر شده را به دو سر یک لامپ کوچک وصل کنیم. به شرط آنکه ظرفیت و اختلاف پتانسیل خازن به اندازه کافی زیاد باشد، لامپ برای مدتی روشن و سپس خاموش می‌شود. در هنگام شارژ شدن خازن توسط باتری، دائماً باری جزئی از یک صفحه خازن جدا و به همان اندازه به صفحه دیگر منتقل می‌شود. در این فرایند، طبق رابطه ۱۳-۱

۱- موسوم به نقش‌های لیچنبرگ (Lichtenberg)



شکل ۱۴۷-۱ نمودار ولتاژ برحسب بار برای خازنی که توسط یک باتری باردار می شود.

$(W_{\text{خارجی}} = Q \Delta V)$ ، باتری روی این بار کار انجام می دهد. هنگام انتقال بار، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن نیز به آهستگی افزایش می یابد. بنابراین، برای انتقال بارهای بعدی به کار بیشتری نیاز است. بنا به رابطه ۱۵-۱  $(V = Q/C)$  و با توجه به اینکه در این فرایند ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن تابعی خطی از بار ذخیره شده در آن می شود که به طور یکنواخت از صفر تا  $V$  افزایش می یابد (شکل ۱-۴۷). بنابراین، در هنگام باردار شدن خازن می توان اختلاف پتانسیل متوسطی را به صورت  $\bar{V} = \frac{V+0}{2} = \frac{V}{2}$  برای دو صفحه خازن در نظر گرفت. آنگاه با استفاده از رابطه ۱-۱۴ کار انجام شده برای باردار شدن کامل خازن برابر با حاصل ضرب کل بارهای جزئی منتقل شده ( $Q$ ) در اختلاف پتانسیل متوسط است:



$$W = Q\bar{V} = Q\left(\frac{V}{2}\right) = \frac{1}{2}QV$$

این کار به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی فضای بین صفحه های خازن ذخیره می شود (شکل ۱-۴۸):

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} \quad (1-19)$$

شکل ۱-۴۸ انرژی در میدان الکتریکی بین صفحات خازن ذخیره می شود.

که در آن انرژی پتانسیل الکتریکی خازن ( $U_{\text{خازن}}$ ) برحسب ژول ( $J$ )، بار خازن ( $Q$ ) برحسب کولن ( $C$ )، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن ( $V$ ) برحسب ولت ( $V$ ) و ظرفیت خازن ( $C$ ) برحسب فاراد ( $F$ ) است.

## مثال ۱-۱۸



مدار یک فلاش عکاسی، انرژی را با ولتاژ  $330V$ ، در یک خازن  $66\mu F$ ، ذخیره می کند. الف) چه مقدار انرژی الکتریکی در این خازن ذخیره می شود؟ ب) اگر تقریباً همه این انرژی در مدت  $1/10 ms$  آزاد شود، توان متوسط خروجی فلاش چقدر است؟  
پاسخ: با توجه به رابطه ۱-۱۹ داریم

$$U = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}(66 \times 10^{-6}F)(330V)^2 = 35.9J$$

با توجه به تعریف توان داریم:

$$P = \frac{U}{t} = \frac{35.9J}{1/10 \times 10^{-3}s} = 3.59 \times 10^4 J/s = 35.9kW$$

که این در تأیید گفته ای است که در ابتدای بخش ۱-۱۰ در مورد خازن بیان کردیم و گفتیم یک خازن باردار می تواند انرژی را با آهنگ بسیار بیشتری از یک باتری برای فلاش دوربین مهیا کند.

### مثال ۱-۱۹: دستگاه رفع لرزش نامنظم قلب (دیفیبریلاتور)



توانایی خازن برای ذخیره انرژی پتانسیل الکتریکی، اساس کار دستگاه‌های رفع لرزشی است که برای توقف لرزش بطنی افراد دچار حمله قلبی به کار می‌رود. در این بیماری، انقباض انقباض ناهماهنگ قلب باعث می‌شود خون به درستی به مغز فرستاده نشود. در این دستگاه یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود  $6\text{ kV}$  باردار می‌کند. صفحه‌های رابط (کفشک‌ها) روی قفسه سینه بیمار قرار داده می‌شوند و خازن بخشی از انرژی ذخیره شده خود را از طریق کفشک‌ها به بدن بیمار منتقل می‌کند. هدف از این کار این است که قلب به طور موقت از کار بیفتد و پس از آن با آهنگ منظم و طبیعی خود به کار افتد.

اگر ظرفیت خازن این دستگاه  $11\text{ }\mu\text{F}$  باشد و با ولتاژ  $6\text{ kV}$  شارژ شود و سپس تمام انرژی آن از طریق کفشک‌ها به درون بدن بیمار تخلیه شود،

الف) چقدر انرژی در بدن بیمار تخلیه شده است؟ ب) چه مقدار بار الکتریکی از بدن بیمار عبور کرده است؟ پ) اگر تخلیه انرژی تقریباً در مدت  $2\text{ ms}$  صورت پذیرفته باشد این انرژی با چه توان متوسطی در بدن بیمار تخلیه شده است؟

**پاسخ:** الف) انرژی ذخیره شده در خازن با استفاده از رابطه ۱-۱۹ به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (11 \times 10^{-6} \text{ F}) (6 \times 10^3 \text{ V})^2 = 198 \text{ J}$$

که با توجه به فرض مسئله این همان انرژی تخلیه شده در بدن بیمار است.

ب) بار اولیه روی صفحات خازن برابر است با

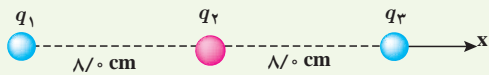
$$Q = CV \Rightarrow Q = (11 \times 10^{-6} \text{ F}) (6 \times 10^3 \text{ V}) = 66 \times 10^{-3} \text{ C}$$

با توجه به فرض مسئله، این همان باری است که از بدن بیمار عبور کرده است.

پ) توان متوسط انرژی تخلیه شده در بدن بیمار برابر است با

$$P = \frac{U}{t} = \frac{198 \text{ J}}{2 \times 10^{-3} \text{ s}} = 99 \text{ kW}$$

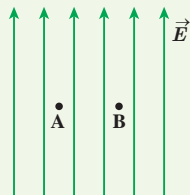
۶ بارهای الکتریکی نقطه‌ای  $q_1 = -4 \text{ nC}$ ،  $q_2 = +5 \text{ nC}$  و  $q_3 = -4 \text{ nC}$  مطابق شکل، در جای خود ثابت شده‌اند. نیروی خالص الکتریکی وارد بر هر یک از بارهای  $q_1$  و  $q_2$  را محاسبه کنید.



۷ در شکل روبه‌رو، دو گوی مشابه به جرم  $2/5 \text{ g}$  و بار یکسان مثبت  $q$  در فاصله  $1 \text{ cm}$  از هم قرار دارند، به طوری که گوی بالایی به حالت معلق مانده است. الف) اندازه بار  $q$  را به دست آورید. ب) تعداد الکترون‌های کنده‌شده از هر گوی چقدر است؟

۱-۴، ۱-۵ و ۱-۶ میدان الکتریکی، میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار و خطوط میدان الکتریکی

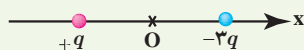
۸ یک ذره باردار را یک بار در نقطه  $A$  و بار دیگر در نقطه  $B$  قرار می‌دهیم. نیرویی که از طرف میدان الکتریکی بر این ذره باردار در این دو نقطه وارد می‌شود را مقایسه کنید.



۹ هسته آهن شعاعی در حدود  $10^{-15} \text{ m}$  دارد و تعداد پروتون‌های آن ۲۶ عدد است. الف) بزرگی نیروی دافعه بین دو پروتون این هسته که به فاصله  $10^{-15} \text{ m}$  از هم قرار دارند چقدر است؟ ب) اندازه میدان الکتریکی ناشی از هسته در فاصله  $10^{-10} \text{ m}$  از مرکز هسته چقدر است؟

۱۰ شکل زیر، دو ذره باردار را نشان می‌دهد که در جای خود روی محور  $x$  ثابت شده‌اند. بارها در فاصله یکسان  $a$  از مبدأ مختصات (نقطه  $O$ ) قرار دارند.

الف) در کجای این محور (غیر از بی‌نهایت) نقطه‌ای وجود دارد که در آنجا میدان الکتریکی برآیند برابر با صفر است؟ ب) بزرگی و جهت میدان الکتریکی برآیند در مبدأ مختصات را بیابید.



۱-۱ و ۲-۱ بار الکتریکی، پایداری و کوانتیده بودن بار

۱ چگونه توسط یک الکتروسکوپ می‌توانیم تشخیص دهیم که: الف) یک میله باردار است یا نه؟ ب) میله رساناست یا عایق؟ پ) نوع بار میله باردار چیست؟



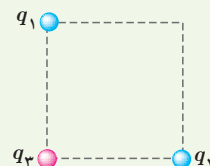
۲ یک میله پلاستیکی را با پارچه پشمی مالش می‌دهیم. پس از مالش، بار الکتریکی میله پلاستیکی  $12/8 \text{ nC}$  می‌شود. الف) بار الکتریکی ایجاد شده در پارچه پشمی چقدر است؟ ب) تعداد الکترون‌های منتقل شده از پارچه پشمی به میله پلاستیکی را محاسبه کنید.

۳ الف) بار الکتریکی اتم و هسته اتم کربن ( $^{12}_6\text{C}$ ) چند کولن است؟ ب) بار الکتریکی اتم کربن یک بار یونیده ( $\text{C}^+$ ) چقدر است؟

۱-۳ قانون کولن

۴ دو گوی رسانا، کوچک و یکسان به بارهای  $q_1 = 4 \text{ nC}$  و  $q_2 = -6 \text{ nC}$  را با هم تماس می‌دهیم و سپس تا فاصله  $r = 3 \text{ cm}$  از هم دور می‌کنیم. نیروی برهم کنش الکتریکی بین دو گوی را محاسبه کنید. این نیرو رانشی است یا ربایشی؟

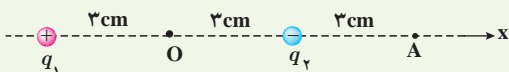
۵ سه ذره باردار  $q_1$ ،  $q_2$  و  $q_3$  مطابق شکل در سه رأس مربعی به ضلع  $3 \text{ m}$  ثابت شده‌اند. اگر  $q_1 = q_2 = -5 \mu\text{C}$  و  $q_3 = +2 \mu\text{C}$  باشد، نیروی خالص الکتریکی وارد بر بار  $q_3$  را برحسب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  تعیین کنید.



۱۵ دو بار الکتریکی نقطه‌ای غیرهمنام  $q_1 = +1 \text{ nC}$  و  $q_2 = -1 \text{ nC}$  مطابق شکل زیر به فاصله  $6 \text{ cm}$  از یکدیگر قرار دارند.

الف) جهت و اندازه میدان الکتریکی را در نقطه‌های O و A به دست آورید.

ب) آیا بر روی محور، نقطه‌ای وجود دارد که میدان خالص در آن صفر شود؟

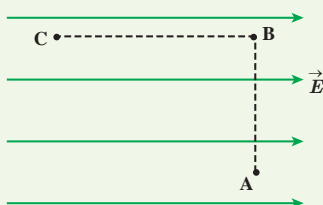


### ۷-۱ و ۸-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی و پتانسیل الکتریکی

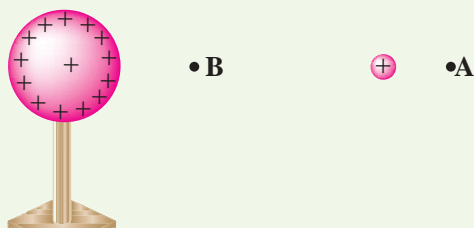
۱۶ مطابق شکل زیر، بار  $q = +5 \text{ nC}$  را در میدان الکتریکی یکنواخت  $8 \times 10^5 \text{ N/C}$  نخست از نقطه A تا نقطه B و سپس تا نقطه C جابه‌جا می‌کنیم. اگر  $AB = 0.2 \text{ m}$  و  $BC = 0.4 \text{ m}$  باشد، مطلوب است:

الف) نیروی الکتریکی وارد بر بار  $q$ ،

ب) کاری که نیروی الکتریکی در این جابه‌جایی انجام می‌دهد،  
پ) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$  در این جابه‌جایی.

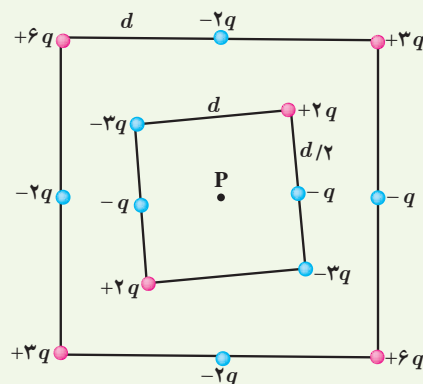


۱۷ در شکل زیر ذره باردار مثبت و کوچکی را از حالت سکون، از نقطه A به سمت کره باردار که روی پایه عایقی قرار دارد، نزدیک می‌کنیم و در نقطه B قرار می‌دهیم. (الف) در این جابه‌جایی، کار نیروی الکتریکی مثبت است یا منفی؟ (ب) کاری که ما در این جابه‌جایی انجام می‌دهیم مثبت است یا منفی؟ (پ) انرژی پتانسیل ذره باردار در این جابه‌جایی چگونه تغییر می‌کند؟ (ت) پتانسیل نقطه‌های A و B را با هم مقایسه کنید.

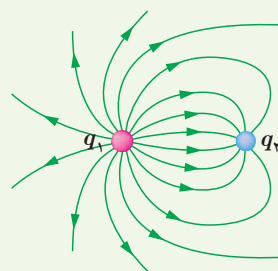


۱۱ در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی  $5 \times 10^5 \text{ N/C}$  که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره بارداری به جرم  $2 \text{ g}$  معلّق و به حال سکون قرار دارد. اگر  $g = 10 \text{ N/kg}$  باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.

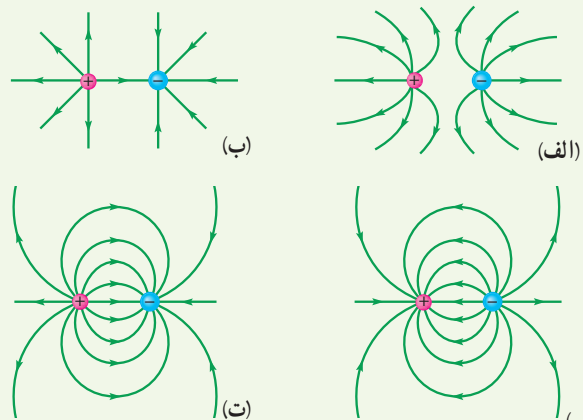
۱۲ شکل زیر دو آرایه مربعی از ذرات باردار را نشان می‌دهد. مربع‌ها که در نقطه P هم مرکزند، همدیف نیستند. ذره‌ها روی محیط مربع به فاصله  $d$  یا  $d/2$  از هم قرار گرفته‌اند. بزرگی و جهت میدان الکتریکی برآیند در نقطه P چیست؟



۱۳ خطوط میدان الکتریکی برای دو کره رسانای باردار کوچک در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. نوع بار هر کره را تعیین کرده و اندازه آنها را مقایسه کنید.



۱۴ در شکل‌های زیر، اندازه دو بار، یکسان ولی علامت آنها مخالف هم است. کدام آرایش‌های خطوط میدان نادرست است؟ دلیل آن را توضیح دهید.



**۲۲** یک صفحه پلاستیکی باردار (تلق یا ورق باردار) را به براده‌های ریز آلومینیومی بدون بار نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود که براده‌ها به طرف صفحه پلاستیکی، جذب می‌شوند. علت این پدیده را توضیح دهید.

**۲۳** وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای اطراف زمین باردار می‌شود. این بارها ممکن است موجب آسیب‌رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شود. فرض کنید ماهواره‌ای در اثر عبور از یکی از لایه‌های جو دارای بار الکتریکی  $q = 2/0 \times 10^{-9} \text{ C}$  شود. این ماهواره، مکعبی به ضلع  $40 \text{ cm}$  است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود).



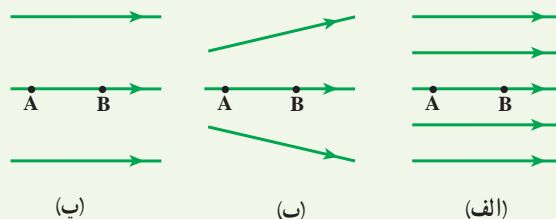
### ۱۰-۱ خازن

**۲۴** اگر ساختمان یک خازن را تغییر ندهیم، در هریک از شرایط زیر ظرفیت خازن چگونه تغییر می‌کند؟  
(الف) بار آن دو برابر شود.

(ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌های آن سه برابر شود.

**۲۵** اختلاف پتانسیل بین دو صفحه یک خازن را از ۲۸ ولت به ۴۰ ولت افزایش می‌دهیم. اگر با این کار ۱۵ میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

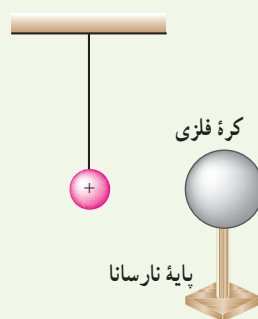
**۱۸** شکل زیر سه آرایش خطوط میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. در هر آرایش، یک پروتون از حالت سکون در نقطه A رها می‌شود و سپس توسط میدان الکتریکی تا نقطه B شتاب می‌گیرد. نقطه‌های A و B در هر سه آرایش در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. در کدام شکل سرعت پروتون در نقطه B بیشتر است؟ توضیح دهید.



**۱۹** دو صفحه رسانا با فاصله  $2/00 \text{ cm}$  را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را به اختلاف پتانسیل  $100 \text{ V}$  وصل می‌کنیم. در نتیجه، یکی از صفحه‌ها به طور منفی و دیگری به طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی به وجود می‌آید. اندازه این میدان الکتریکی را حساب کنید و با توجه به جهت خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه توضیح دهید که کدام یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیشتری دارند.

**۲۰** بار الکتریکی  $q = -40 \text{ nC}$  از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی  $V_1 = -40 \text{ V}$  تا نقطه‌ای با پتانسیل  $V_2 = -10 \text{ V}$  آزادانه جابه‌جا می‌شود. (الف) انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$  چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟ (ب) با توجه به قانون پایستگی انرژی، در مورد چگونگی تبدیل انرژی بار  $q$  در این جابه‌جایی توضیح دهید.

### ۹-۱ میدان الکتریکی در داخل رساناها



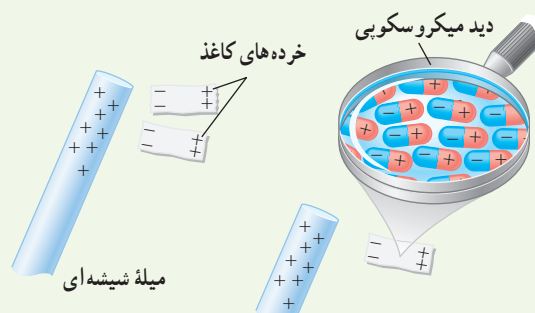
**۲۱** یک کره فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه نارسانایی قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می‌کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می‌افتد.

## ۱۱-۱ خازن با دی الکتریک

۲۶ بادکنک باردار شکل زیر را به آب نزدیک کرده‌ایم. توضیح دهید چرا آب به جای اینکه به طور قائم فرو ریزد، خمیده می‌شود؟



۲۷ با توجه به شکل زیر توضیح دهید چرا یک میله باردار، خرده‌های کاغذ را می‌رباید؟



۲۸ ظرفیت یک خازن تخت با فاصله صفحات  $1/0\text{ mm}$  که بین صفحه‌های آن هوا قرار دارد، برابر  $1/0\text{ F}$  است. مساحت صفحه‌های این خازن چقدر است؟ از این مسئله چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

۲۹ یک خازن تخت به یک باتری بسته شده است تا باردار شود. پس از مدتی، درحالی که باتری همچنان به خازن متصل است، فاصله بین صفحه‌های خازن را دو برابر می‌کنیم. کدام یک از موارد زیر درست است؟

(الف) میدان الکتریکی میان صفحه‌ها نصف می‌شود.

(ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌ها نصف می‌شود.

(پ) ظرفیت خازن دو برابر می‌شود.

(ت) بار روی صفحه‌ها تغییر نمی‌کند.

۳۰ مساحت هریک از صفحه‌های خازن تختی،  $1/00\text{ m}^2$  و فاصله دو صفحه از هم،  $500\text{ mm}$  است. عایقی با ثابت دی الکتریک  $4/9$  بین دو صفحه قرار داده شده است. ظرفیت خازن را تعیین کنید.

## ۱۲-۱ انرژی خازن

۳۱ دو صفحه خازن تخت بارداری را به هم وصل می‌کنیم. در نتیجه جرقه‌ای زده می‌شود. حال اگر دوباره صفحات را به همان اندازه باردار کنیم ولی فاصله آنها را دو برابر کنیم و سپس دو صفحه را به هم وصل کنیم، آیا جرقه حاصل بزرگ‌تر از قبل می‌شود، یا کوچک‌تر و یا تغییری نمی‌کند؟ توضیح دهید.

۳۲ ظرفیت خازنی ۱۲ میکروفاراد و بار الکتریکی آن  $q$  است. اگر  $3/0\text{ mC}$  بار الکتریکی را از صفحه منفی جدا کرده و به صفحه مثبت منتقل کنیم، انرژی ذخیره شده در خازن به اندازه  $8/0\text{ J}$  زیاد می‌شود.  $q$  را محاسبه کنید.