

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 کهربا با پارچه پشمی مالش داده شود و سپس به خرده‌های کاه نزدیک گردد، آن خرده‌ها به سوی کهربا کشیده می‌شوند. امروز می‌دانیم این کشش ناشی از یک نیروی الکتریکی است. در واقع واژه الکتریسیته از واژه یونانی **الکترون** گرفته شده است که به معنای کهرباست.



شکل ۱-۱ توصیف آذرخش مبتنی بر اصول الکتریسیته ساکن است.

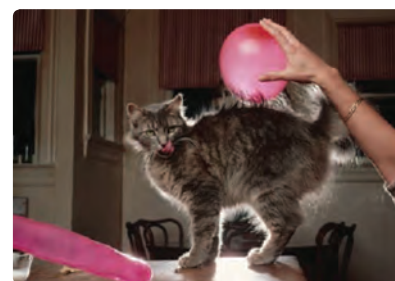
وقتی لباس‌های بافتنی را از تن خارج می‌کنیم، یا پس از اینکه چند قدم بر روی فرش راه می‌رویم، دستگیره فلزی در را با دست بگیریم، عملاً وجود الکتریسیته را به صورت یک شوک الکتریکی حس می‌کنیم. در این فصل، به مطالعه بارهای ساکن می‌پردازیم که به آن **الکتریسیته ساکن** (الکتروستاتیک) می‌گویند و ضمن یادآوری مطالب الکتریسیته 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.



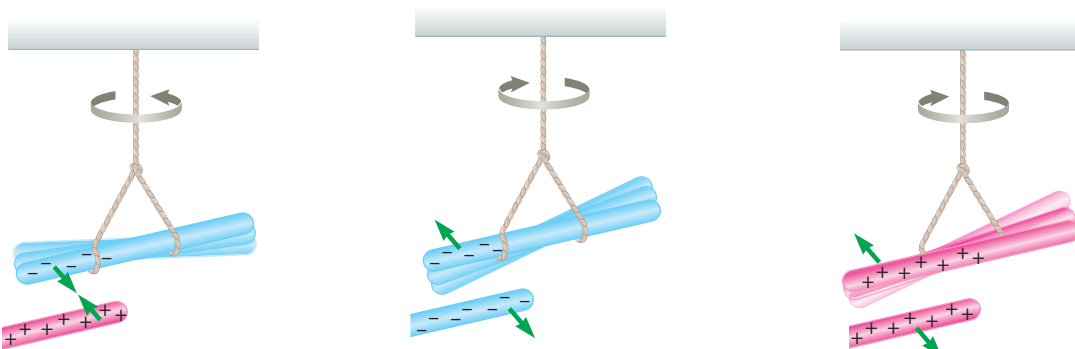
شکل ۱-۲ انتقال پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب به صورت الکتریکی صورت می‌گیرد.

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.

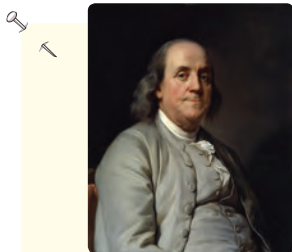


پ) وقتی میله پلاستیکی مالش داده شده با پارچه پشمی را به میله شیشه‌ای مالش داده شده با پارچه ابریشمی نزدیک کنیم، همدیگر را جذب می‌کنند.

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



بنیامین فرانکلین (۱۷۹۰ - ۱۷۰۶م)

بنیامین فرانکلین دانشمند، نویسنده و سیاستمدار آمریکایی، در شهر بوستون به دنیا آمد و در شهر فیلادلفیا دیده از جهان فرویست. فرانکلین در حدود سال ۱۷۴۴ میلادی با مبحث الکتروسیسته 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 الکتروسیسته» است که بسیاری آن را با کتاب «اصول ریاضیات» اسحاق نیوتون مقایسه کرده‌اند. فرانکلین در این کتاب شالوده و بنیاد اصول علم الکتروسیسته را بر مبنای تجربیات و مشاهدات علمی خود تشریح کرده است. در واقع تجربیات متعدد و مهم فرانکلین آغازگر دوره‌ای جدید در مبحث الکتروسیسته بوده است و بسیاری از واژگانی که ما امروزه در الکتروسیسته 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 مختلف 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 داده ایم.



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 (μC) 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

$$e = 1/602117653 \times 10^{-19} \text{C} \approx 1/60 \times 10^{-19} \text{C}$$

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

در هنگام مالش، با انتقال تعدادی الکترون از یک جسم به جسمی دیگر، تعادل بارها در اتم خنثی بر هم می‌خورد و جسمی که الکترون از دست می‌دهد، تعداد الکترون‌هایش کمتر از تعداد پروتون‌های آن می‌شود و بار الکتریکی خالص آن مثبت می‌گردد و همچنین، جسمی که الکترون اضافی دریافت می‌کند، الکترون‌هایش از پروتون‌های آن فزونی می‌یابد و بار الکتریکی خالص آن منفی می‌شود. به دست آوردن یا از دست دادن الکترون دو جسم در تماس با یکدیگر را می‌توان براساس جدولی موسوم به **سری الکتریسیته مالشی** (تریبو الکتریک؛ Tribo در زبان یونانی به معنای مالش است) معلوم کرد (جدول ۱-۱). در این جدول مواد پایین‌تر، الکترون‌خواهی بیشتری دارند؛ یعنی اگر دو ماده در این جدول در تماس با یکدیگر قرار گیرند، الکترون‌ها از ماده بالاتر جدول به ماده‌ای که پایین‌تر قرار دارد منتقل می‌شوند؛ مثلاً اگر تفلون با نایلون مالش یابد، الکترون‌ها از نایلون به تفلون منتقل می‌شوند. در مورد بارهای الکتریکی دو اصل وجود دارد. نخستین آنها **اصل پایستگی بار** است که بیان می‌دارد: مجموع جبری همه بارهای الکتریکی در یک دستگاه منزوی^۲ ثابت است؛ یعنی بار می‌تواند 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 تجربه‌هایی مانند مالش اجسام به یکدیگر اگر جسم خنثی الکترون به دست آورد یا از دست بدهد، همواره بار الکتریکی مشاهده‌شده جسم، مضرب درستی از بار بنیادی e است:

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

یک مثال آشنا از کوانتیده بودن یک کمیت، تعداد دانش‌آموزان یک کلاس یا تعداد تخم مرغ‌های درون یک ظرف است. برای مثال، ما نمی‌توانیم $24/3$ دانش‌آموز در یک کلاس و یا $12/4$ تخم مرغ در یک ظرف داشته باشیم.

جدول ۱-۱ سری الکتریسیته مالشی (تریبو الکتریک)^۱

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

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 nC به او شوک خفیفی وارد کنید. در این انتقال بار، حدود 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؟

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

۱- نیازی به حفظ این جدول نیست.

۳-۱ قانون کولن

همان طور که می دانیم نیروی الکتریکی که دو جسم باردار برهم وارد می کنند می تواند جاذبه یا دافعه باشد. اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، این نیرو دافعه است (شکل ۶-۱). و اگر ناهمنام باشند، این نیرو جاذبه است.



شکل ۶-۱ گوی های باردار همنام یکدیگر را با نیرویی هم اندازه دفع کرده اند.

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 پارچه ای پشمی نزدیک یکدیگر قرار دهید. اگر نی ها به خوبی باردار شده باشند، نیروی دافعه آنها را می توانید به وضوح بر روی انگشتان خود حس کنید.

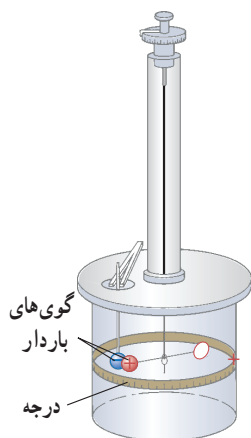
نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار، به چه عامل هایی بستگی دارد و اندازه این نیروها را از چه رابطه ای می توان محاسبه کرد؟ شارل آگوستین کوئن، دانشمند فرانسوی برای نخستین بار با انجام آزمایش های ساده و هوشمندانه ای توانست عامل های مؤثر بر نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار را که اصطلاحاً بار نقطه ای خوانده می شود، شناسایی کند. نتیجه آزمایش های او امروزه به نام **قانون کولن** خوانده می شود. شکل ۷-۱ طرحی از آزمایش کولن را نشان می دهد.

قانون کولن بیان می دارد:

اندازه نیروی الکتریکی (الکتروستاتیکی) بین دو بار نقطه ای^۱ که در راستای خط واصل آنها اثر می کند، با حاصل ضرب بزرگی آنها متناسب است و با مربع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد. بنابراین، اندازه این نیرو برابر است با

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

شکل ۷-۱ ترازوی پیچی کولن. در یک سر یک میله نارسنای سبک افقی یک گوی باردار مثبت کوچک و در سر دیگر آن، یک قرص قرار دارد و میله از وسط توسط یک رشته سیم کنسان و نازک آویخته شده است. یک گوی با بار منفی از حفره ای به داخل استوانه شیشه ای برده می شود. درجه هایی بر سطح استوانه حک شده است که زاویه چرخش میله را نشان می دهد. نیروی مؤثر بین این بارها از اندازه گیری زاویه چرخش تا رسیدن به حالت تعادل به دست می آید.



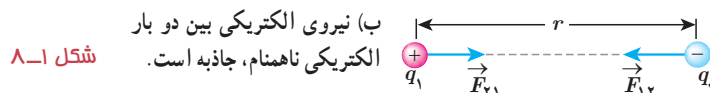
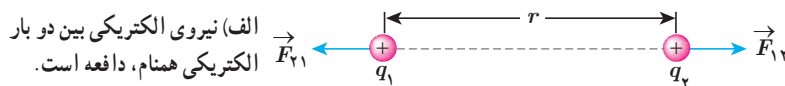
۱- در این بخش با نیروهای بین ذره های باردار (بارهای نقطه ای) سر و کار داریم. البته اگر فاصله یک جسم باردار با جسم دیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هر یک از دو جسم در مقایسه با فاصله بین آنها چشم پوشی کرد، می توان دو جسم را به صورت ذره های باردار در نظر گرفت.

که در آن q_1 و q_2 بارهای الکتریکی دو بار نقطه‌ای بر حسب کولن (C)، r فاصله بین دو بار بر حسب متر (m)، و F بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر هر بار بر حسب نیوتون (N) است. در این رابطه k ثابت الکتروستاتیکی یا ثابت کولن نام دارد و برابر است با^۱

$$k = 8/98955179 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2 \approx 9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$$

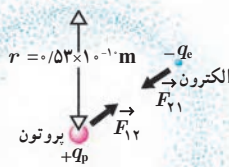
در شکل ۱-۸، \vec{F}_{12} نیرویی است که بار نقطه‌ای q_1 به بار نقطه‌ای q_2 وارد می‌کند و \vec{F}_{21} نیرویی است که بار نقطه‌ای q_2 به بار نقطه‌ای q_1 وارد می‌کند. این دو نیروی الکتریکی (بنا به قانون سوم نیوتون) هم اندازه، هم راستا، و در خلاف جهت همدیگرند. به عبارتی:

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



شکل ۱-۸

مثال ۱-۲



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

ب) در هسته اتم هلیم دو پروتون به فاصله تقریبی $m \times 2/4 \times 10^{-15}$ 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 محاسبه‌شده در قسمت الف است. این نیروی بزرگ، از جنس دافعه است. بنابراین، هسته اتم باید فرو بیاشد. از اینجا نتیجه می‌گیریم که باید نیروی دیگری وجود داشته باشد که مانع فروپاشی هسته شود. به این نیرو، نیروی هسته‌ای گفته می‌شود.



شارل آگوستین کولن (۱۸۰۶ - ۱۷۳۶م)

شارل آگوستین کولن 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. کولن 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 جاب رساند. نتیجه این آزمایش که به قانون کولن معروف شده است از هر آزمون و تجربه‌ای سر بلند بیرون آمده است و تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافت نشده است. کولن معتقد بود چنین قانونی برای قطب‌های مغناطیسی نیز برقرار است، گرچه هیچ‌وقت نتوانست به چنین رابطه‌ای برسد. نام کولن یکی از ۲۲ نامی است که روی برج ایفل ثبت شده است.

ثابت کولن (k) را می‌توان بر حسب یک ضرب ثابت دیگر به نام ضرب گذردهی الکتریکی خالص (ϵ) نیز نوشت:

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

که در آن

$$\epsilon = 8/85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N.m}^2$$

۱- به ذهن سپردن این اعداد لازم نیست.

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} 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.

خوب است بدانید: DNA



اطلاعات ژنتیکی در مولکول‌های خاصی به نام دنا (DNA) وجود دارد. در واقع دنا دارای اطلاعات و دستورهای برای تعیین و ایجاد صفات ارثی ما و همه جانداران است. در مولکول‌های دنا چهار نوع باز به نام‌های آدنین (A)، سیتوزین (C)، گوانین (G) و تیمین (T) وجود دارد. دنا 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 زب می‌کنند. این جاذبه آن‌قدر هست که رشته‌ها از هم ننگسلند، اما به حد کافی ضعیف نیز هست تا در فرایند رونویسی از هم گسیخته گردد.

برایند نیروهای الکتریکی: اگر به جای دو ذره باردار، تعدادی بار نقطه‌ای داشته

باشیم، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برایند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر به تنهایی بر آن ذره وارد می‌کند.

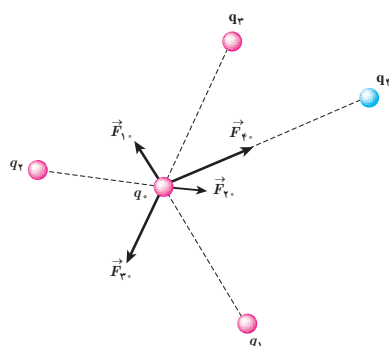
فرض کنید n ذره باردار داشته باشیم که در نزدیکی بار نقطه‌ای q قرار دارند. آن‌گاه

نیروی خالص (برایند) وارد بر بار نقطه‌ای q با جمع برداری زیر داده می‌شود:

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

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 ذره باردار در یک راستا قرار دارند یا عمود بر یکدیگرند^۱.



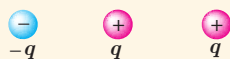
شکل ۱-۹ نیروی برایند وارد بر بار q در اینجا برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$$

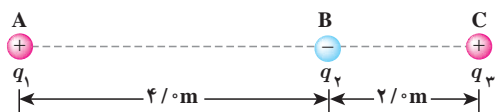
۱- بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا و یا عمود بر هم نیستند، خارج از برنامه درسی این کتاب بوده و نباید مورد ارزشیابی قرار

پرسش ۱-۲

سه ذره باردار مانند شکل روبه‌رو، روی یک خط راست قرار دارند و فاصله 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 ذره سمت راست به جای q ، بار $-q$ داشته باشد، جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار میانی چگونه خواهد بود؟



مثال ۱-۳



سه ذره با بارهای $q_1 = +2/5 \mu\text{C}$ ، $q_2 = -1/10 \mu\text{C}$ و $q_3 = +4/10 \mu\text{C}$ 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:

$$F_{12} = k \frac{|q_1||q_2|}{r_{12}^2} = (9/10 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/5 \times 10^{-6} \text{ C})(1/10 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4/10 \text{ m})^2}$$

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

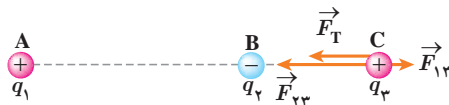
$$F_{23} = k \frac{|q_2||q_3|}{r_{23}^2} = (9/10 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/10 \times 10^{-6} \text{ C})(4/10 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2/10 \text{ m})^2}$$

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

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:

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

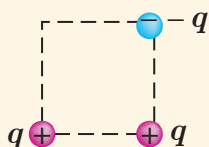
و جهت آن در جهت نیروی بزرگ‌تر (\vec{F}_{23})، یعنی از سمت راست به طرف چپ، است. اگر محور x را روی خط واصل سه بار و جهت مثبت آن را به سمت راست در نظر بگیریم و بردار یکه محور x را، \vec{i} بنامیم، داریم:

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

تمرین ۱-۲

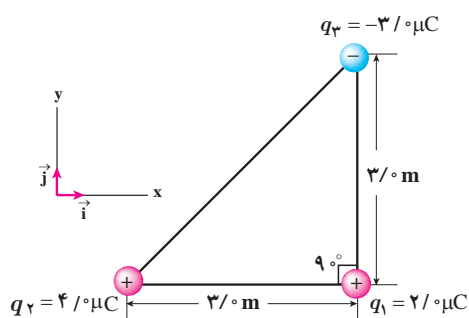
در مثال ۱-۳، نیروی خالص وارد بر بار q_2 را به دست آورید.

پرسش ۱-۳



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_1 و q_3 جاذبه است. با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

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

با توجه به دستگاه مختصات داده شده، \vec{F}_{21} در جهت مثبت محور x است. بنابراین، $\vec{F}_{21} = (8 \times 10^{-2} \text{ N}) \hat{i}$ می‌شود. به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای q_1 و q_3 داریم:

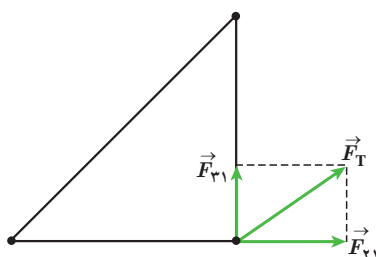
$$F_{31} = k \frac{|q_3||q_1|}{r_{31}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(3 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 6 \times 10^{-2} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده، \vec{F}_{31} در جهت مثبت محور y است. بنابراین، $\vec{F}_{31} = (6 \times 10^{-2} \text{ N}) \hat{j}$ می‌شود. پس برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر بار q_1 برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} = (8 \times 10^{-2} \text{ N}) \hat{i} + (6 \times 10^{-2} \text{ N}) \hat{j}$$

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

$$F_T = \sqrt{F_{21}^2 + F_{31}^2} = \sqrt{(8 \times 10^{-2} \text{ N})^2 + (6 \times 10^{-2} \text{ N})^2} = 1 \times 10^{-1} \text{ N}$$

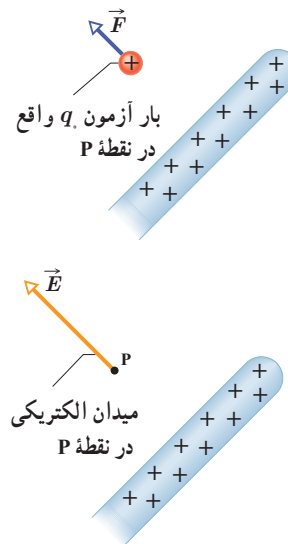


تمرین ۱-۳

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؟

۴-۱ 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 چگونه 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. میدان الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف یک جسم باردار الکتریکی به صورت زیر تعیین می‌شود: نخست بار کوچک و مثبت q_0 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



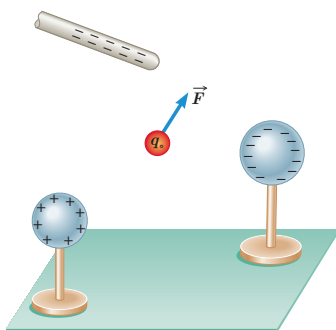
شکل ۱-۱۰ میله باردار میدانی الکتریکی زیر تعریف می‌شود: ایجاد می‌کند و به وسیله این میدان بر بار آزمون نیرو وارد می‌کند.

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

(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.

مثال ۱-۵



بار آزمون نشان داده شده در شکل $q = +3/0 \times 10^{-8} \text{ C}$ است و از سوی دو گوی و یک میله باردار نیرویی برابر با $F = 6/0 \times 10^{-5} \text{ N}$ در جهت نشان داده شده بر آن وارد می‌شود.

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

ب) اگر بار $12 \times 10^{-8} \text{ C}$ را به جای q قرار دهیم، چه نیرویی به آن وارد می‌شود؟

۱- بار آزمون باید آن قدر کوچک باشد که توزیع بار جسم را برهم نزند.

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، قطره‌های آب باردار می‌شوند. معمولاً قطره‌های بزرگ‌تر، دارای بار مثبت و قطره‌های کوچک‌تر، دارای بار منفی می‌شوند. قطره‌های بزرگ‌تر نسبتاً سریع فرو می‌افتند و قطره‌های کوچک‌تر که دارای بار منفی اند بیشتر در هوا می‌مانند. اگر تهویه هوا کم باشد، تعداد قطره‌های موجود در هوا به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و بدین ترتیب، یک میدان الکتریکی بزرگ (حدود 10^6 N/C) ایجاد می‌شود؛ این وضعیتی است که معمولاً در حمام رخ می‌دهد. به همین ترتیب، در حین تمیز کردن مخازن کشتی‌های نفت کش، وقتی قطره‌های آب به صورت افشانه از شیلنگ خارج شده و بر کف مخزن یا دیواره‌های آن می‌پاشند، باردار می‌شوند و در نتیجه مخزن پر از بخار آب باردار می‌شود. ممکن است این ذرات باردار با نوک فلزی آب‌فشان شیلنگ جرقه بزنند. اگر مخزن محتوی بخار نفت خام باشد، این جرقه‌ها می‌توانند بخار را مشتعل کنند و باعث انفجار مخزن گردند. برای رفع این خطر، پیش از تمیز کردن مخزن، یک گاز بی‌اثر به درون آن پمپ می‌شود تا اکسیژن موجود به اندازه‌ای کاهش یابد که از بروز انفجار جلوگیری کند.

۵-۱ میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار

می‌خواهیم میدان الکتریکی ناشی از ذره‌ای 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 می‌کنیم. اگر بار آزمون q_0 در نقطه A قرار گیرد، بار q به آن نیروی \vec{F} وارد می‌کند. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی \vec{F} را محاسبه می‌کنیم و با جای گذاری در رابطه $E = F/q_0$ ، بزرگی میدان الکتریکی بار q را در نقطه A به دست می‌آوریم:

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

در نتیجه:

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

رابطه ۱-۴ عامل‌های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از ذره‌ای با بار q را مشخص می‌کند. طبق این رابطه، میدان با اندازه بار q ، نسبت مستقیم و با مربع فاصله از آن، نسبت وارون دارد. همان‌طور که پیش‌تر دیدیم جهت بردار میدان الکتریکی \vec{E} در نقطه A ، همان جهت نیروی وارد بر بار آزمونی است که به‌طور فرضی در نقطه A می‌گذاریم.



شکل ۱-۱۱ می‌خواهیم میدان حاصل از ذره باردار q را در نقطه A محاسبه کنیم.

مثال ۱-۶



مولد وان دوگراف^۱ 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 0.1 m است و باری به بزرگی $1\text{ }\mu\text{C}$ روی آن جمع می‌شود. با فرض آنکه همهٔ این بار در مرکز کره قرار داشته باشد، بزرگی میدان الکتریکی این بار را در فاصله‌های 0.1 m ، 0.2 m ، 0.3 m و 0.4 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 رابطهٔ ۱-۴ بزرگی میدان را در نقطه‌های مورد نظر به دست می‌آوریم:

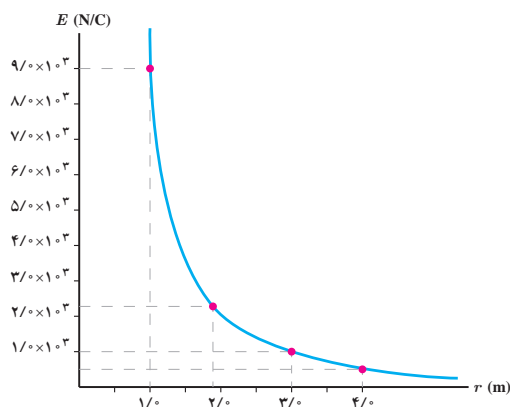
$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

$$E_1 = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.1 \text{ m})^2} = 9/0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.2 \text{ m})^2} = 2/25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2/3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

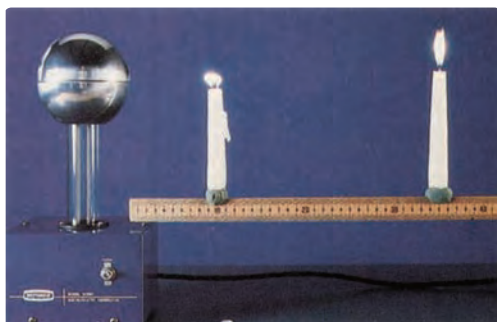
$$E_3 = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.3 \text{ m})^2} = 1/0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_4 = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.4 \text{ m})^2} = 0/5625 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 0/56 \times 10^3 \text{ N/C}$$



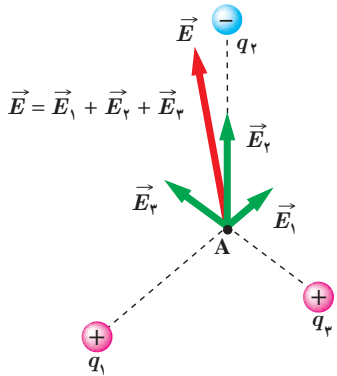
با استفاده از این نتایج نمودار E برحسب r ، مانند نمودار روبه‌رو خواهد شد.

برای مشاهدهٔ تجربی نتایج مثال ۱-۶ 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 شعلهٔ شمع نزدیک‌تر به سمت کلاهک کشیده شده است، در حالی که شعلهٔ شمع دورتر تغییر چندانی نکرده است. دلیل، آن است که کلاهک مولد وان دوگراف بار منفی بزرگی دارد که یون‌های مثبت شعلهٔ شمع نزدیک‌تر را به سمت خود می‌کشد، در حالی که شمع دیگر در فاصلهٔ 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 کلاهک آن است؟



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:

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

مثلاً شکل ۱۲-۱ میدان الکتریکی خالص در نقطه A 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^۱.

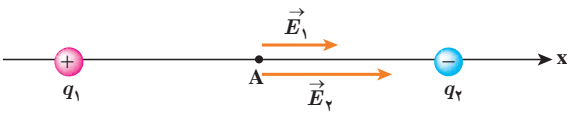
شکل ۱۲-۱ میدان الکتریکی \vec{E} در نقطه A، جمع برداری میدان‌های \vec{E}_1 ، \vec{E}_2 و \vec{E}_3 در این نقطه است.

مثال ۷-۱

مطابق شکل، دو ذره با بارهای $q_1 = 4/0 \mu\text{C}$ و $q_2 = -6/0 \mu\text{C}$ در فاصله 1 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 $1/0 \text{ m}$ از q_1 و $1/6 \text{ m}$ 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، بر 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. میدان خالص در نقطه A، بر این دو میدان‌های \vec{E}_1 و \vec{E}_2 است:

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

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

مقادیر E_1 و E_2 را با استفاده از رابطه ۱-۴ به دست می آوریم :

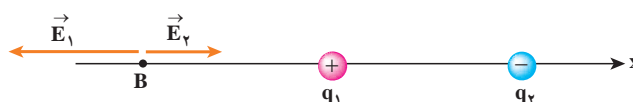
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4/0 \text{ m})^2} = 2/25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2/3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4/0 \text{ m})^2} = 3/375 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 3/4 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین :

$$\vec{E}_A \approx (2/3 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (3/4 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (5/7 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

ب) اکنون اگر بار آزمون را در نقطه B قرار دهیم شکل میدان های الکتریکی به صورت زیر در می آید :



میدان خالص در نقطه B، برآیند میدان های \vec{E}_1 و \vec{E}_2 است :

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

که در آن E_1 و E_2 برابرند با

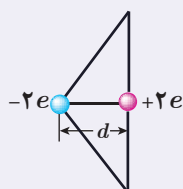
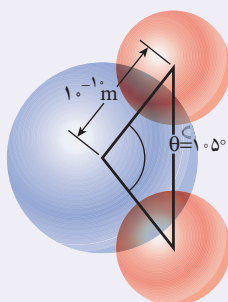
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(8/0 \text{ m})^2} = 5/625 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 5/6 \times 10^2 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(16 \text{ m})^2} = 2/109 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 2/1 \times 10^2 \text{ N/C}$$

بنابراین :

$$\vec{E}_B \approx (-5/6 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i} + (2/1 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i} = (-3/5 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i}$$

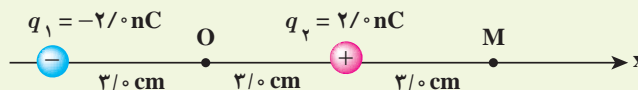
خوب است بدانید



دوقطبی الکتریکی آرایشی از بارهای الکتریکی است که در آن دو ذره با بزرگی بار q ی یکسان و علامت مخالف در فاصله d از هم روی محوری که به آن محور دوقطبی گفته می شود قرار گرفته اند. مولکول آب (H_2O) از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن ساخته شده است. اتم اکسیژن الکترون های دو اتم هیدروژن را به سمت خود می کشد و بدین ترتیب اتم های هیدروژن بار مثبت و خودش بار منفی پیدا می کند. این سه اتم مطابق شکل به گونه ای قرار گرفته اند که خطوط وصل کننده مراکز اتم های هیدروژن به مرکز اتم اکسیژن، زاویه 105° با یکدیگر می سازند. با فرض اینکه کل بار مثبت ($+2e$) دقیقاً در میانه خطی باشد که مراکز اتم های هیدروژن را به هم متصل می کند 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 مولکول های قطبی (مانند مولکول آب) در میدان های الکتریکی دارد.

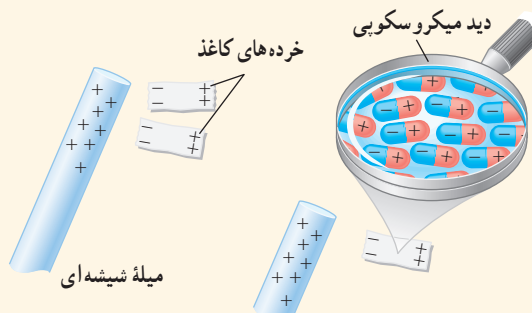
تمرین ۱-۵

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

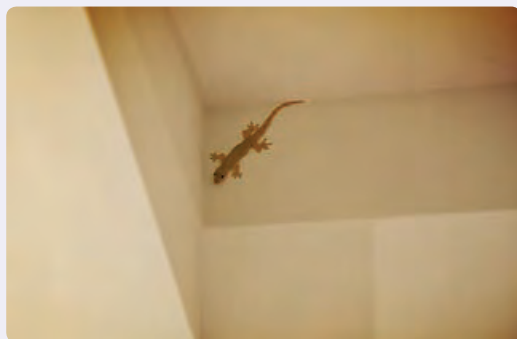


پرسش ۱-۴

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



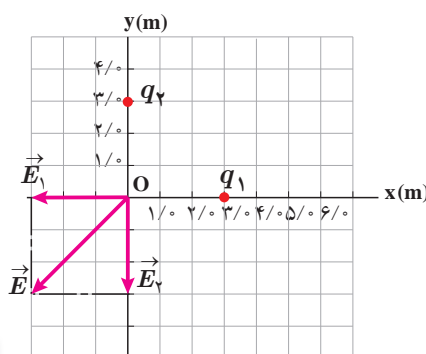
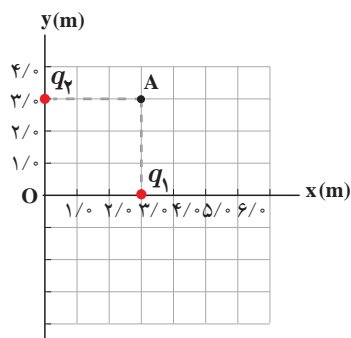
خوب است بدانید: نیروی وان دروالس او چسبیدن مارمولک‌ها به دیوار



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 سرمثلثی دارد که به کاردک معروف‌اند. وقتی مارمولک پای خود را بر دیوار می‌فشارد تمام این کاردک‌ها توسط نیروی وان دروالس به دیوار می‌چسبند. در این حالت، دوقطبی‌های موجود در سطح کاردک‌ها و سطح دیوار، یکدیگر را جذب می‌کنند. گرچه نیروی وان دروالس ضعیف است، اما مجموع این نیروهای بی‌شماری می‌تواند مارمولک را بر سطح دیوار نگه دارد.

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. ($q_1 = q_2 = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$)
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:

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

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

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:

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

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

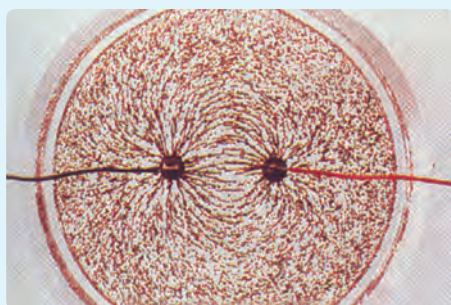
تمرین ۱-۶

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

۱-۶ خطوط میدان الکتریکی

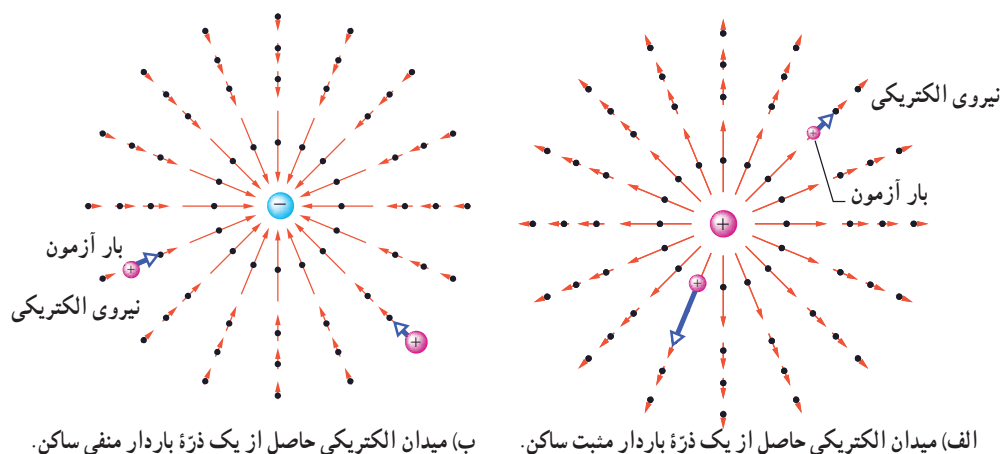
پیش از این دیدیم بارهای الکتریکی در فضای پیرامون خود میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند. آیا می‌توانید بردار میدان الکتریکی را در نقاط پیرامون یک ذره باردار مثبت یا منفی تجسم کنید؟ مایکل فاراد در نخستین بار در میانه قرن نوزدهم میلادی روشی را برای تجسم این بردارها ارائه کرد. برای مجسم کردن میدان الکتریکی در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

فعالیت ۱-۲ (کار در کلاس)



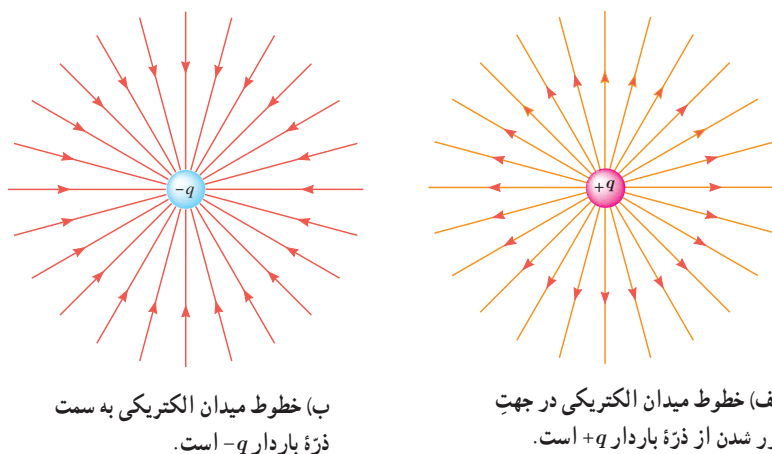
درون یک ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی با عمق کم، مقداری پارافین مایع یا روغن کرچک به عمق حدود 5 cm بریزید و داخل آن دو الکتروند نقطه‌ای قرار دهید. الکترونها را با سیم به پایانه‌های مثبت و منفی یک مولد ولتاژ بالا، مانند مولد وان دوگراف وصل کنید. روی سطح پارافین، مقدار کمی بذر چمن یا خاکشیر بپاشید. مولد را روشن 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.

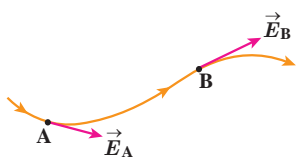


شکل ۱-۱۳

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



شکل ۱-۱۴



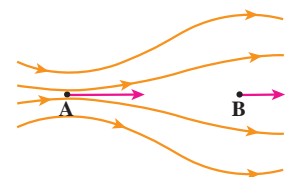
شکل ۱-۱۵ میدان الکتریکی در هر نقطه برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است.

بنابراین، طرحی که از سمت‌گیری دانه‌ها در فعالیت ۲-۱ دیدید، در واقع طرحی از خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو الکتروود 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 ۱-۱۵).

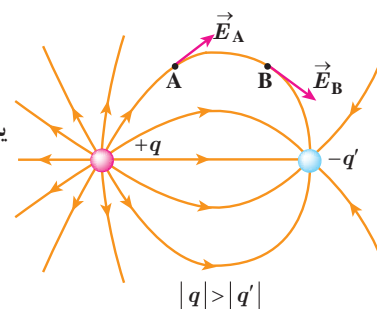
۲- میزان تراکم خطوط میدان در هر ناحیه از فضا نشان‌دهنده اندازه میدان در آن ناحیه است؛ هر جا خطوط میدان متراکم‌تر باشد، اندازه میدان بیشتر است (شکل ۱-۱۶).



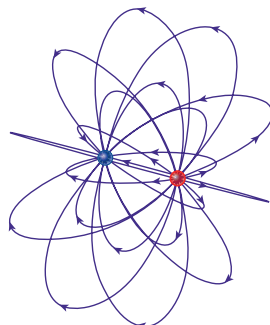
شکل ۱-۱۶ اطراف نقطه A خطوط میدان متراکم‌تر از اطراف نقطه B است. بنابراین، بزرگی میدان در نقطه A بیشتر از نقطه B است.

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 فضاست، و بنابراین طرحی سه بعدی دارد (شکل ۱۸-۱).



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

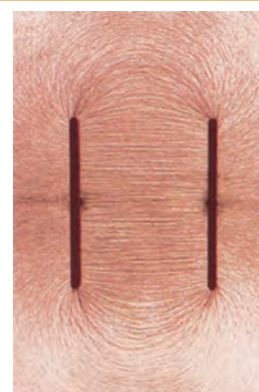


شکل ۱۸-۱ نمایش سه بعدی خطوط میدان برای یک دو قطبی الکتریکی.

پرسش ۱-۵

به نظر شما چرا خطوط میدان الکتریکی بر ایند هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند؟

میدان الکتریکی یکنواخت: اگر دوباره اسباب فعالیت ۲-۱ را سوار کنید و این بار الکترودهای نقطه‌ای را با دو صفحه فلزی موازی جایگزین کنید و دوباره به سمت گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروده توجه کنید، طرحی از خطوط میدان الکتریکی را مشاهده می‌کنید که در شکل ۱۹-۱ نشان داده شده است. خطوط این میدان، در فضای بین دو صفحه و دور از لبه‌های صفحات، مستقیم، موازی و هم فاصله‌اند؛ یعنی بردار میدان در تمام نقاط بین دو صفحه هم اندازه و هم جهت است. به چنین میدانی، میدان الکتریکی یکنواخت گفته می‌شود (شکل ۱-۲۰).

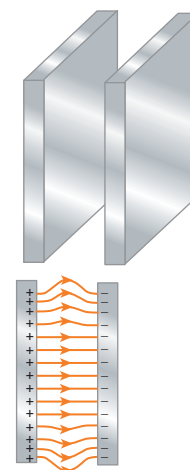


شکل ۱۹-۱ سمت گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروده صفحه‌ای موازی

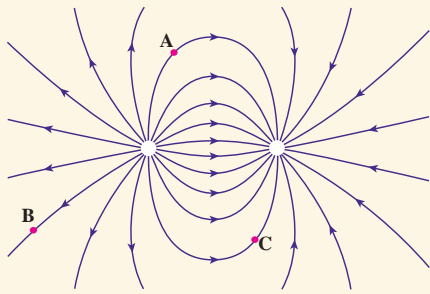
نیروی الکتریکی وارد بر بار الکتریکی در یک میدان الکتریکی: گرچه برای تعریف میدان الکتریکی یک جسم باردار از بار آزمون مثبت استفاده کردیم، ولی وجود این میدان مستقل از بار آزمون است. بنابراین، اگر بار الکتریکی q در میدان الکتریکی \vec{E} ناشی از اجسام باردار دیگری قرار گیرد، این میدان بر آن نیروی \vec{F}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

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (۱-۶)$$

بزرگی این نیرو از رابطه $F = |q|E$ به دست می‌آید، 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 ۲۰-۱ طرحی از خطوط میدان یکنواخت بین دو صفحه رسانای موازی با بارهای هم اندازه و ناهمنام



بار q - را در نقطه‌های A، B و C از میدان الکتریکی غیریکنواخت شکل روبه‌رو قرار دهید و جهت نیروی الکتریکی وارد بر این بار منفی را تعیین کنید.

فعالیت ۱-۳



تولید مثل برخی از گل‌ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده‌ها به واسطه میدان الکتریکی، از یک گل به زنبور و از زنبور به گل دیگر منتقل می‌شوند. در این باره تحقیق کنید.

تمرین ۱-۷

روی سطح بادکنکی به جرم $1 \text{ g} / 10\%$ بار الکتریکی 20 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 ۱-۴

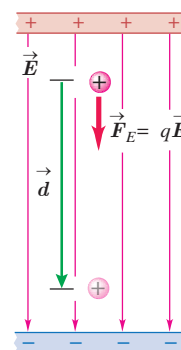


رسوب‌دهنده الکتروستاتیکی (ESP) دود و غبار را از گازهای زائدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌آید جدا می‌سازد. رسوب‌دهنده‌ها انواع مختلفی دارند. در مورد اساس کار این رسوب‌دهنده‌ها تحقیق کنید. شکل‌های روبه‌رو تأثیر رسوب‌دهنده را در کاهش آلودگی هوای ناشی از یک دودکش نشان می‌دهد.

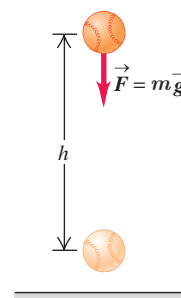
۷-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی



شکل ۱-۲۱ ذره باردار $+q_2$ در میدان الکتریکی فضای اطراف بار $+q_1$ رها شده است.



شکل ۱-۲۲ ذره 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.

دو ذره باردار الکتریکی شکل ۱-۲۱ 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 ذره شکل ۱-۲۱ وابسته است و همان طور 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 ۱-۲۲ در نظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحه 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 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:

$$W_E = -\Delta U_E \quad (7-1)$$

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 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:

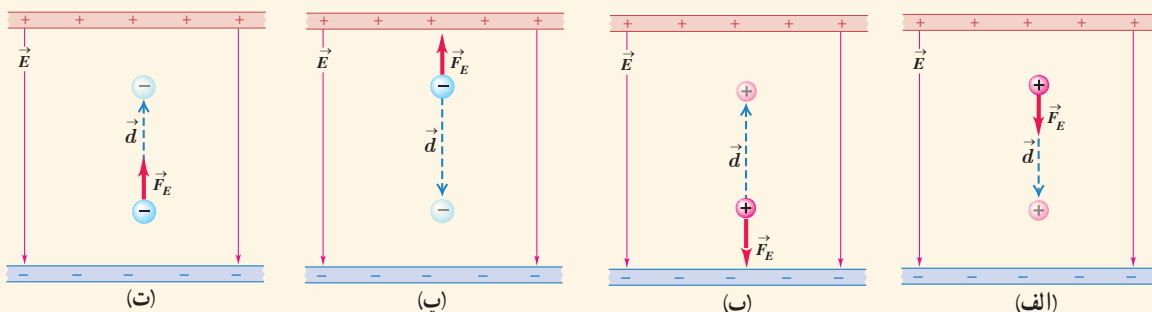
$$\Delta U_E = -W_E = -|q| E d \cos\theta \quad (8-1)$$

که در آن، θ 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

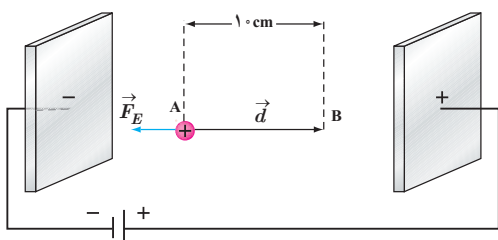
داشت. در این رابطه، بار الکتریکی (q) برحسب کولن (C)، بزرگی میدان الکتریکی (E) برحسب نیوتون بر کولن (N/C)، اندازه جابه‌جایی (d) برحسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی (ΔU_E) برحسب ژول (J) است. توجه کنید که این رابطه چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است.

پرسش ۱-۷

در هر یک از شکل‌های زیر، با توجه به علامت بار ذره جابه‌جا شده، و جهت میدان الکتریکی (\vec{E})، جهت نیروی الکتریکی (\vec{F}_E) و جهت جابه‌جایی ذره (\vec{d})، تعیین کنید که:
الف) کار نیروی الکتریکی (W_E) مثبت است یا منفی. (ب) انرژی پتانسیل الکتریکی (U_E) کاهش یافته است یا افزایش.



مثال ۱-۹



در یک میدان الکتریکی یکنواخت $E = 2.0 \times 10^2 \text{ N/C}$ ، پروتون 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 ۱-۸ داریم:

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

ب) طبق قضیه کار-انرژی جنبشی می‌توان نوشت:

$$W_E = \Delta K \Rightarrow -\Delta U_E = \frac{1}{2}m(v_0^2 - v^2)$$

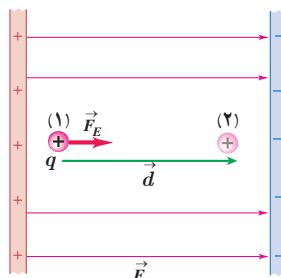
$$-3.2 \times 10^{-17} \text{ J} = \frac{1}{2}(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(v_0^2) \Rightarrow v_0 = 1.96 \times 10^5 \text{ m/s} \approx 2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$$

تمرین ۱-۸

در مثال ۱-۹ اگر جای قطب‌های باتری عوض شود و پروتون را در نقطه A از حالت سکون رها کنیم، پروتون با چه تندی ای 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 دو برابر شدن بار ذره، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز دو برابر می‌شود. بنابراین، نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار ذره، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است. به این نسبت، **اختلاف پتانسیل الکتریکی** دو نقطه‌ای می‌گوییم که ذره میان آنها جا به جا شده است (شکل ۱-۲۴) و آن را با ΔV نمایش می‌دهیم:



شکل ۱-۲۴ نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است.

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{\Delta U_E}{q} \quad (۹-۱)$$

که در آن V کمیتی نرده‌ای موسوم به پتانسیل الکتریکی است که مقدار آن در نقطه‌های ۱ و ۲ به ترتیب V_1 و V_2 است. در این رابطه، اختلاف پتانسیل الکتریکی (ΔV) برحسب ژول بر کولن (J/C) است که آن را به افتخار *الساندرو ولتا*، ولت می‌نامند و با نماد V نمایش می‌دهند.

گرچه این رابطه را برای میدان الکتریکی یکنواخت بیان کردیم، اما برای میدان‌های الکتریکی غیریکنواخت نیز برقرار است. توجه کنید که در این رابطه علامت q باید در نظر گرفته شود. جدول ۱-۲ برخی از اختلاف پتانسیل‌ها (ولتاژهای) متداول را نشان می‌دهد.

در تشابه با انرژی پتانسیل گرانشی، در اینجا نیز می‌توانیم 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 می‌شود:

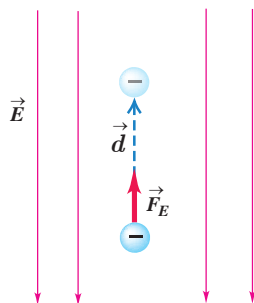
$$V = \frac{U_E}{q} \quad (۱۰-۱)$$

جدول ۱-۲ برخی از ولتاژهای متداول	
پتانسیل استراحت نرون	۶۰-۹۰ mV
باتری قلمی	۱/۵V
باتری اتومبیل	۱۲V
برق خانگی در برخی از کشورها	۱۱۰-۱۲۰V
برق خانگی در ایران و اغلب کشورها	۲۲۰-۲۴۰V
مولد نیروگاه برق	۲۴۰۰۰V
خطوط انتقال برق ولتاژ بالا	۱۰ ^۴ -۱۰ ^۶ V
آذرخش	۱۰ ^۸ -۱۰ ^۹ V



الساندرو ولتا (۱۸۲۷-۱۷۴۵م)

الساندرو ولتا در ایتالیا به دنیا آمد. نخست به شغل معلمی روی آورد و تا سن سی‌سالگی 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 می‌کرد 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 زیست‌شناسی و فیزیولوژی دانشگاه بولونیا موقعی که سرگرم تشریح قورباغه‌ای 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 می‌شود و علت انقباض ماهیچه پای قورباغه را الکتریسیته‌ای پنداشت که در بدن جانور به وجود می‌آید. اما ولتا برخلاف گالوانی عقیده داشت منشأ پیدایش این الکتریسیته از بدن جانور نیست و در نامه‌ای به تاریخ ۱۸۰۰ میلادی دربارهٔ پیل توضیح داد که امروزه پیل ولتا خوانده می‌شود. پیل ولتا از تعدادی صفحات نقره، مقوای آغشته به یک محلول الکترولیت و روی درست شده است که به ترتیب روی هم چیده شده‌اند. این پیل یک منبع الکتریسیته بود که امروزه به نام باتری خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. اختراع ولتا راه تازه‌ای 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.



در نتیجه برخورد پرتوهای کیهانی با مولکول‌های هوا، الکترون‌هایی از این مولکول‌ها کنده می‌شوند. در نزدیکی سطح زمین، میدان الکتریکی با بزرگی 150 N/C و جهت رو به پایین وجود دارد. الف) اگر یکی از این الکترون‌ها، تحت تأثیر این میدان 500 m رو به بالا جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟ ب) اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه‌ای که الکترون بین آنها جابه‌جا شده چقدر است؟

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

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|Ed \cos \theta = -(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(150 \text{ N/C})(500 \text{ m}) \cos 0^\circ$$

$$= -1.20 \times 10^{-14} \text{ J}$$

ب) با استفاده از رابطه ۹-۱ 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 ۱-۲۵) 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 $+8\text{V}$ خواهد شد. می‌توان پایانه منفی را مرجع پتانسیل در نظر گرفت؛ در این صورت، پتانسیل پایانه مثبت برابر $+12\text{V}$ 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.



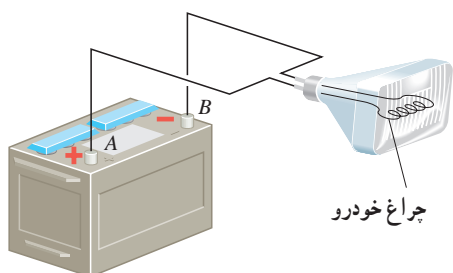
شکل ۱-۲۵ برخی از باتری‌های متداول



تمرین ۱-۱۰

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

مثال ۱-۱۱



اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر $12/0\text{V}$ است. اگر بار الکتریکی $50/0\text{C}$ کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟

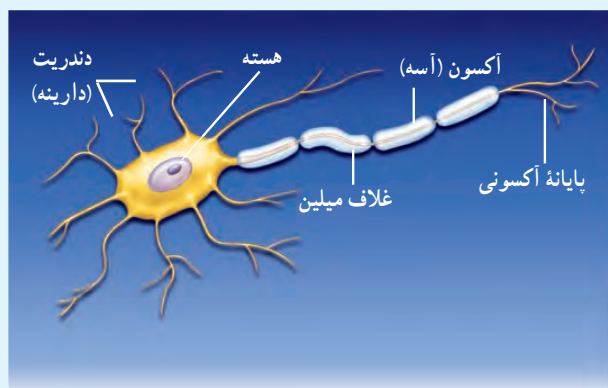
پاسخ: با استفاده از رابطه ۹-۱ داریم:

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

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_+ - V_-) = (-50/0\text{C})(+12/0\text{V}) = -600\text{J}$$

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

فعالیت ۱-۵



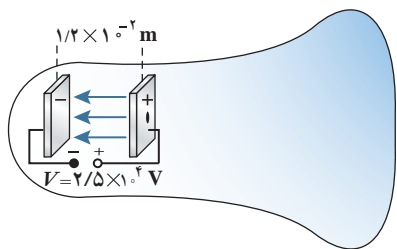
عمل مغز اساساً بر مبنای کنش‌ها و فعالیت‌های الکتریکی است. سیگنال‌های عصبی چیزی جز عبور جریان‌های الکتریکی نیست. مغز این سیگنال‌ها را دریافت می‌کند و اطلاعات به صورت سیگنال‌های الکتریکی در امتداد اعصاب گوناگون منتقل می‌شوند. هنگام انجام هر عمل خاصی، سیگنال‌های الکتریکی زیادی تولید می‌شوند. این سیگنال‌ها 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. برای اختلاف پتانسیل ΔV دو نقطه به فاصله d از یکدیگر، که خط واصل آنها هم‌راستا با میدان الکتریکی \vec{E} است، رابطه زیر برقرار است:

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

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

لامپ‌های تصویر تلویزیون‌ها و نمایشگرهای قدیمی، لامپ پرتو-کاتدی (CRT) بودند. در این لامپ، الکترون‌ها در میدان الکتریکی یکنواخت بین دو صفحه‌باردار، مطابق شکل، شتاب می‌گیرند و با صفحه‌نمایشگر 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.

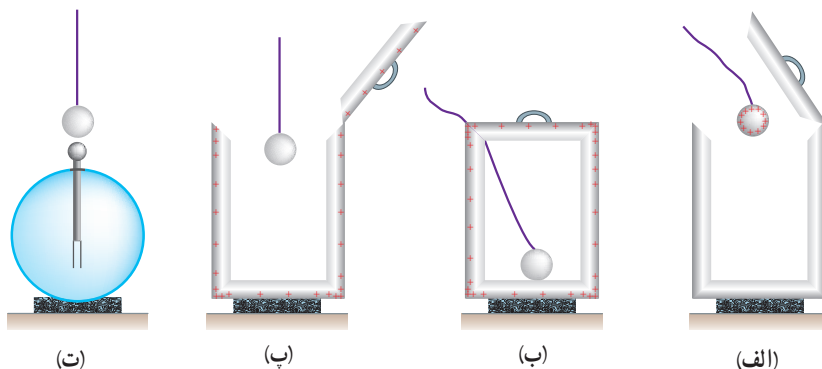


پاسخ: با استفاده از رابطه ۱-۱۱ داریم:

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

۱-۹ توزیع بار الکتریکی در اجسام رسانا

جسم رسانایی را در نظر بگیرید. به نظر شما اگر باری اضافی به این جسم داده شود، چگونه در آن توزیع می‌شود؟ مایکل فاراده در سال ۱۸۳۶ میلادی با انجام آزمایشی به این سؤال پاسخ داد. آزمایش فاراده: ظرف رسانایی با درپوش فلزی را در نظر بگیرید که روی پایه نارسنایی 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 ۱-۲۶ الف). اکنون گوی را با کف ظرف تماس می‌دهیم و سپس درپوش فلزی را می‌بندیم (شکل ۱-۲۶ ب). آن‌گاه درپوش فلزی را با دسته عایقش برمی‌داریم (شکل ۱-۲۶ پ). پس از خارج کردن گوی فلزی از ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود عقربه الکتروسکوپ تکان نمی‌خورد (شکل ۱-۲۶ 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 داده‌شده به یک رسانا روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود.



شکل ۱-۲۶ شرحی تصویری از آزمایش فاراده

خوب است بدانید بار در سطح خارجی رسانا به گونه‌ای توزیع می‌شود که میدان الکتریکی در داخل رسانا صفر شود. پدیده‌ی القا که در علوم هشتم با آن آشنا شدید ناشی از همین واقعیت است. مثلاً در شکل ۱-۲۷ جسم رسانای خنثایی در میدان الکتریکی خارجی میله‌ی بارداری قرار گرفته است. وقتی یک رسانای خنثی را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، بار طوری روی سطح خارجی توزیع می‌شود (القا می‌شود) که میدان الکتریکی ناشی از آن اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی کند و بدین ترتیب میدان الکتریکی خالص درون رسانا صفر شود.



شکل ۱-۲۷ نزدیک کردن میله‌ی باردار منفی به گوی فلزی خنثایی که روی پایه‌ی عایقی قرار گرفته است، موجب ایجاد بارهای القایی مثبت و منفی در دو طرف گوی فلزی می‌شود.

فعالیت ۱-۶

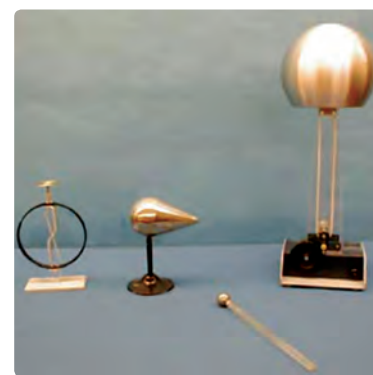


الف) در شکل شخصی را داخل یک قفس توری فلزی می‌بینید که نوعی از قفس فاراده است. در مورد قفس فاراده و کاربردهایش تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

ب) تحقیق کنید چرا معمولاً شخصی که در داخل اتومبیل یا هواپیماست از خطر آذرخش در امان می‌ماند.

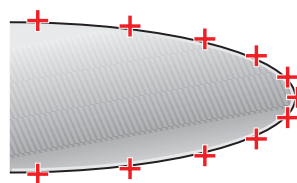
پ) با اعضای گروه خود آزمایش‌های دیگری را طراحی و اجرا کنید که نشان دهد بار اضافی داده شده به رسانا، روی سطح خارجی آن قرار می‌گیرد.

دیدیم که بار الکتریکی روی سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود. برای اینکه دریابید بار الکتریکی داده شده به یک رسانا چگونه روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود آزمایش زیر را در نظر بگیرید که اسباب آن در شکل ۱-۲۸ نشان داده شده است. یک جسم رسانای دوکی شکل را روی پایه‌ی 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



شکل ۱-۲۸ اسباب آزمایش چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی یک جسم رسانای باردار

آن است. آزمایش‌هایی از این دست نشان می‌دهد تراکم بار در نقاط تیز سطح جسم رسانای باردار از نقاط دیگر آن بیشتر است (شکل ۱-۲۹).



شکل ۱-۲۹ تراکم بار در نقاط تیزتر سطح یک جسم رسانای باردار بیشتر است.

فعالیت ۱-۷



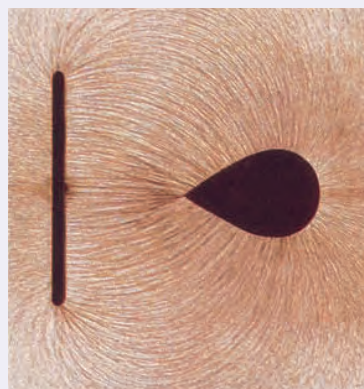
در مورد برق‌گیرهای ساختمان تحقیق کنید و بررسی کنید آنها چگونه ساختمان‌ها را از گزند آذرخش در امان نگه می‌دارند.

خوب است بدانید: تخلیه هاله‌ای^۱

همان‌طور که دیدیم در قسمت‌های نوک تیز اجسام رسانای باردار، تراکم بار الکتریکی بیشتر است. با اسباب آزمایش فعالیت ۱-۲ می‌توان نشان داد که خطوط میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز تراکم‌تر 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 جلیز و لیز 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 سنت‌المو^۲ گفته می‌شود.



ب) تخلیه هاله‌ای



الف) اسباب آزمایش فعالیت ۱-۲ به طوری که 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.

۱- Corona discharge

۲- St. Elmo fire

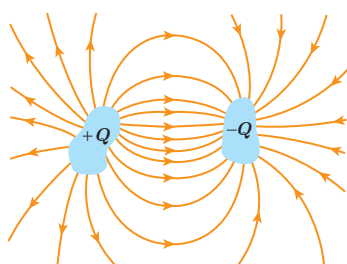
۱-۱۰ خازن

خازن وسیله‌ای الکتریکی است که می‌تواند بار و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند؛ مثلاً باتری‌های یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در خازن فلاش دوربین ذخیره می‌کنند (شکل ۱-۳۰). باتری‌ها معمولاً می‌توانند 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 می‌شود، می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار زیادی برای فلاش زدن آماده کند.



شکل ۱-۳۰ انرژی فلاش دوربین در یک خازن ذخیره شده است.

شکل ۱-۳۱ چند خازن را در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۱-۳۲ اجزای اصلی یک خازن معمولی را نشان می‌دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. این رساناها را صفحه‌های خازن می‌نامیم.

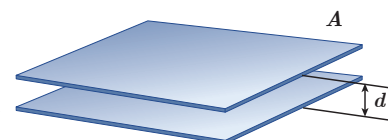


شکل ۱-۳۲ اجزای اصلی یک خازن باردار



شکل ۱-۳۱ تصویری از چند خازن مختلف

شکل ۱-۳۳ آرایش خازنی موسوم به خازن تخت^۱ را نشان می‌دهد که شامل دو صفحه رسانای موازی با مساحت A است که به فاصله d (که در برابر ابعاد صفحه‌ها ناچیز است) از هم قرار گرفته‌اند. گرچه نمادی که برای نشان دادن یک خازن به کار می‌بریم (\parallel) مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن‌ها با هر شکلی استفاده می‌شود. خازن‌ها به‌طور گسترده‌ای در مدارهای الکترونیکی و ساینی مانند رادیو، تلویزیون، رایانه، گوشی همراه و... به کار می‌روند؛ مثلاً شکل ۱-۳۴ مدار یک تقویت‌کننده (آمپلی‌فایر) را نشان می‌دهد که در آن چندین خازن به کار رفته است. برخی از این خازن‌ها با پیکان‌هایی مشخص شده‌اند.



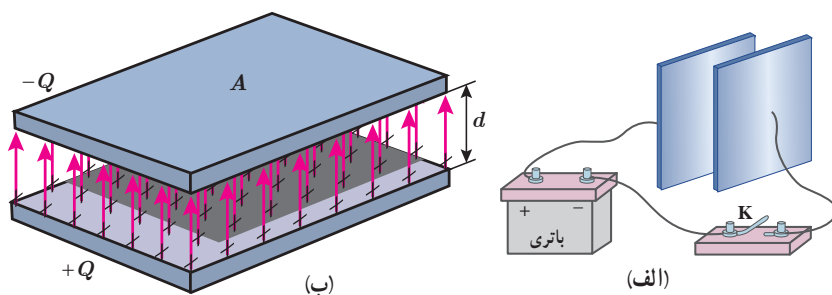
شکل ۱-۳۳ یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت A ساخته شده است که به فاصله d از هم قرار گرفته‌اند.

باردار (شارژ) کردن خازن: روش ساده و مرسوم برای باردار کردن خازن قرار دادن آن در مدار الکتریکی ساده‌ای است که یک باتری دارد (شکل ۱-۳۵ الف). وقتی کلید K بسته (وصل) شود بار از طریق سیم‌های رسانا جریان می‌یابد. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحه خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانه باتری یکسان شود. وقتی یک خازن باردار می‌شود، صفحه‌های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی با علامت مخالف می‌شود: $+Q$ و $-Q$. با این حال، بار یک خازن را به صورت Q نشان می‌دهند که همان بار صفحه مثبت است. بین دو صفحه خازن باردار یک میدان الکتریکی ایجاد می‌شود که خطوط این میدان از صفحه مثبت به منفی است (شکل ۱-۳۵ ب).



شکل ۱-۳۴ مدار یک تقویت‌کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن‌ها با پیکان مشخص شده‌اند.

^۱ parallel - plate capacitor



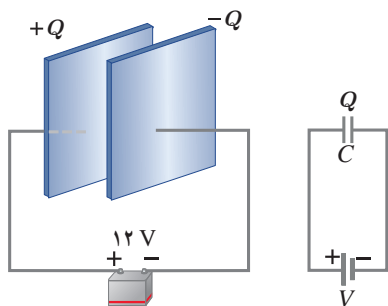
شکل ۱-۳۵ الف) یک روش برای باردار کردن خازن، اتصال صفحه‌های آن به یک باتری است. ب) صفحه‌های این خازن بارهایی هم اندازه و با علامت مخالف پیدا می‌کنند. میدان الکتریکی از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است.

ظرفیت خازن: اگر اختلاف پتانسیل بین صفحه‌های خازن (ΔV) را زیاد کنیم، بار خازن (Q) نیز به همان نسبت زیاد می‌شود. به عبارتی نسبت $\frac{Q}{\Delta V}$ همواره مقداری ثابت است که به این نسبت ثابت، ظرفیت خازن می‌گویند و آن را با C نشان می‌دهند. 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. بنا به دلایل تاریخی، قدرمطلق اختلاف پتانسیل ΔV بین دو صفحه خازن را با V نمایش می‌دهند. بنابراین:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (۱۲-۱)$$

در رابطه ۱۲-۱ یکای بار الکتریکی، کولن (C)، یکای اختلاف پتانسیل، ولت (V) و بنابراین یکای ظرفیت، کولن بر ولت (C/V) می‌شود که به پاس خدمات مایکل فاراده، فاراد (F) نامیده شده است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و عملاً ظرفیت اکثر خازن‌های متداول در محدوده میکروفاراد ($10^{-12} F$) تا میلی‌فاراد ($10^{-6} F$) است. گرچه امروزه فناوری ساخت خازن‌ها، دستیابی به ظرفیت‌هایی بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

مثال ۱-۱۳



صفحه‌های خازنی را مطابق شکل به پایانه‌های یک باتری با اختلاف پتانسیل ۱۲V وصل می‌کنیم. 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 می‌شود؟

پاسخ:

الف) با استفاده از رابطه ۱۲-۱ داریم:

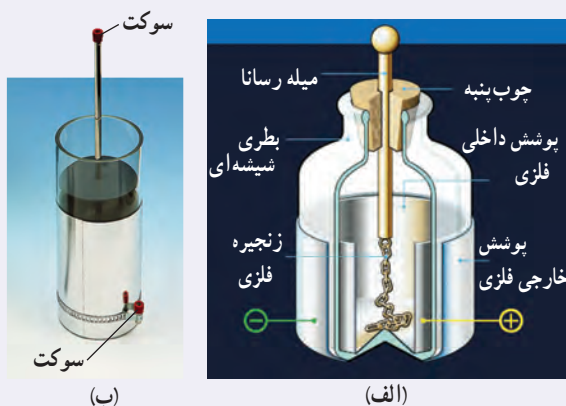
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{24 \times 10^{-6} C}{12 V} = 2 \times 10^{-6} F = 2 \mu F$$

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

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

استفاده از رابطه ۱۲-۱ می‌توان نوشت:

خوب است بدانید: بطری لیدن^۱



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 بالا مانند مولد وان دوگراف یا مولد ویم‌چرست^۲ 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.

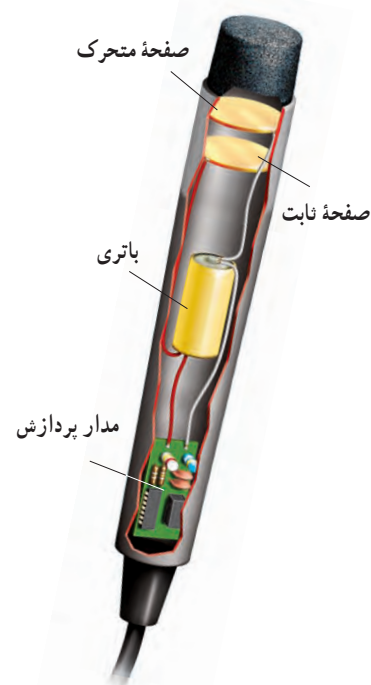
ظرفیت خازن تخت: آزمایش و محاسبه نشان می‌دهد که ظرفیت یک خازن تخت با مساحت

صفحه‌های A و فاصله جدایی صفحه‌های d ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

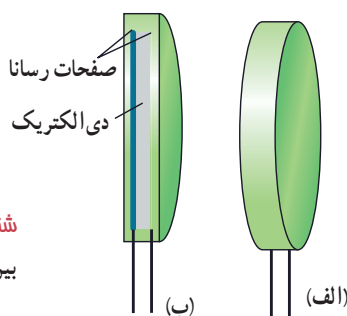
$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (۱۳-۱)$$

که در آن ϵ_0 همان ضریب گذردهی الکتریکی خلأ ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m) است. مثالی کاربردی از این رابطه، میکروفون خازنی است که بر اثر تغییر ظرفیت یک خازن تخت سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کند (شکل ۱-۳۶).

حال اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با ماده‌ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن دی‌الکتریک گفته می‌شود پر کنیم (شکل ۱-۳۷) 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 دی‌الکتریک ماده عایق (که آن را با k نشان می‌دهند) افزایش می‌یابد؛ یعنی اگر ظرفیت



شکل ۱-۳۶ 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.



شکل ۱-۳۷ الف) بیرون و ب) درون یک خازن که بین صفحه‌های فلزی آن لایه عایقی قرار گرفته است.

۱- Leyden jar

۲- Wimshurst Machine

۳- از حروف الفبای یونانی که کاها خوانده می‌شود.

جدول ۱-۳ ثابت دی الکتریک برخی عایق‌ها در دمای 20°C

ماده دی الکتریک	ثابت دی الکتریک
هوای 1 atm	1/0006
تفلون	2/1
پارافین	2/2
پلی استیرن	2/6
میلار	3/1
پی وی سی	3/4
کاغذ	3/5
کوارتز	4/3
شیشه پیرکس	5
میکا	7
آب خالص	80
تیتانید استرانسیوم	310

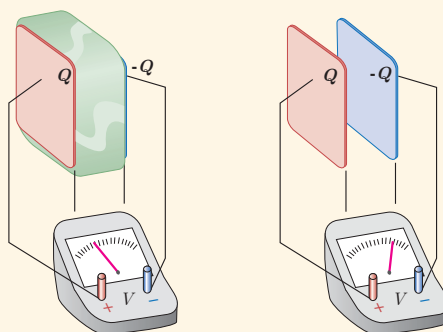
خازن بدون دی الکتریک را با C_0 نمایش دهیم، آن‌گاه ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر است با

$$C = \kappa C_0 \quad (1-14)$$

جدول ۱-۳ ثابت دی الکتریک چند ماده عایق را نشان می‌دهد.

پرسش ۱-۸

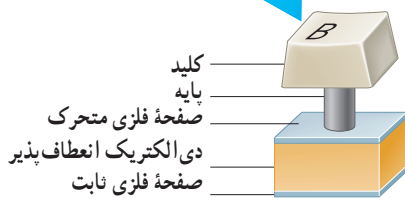
در شکل زیر صفحه‌های باردار یک خازن تخت را که بین آنها هواست، به ولت‌سنج وصل می‌کنیم. با وارد کردن دی الکتریک در بین صفحه‌ها، اختلاف پتانسیل دو صفحه کاهش می‌یابد. علت آن را توضیح دهید (توجه کنید که این آزمایش با بیشتر ولت‌سنج‌های معمولی و رایج ممکن نیست).



مثال ۱-۱۴



(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 دی الکتریک 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 $5/00 \times 10^{-2}\text{m}$ است که این فاصله با فشار دادن کلید به $10^{-3}\text{m} \times 150^{\circ}$ می‌رسد. مساحت صفحه‌ها $9/50 \times 10^{-5}\text{m}^2$ است و خازن از ماده‌ای با ثابت دی الکتریک $3/50^{\circ}$ پر شده است. تغییر ظرفیتی که با فشار دادن کلید، توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود چقدر است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه‌های ۱۳-۱ و ۱۴-۱ ظرفیت خازن پیش از فشار دادن کلید برابر است با

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} = \frac{3}{5} \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \left(\frac{9/50 \times 10^{-5} \text{ m}^2}{5/100 \times 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$= 0.589 \times 10^{-12} \text{ F} = 0.589 \text{ pF}$$

پس از فشردن شدن کلید، فاصله بین صفحه‌ها به $10^{-3} \text{ m} \times 150$ 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 ۱-۸



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.

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^۱ ایجاد می‌شود (شکل ۱-۳۸) که سبب تخلیه خازن می‌گردد. به این پدیده **فروریزش الکتریکی**^۲ 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 بیشینه‌ای که می‌توانند تحمل کنند مشخص می‌شوند (شکل ۱-۳۹).



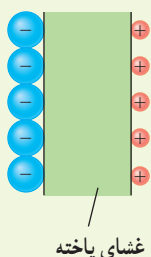
شکل ۱-۳۸ نقش‌های لیچنبرگ. فروریزش الکتریکی باعث تشکیل مسیره‌های رسانشی سرخس شکلی در دی الکتریک شده است.

شکل ۱-۳۹ تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل بیشینه قابل تحمل نوشته شده است.



۱- موسوم به نقش‌های لیچنبرگ (Lichtenberg)

تمرین ۱۱-۱

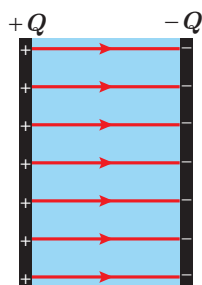


یک یاختهٔ عصبی (نورون) را می‌توان با یک خازن تخت مدل‌سازی کرد، به طوری که غشای سلول به عنوان دی الکتریک و یون‌های باردار با علامت مخالف که در دو طرف غشا هستند به عنوان بارهای روی صفحه‌های خازن عمل کنند (شکل روبه‌رو). ظرفیت یک سلول عصبی و تعداد یون‌های لازم (بافرض آنکه هر یون یک بار یونیده باشد)، برای آنکه یک اختلاف پتانسیل 85mV ایجاد شود چقدر است؟ فرض کنید غشا دارای ثابت دی الکتریک $\kappa = 3$ ، ضخامت 1 nm و مساحت سطح $1\text{ m}^2 \times 10^{-1}$ است.

فعالیت ۹-۱

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

۱۱-۱ 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 اندازهٔ کافی زیاد باشد، لامپ برای مدتی روشن و سپس خاموش می‌شود.

این انرژی به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی فضای بین صفحه‌های خازن ذخیره می‌شود (شکل ۱-۴). می‌توان نشان داد انرژی پتانسیل ذخیره شده در خازن برابر است با

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (15-1)$$

شکل ۱-۴ انرژی در میدان الکتریکی بین صفحات خازن ذخیره می‌شود.

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

مثال ۱۵-۱



مدار یک فلاش عکاسی، انرژی را با ولتاژ 330 V ، در یک خازن $660\text{ }\mu\text{F}$ ، ذخیره می‌کند. الف) چه مقدار انرژی الکتریکی در این خازن ذخیره می‌شود؟ ب) اگر تقریباً همهٔ این انرژی در مدت 1 ms آزاد شود، توان متوسط خروجی فلاش چقدر است؟

پاسخ: با توجه به رابطه ۱-۱۵ داریم

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (660 \times 10^{-6} \text{F}) (330 \text{V})^2 = 35/9 \text{ J}$$

با توجه به تعریف توان داریم:

$$P = \frac{U}{t} = \frac{35/9 \text{ J}}{1/0 \times 10^{-3} \text{ s}} = 3/6 \times 10^4 \text{ J/s} = 36 \text{ kW}$$

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

مثال ۱-۱۶: 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 و انقباض ناهماهنگ قلب باعث می‌شود خون به درستی به مغز فرستاده نشود. در این دستگاه یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود ۶kV 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 $11/0 \mu\text{F}$ باشد و با ولتاژ $6/0 \text{ kV}$ 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 $2/0 \text{ ms}$ 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 ۱-۱۵ به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (11/0 \times 10^{-6} \text{F}) (6/00 \times 10^3 \text{V})^2 = 198 \text{ J}$$

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

ب) بار اولیه روی صفحات خازن برابر است با

$$Q = CV \Rightarrow Q = (11/0 \times 10^{-6} \text{F}) (6/00 \times 10^3 \text{V}) = 6/60 \times 10^{-2} \text{ C}$$

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

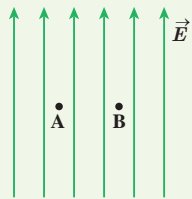
$$P = \frac{U}{t} = \frac{198 \text{ J}}{2/00 \times 10^{-3} \text{ s}} = 99/0 \text{ kW}$$

۶ در شکل روبه‌رو، دو گوی مشابه به جرم $2/5g$ و بار یکسان مثبت q در فاصله $1/0\text{ cm}$ 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 کنده شده از هر گوی چقدر است؟



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

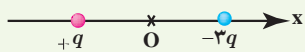
۷ یک ذره باردار را یک بار در نقطه A و بار دیگر در نقطه B قرار می‌دهیم. نیرویی که از طرف میدان الکتریکی بر این ذره باردار در این دو نقطه وارد می‌شود را مقایسه کنید.



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

۹ 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 بی نهایت) نقطه‌ای وجود دارد که در آنجا میدان الکتریکی برابری با صفر است؟ ب) بزرگی و جهت میدان الکتریکی برابری در مبدأ مختصات را بیابید.



۱۰ در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $5/0 \times 10^5\text{ N/C}$ که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره بارداری به جرم $2/0\text{ g}$ معلق و به حال سکون قرار دارد. اگر $g = 10\text{ N/kg}$ باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.

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

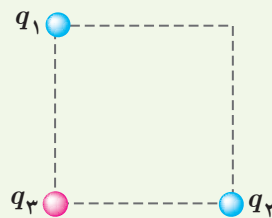
۱ یک میله پلاستیکی را با پارچه پشمی مالش می‌دهیم. پس از مالش، بار الکتریکی میله پلاستیکی $12/8\text{ nC}$ می‌شود. الف) بار الکتریکی ایجاد شده در پارچه پشمی چقدر است؟ ب) تعداد الکترون‌های منتقل شده از پارچه پشمی به میله پلاستیکی را محاسبه کنید.

۲ الف) بار الکتریکی اتم و هسته اتم کربن (^{12}C) چند کولن است؟ ب) بار الکتریکی اتم کربن یک بار یونیده (C^+) چقدر است؟

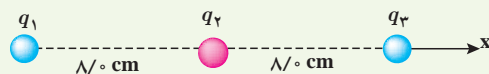
۳-۱ قانون کولن

۳ دو گوی رسانا، کوچک و یکسان به بارهای $q_1 = 4/0\text{ nC}$ و $q_2 = -6/0\text{ nC}$ را با هم تماس می‌دهیم و سپس تا فاصله $r = 3/0\text{ cm}$ از هم دور می‌کنیم. نیروی برهم کنش الکتریکی بین دو گوی را محاسبه کنید. این نیرو رانشی است یا ربایشی؟

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



۵ بارهای الکتریکی نقطه‌ای $q_1 = -4/0\text{ nC}$ ، $q_2 = +5/0\text{ nC}$ و $q_3 = -4/0\text{ nC}$ مطابق شکل، در جای خود ثابت شده‌اند. نیروی خالص الکتریکی وارد بر هر یک از بارهای q_1 و q_2 را محاسبه کنید.



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

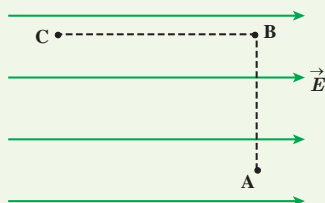


۷-۱ و ۸-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی و پتانسیل الکتریکی

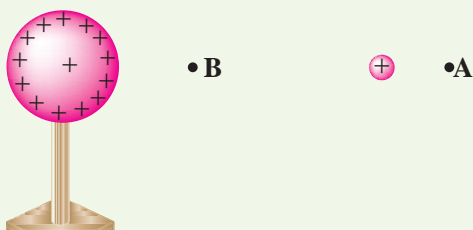
۱۵ مطابق شکل زیر، بار $q = +5 \text{ nC}$ را در میدان الکتریکی یکنواخت 10^5 N/C نخست از نقطه A تا نقطه B و سپس تا نقطه C جابه‌جا می‌کنیم. اگر $AB = 0.2 \text{ m}$ و $BC = 0.4 \text{ m}$ باشد، مطلوب است:

(الف) نیروی الکتریکی وارد بر بار q ،

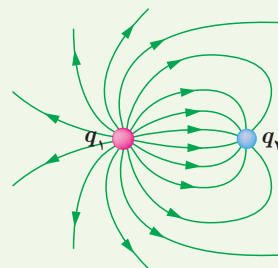
(ب) کاری که نیروی الکتریکی در این جابه‌جایی انجام می‌دهد،
(پ) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار q در این جابه‌جایی.



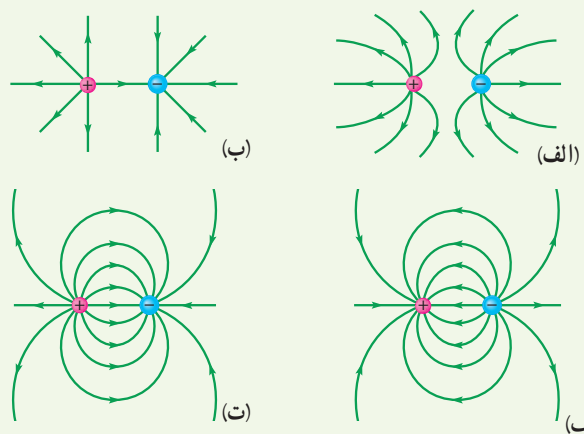
۱۶ در شکل زیر ذره باردار مثبت و کوچکی را از نقطه A به سمت کره باردار که روی پایه عایقی قرار دارد، نزدیک می‌کنیم و در نقطه B قرار می‌دهیم. (الف) در این جابه‌جایی، کار نیروی الکتریکی مثبت است یا منفی؟ (ب) انرژی پتانسیل ذره باردار در این جابه‌جایی چگونه تغییر می‌کند؟ (پ) پتانسیل نقطه‌های A و B را با هم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



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



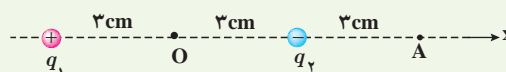
۱۲ در شکل‌های زیر، اندازه دو بار، یکسان ولی علامت آنها مخالف هم است. کدام آرایش‌های خطوط میدان نادرست است؟ دلیل آن را توضیح دهید.



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

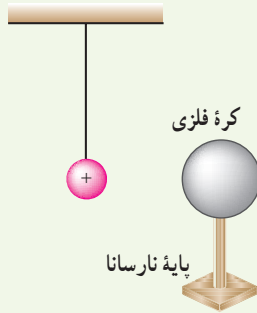
(الف) جهت و اندازه میدان الکتریکی را در نقطه‌های O و A به دست آورید.

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



۹-۱ توزیع بار الکتریکی در اجسام رسانا

۲۰ 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.



۱۰-۱ خازن

۲۱ 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.

۲۲ 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.

۲۳ 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؟

۲۴ 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؟

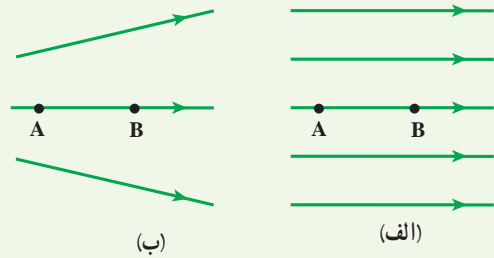
الف) میدان الکتریکی میان صفحه‌ها نصف می‌شود.

ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌ها نصف می‌شود.

پ) ظرفیت خازن دو برابر می‌شود.

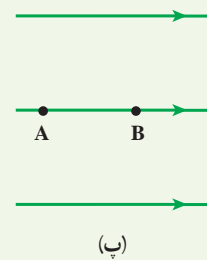
ت) بار روی صفحه‌ها تغییر نمی‌کند.

۱۷ 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.



(ب)

(الف)



(ب)

۱۸ دو صفحه رسانا با فاصله $2/0 \text{ cm}$ را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را به اختلاف پتانسیل 100 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.

۱۹ بار الکتریکی $q = -4.0 \text{ nC}$ از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی $V_1 = -4.0 \text{ V}$ تا نقطه‌ای با پتانسیل $V_2 = -1.0 \text{ V}$ 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.

دو صفحه را به هم وصل کنیم، آیا جرقه حاصل بزرگ‌تر از قبل می‌شود، یا کوچک‌تر و با تغییری نمی‌کند؟ توضیح دهید.

۲۷ ظرفیت خازن تختی 2 nF و بار الکتریکی آن 18 nC است.

الف) انرژی ذخیره‌شده در این خازن چقدر است؟
 ب) بین صفحات خازن هواست. خازن را از باتری جدا و فاصله بین صفحه‌های آن را دو برابر می‌کنیم. انرژی ذخیره‌شده در خازن چقدر افزایش می‌یابد؟

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

۱۱-۱ انرژی خازن

۲۶ 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