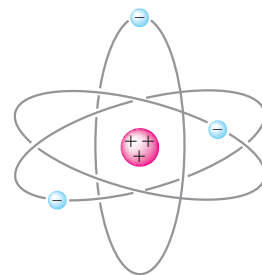


## الکتریسته ساکن



تولید مثل برقی از گل‌ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده‌ها به واسطه نیروی الکتروستاتیکی از یک گل به زنبور عسل می‌چسبند و در طی پرواز زنبور به آن چسبیده می‌مانند و سپس به واسطه همین نیرو به سوی گل دوم می‌جهند.



**شکل ۱-۲** مدل ساده‌ای از اتم؛ بار الکترون‌ها منفی و بار پروتون‌ها مثبت است.

در کتاب‌های علوم دوره راهنمایی و نیز کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، با بارالکتریکی و روش ایجاد بار در اجسام آشنا شدیم و آموختیم که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد که مثبت و منفی نام‌گذاری شده‌اند. براین اساس، بار الکترون منفی و بار پروتون مثبت است (شکل ۱-۲). علاوه بر این، در آزمایش‌های مختلف دیده‌ایم که بار الکتریکی به وجود نمی‌آید و از بین نمی‌رود و فقط از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این اصل، **پایستگی بار الکتریکی** گفته می‌شود. همچنین آموختیم اجسام باردار بر هم نیرو وارد می‌کنند. این نیروها ممکن است ربایشی (جاذبه) یا رانشی (دافعه) باشند. بیشتر نیروهایی که با آنها آشنا هستیم منشأ الکتریکی دارند. به کمک این نیروها می‌توان ساختار اجسام، پیوند بین ذره‌ها و بسیاری از پدیده‌هایی را که در طبیعت رخ می‌دهند، توصیف کرد. دامنه کاربرد الکتریسته در فناوری و صنعت به قدری گسترده است که نیازی به بیان ندارد.

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

## ۲-۱- قانون کولن

همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندید، دو جسم باردار بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. نیرویی که دو جسم باردار بر هم وارد می‌کنند، **نیروی الکتریکی** نام دارد. نیروهای الکتریکی ممکن است ربایشی یا رانشی باشند. دیدیم که اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، یعنی هر دو مثبت یا هر دو منفی باشند، این نیرو، رانشی است. در حالی که اگر بارالکتریکی یک جسم مثبت و بارالکتریکی دیگری منفی باشد، این نیرو، ربایشی خواهد بود.

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

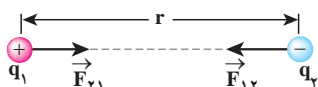


**شکل ۲-۱** ترازوی پیچشی کولن. در دو سر یک میله سبک افقی یک کره کوچک و یک قرص قرار دارد. یک کره مشابه از حفره‌ای به داخل برده می‌شود. نیروی مؤثر بین بارها از اندازه‌گیری زاویه چرخش ترازوی پیچشی تارسیدن به تعادل به دست می‌آید. (تصویر از کتاب مرجع سال ۱۷۸۵ م.)

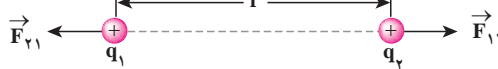
**شار کولن**، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای (شکل ۲-۲) توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آنها بستگی دارند، شناسایی کند و نتیجه آزمایش‌های خود را، که امروزه به نام **قانون کولن** شناخته شده است، به صورت زیر بیان کرد:

بزرگی نیروی الکتریکی ربایشی یا رانشی بین دو ذره با بارهای  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله  $r$  از یکدیگر قرار دارند، با حاصل ضرب اندازه بار دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصله دو ذره از هم، نسبت وارون دارد. بنابراین:

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



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



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

**شکل ۲-۳**

ثابت کولن (k) را می‌توان برحسب یک ضریب ثابت دیگر به نام ضریب گذردهی الکتریکی خلا (ε) نیز نوشت:

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

که در آن

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



شارل آگوستین کولن

شارل آگوستین کولن فرانسوی در ۱۴ ژوئن سال ۱۷۳۶ میلادی (۱۱۱۵ هجری شمسی) به دنیا آمد. او در دانشگاه مباحث متنوعی از قبیل فلسفه، ریاضیات، نجوم و شیمی را آموخت و در سال ۱۷۶۱ از کالج مازارین در پاریس فارغ التحصیل شد. او در طی دوازده سال پس از فارغ التحصیلی شغل‌های متنوعی در شاخه‌های مختلف مهندسی داشت و مدتی را نیز در 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 دزدای به‌طور معکوسی با فاصله بین آنها تغییر می‌کند، به چاپ رساند. نتیجه این آزمایش که به قانون کولن معروف شده است از هر آزمون تجربی‌ای سربلند بیرون آمده است و تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافت نشده است. کولن معتقد بود چنین قانونی برای قطب‌های مغناطیسی نیز برقرار است، گرچه هیچ وقت نتوانست به چنین رابطه‌ای برسد. کولن سرانجام در ۲۳ آگوست سال ۱۸۰۶ میلادی (۱۱۸۵ هجری شمسی) در هفتاد سالگی در پاریس درگذشت. نام کولن یکی از ۷۲ نفری است که روی برج ایفل ثبت شده است.

که در آن  $q_1$  و  $q_2$  بارهای الکتریکی دو ذره برحسب کولن (C)،  $r$  فاصله بین دو ذره برحسب متر (m)،  $F$  بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره برحسب نیوتون (N) است. در این رابطه  $k$  ثابت کولن نام دارد و برابر است با<sup>۱</sup>:

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2 \quad (2-2)$$

در شکل ۲-۳،  $\vec{F}_{12}$  به معنای نیرویی است که ذره اول به ذره دوم وارد می‌کند و  $\vec{F}_{21}$  نیرویی است که ذره دوم به ذره اول وارد می‌کند.

نیروهای الکتریکی که دو ذره باردار به یکدیگر وارد می‌کنند، هم اندازه، در یک راستا و در جهت‌های مخالف یکدیگرند (قانون سوم نیوتون) و داریم:

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

به کمک قانون کولن (رابطه ۱-۲) می‌توان اندازه نیروی الکتریکی‌ای را که دو ذره باردار به یکدیگر وارد می‌کنند، محاسبه کرد. ربایشی یا رانشی بودن نیروها را به کمک نوع بارها مشخص می‌کنیم.

## مثال ۱-۲

دو ذره با بارهای الکتریکی  $q_1 = +2 \mu\text{C}$  و  $q_2 = -5 \mu\text{C}$  در فاصله  $3 \text{ m}$  از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی نیرویی که دو ذره به یکدیگر وارد می‌کنند و نوع آن را مشخص کنید.

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

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

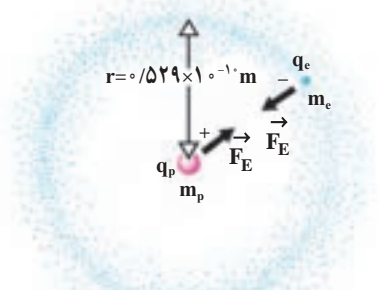
$$= (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \times \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})(5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2}$$

$$= 1 \times 10^{-2} \text{ N}$$

چون بارهای الکتریکی دو ذره ناهمنام هستند، نیرویی که دو ذره به هم وارد می‌کنند، ربایشی است.

۱- در بسیاری از مثال‌ها می‌توان برای سادگی محاسبه، مقدار  $k$  را  $9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$  در نظر گرفت.

مثال ۲-۲



اتم هیدروژن شامل یک الکترون به جرم تقریبی  $9/11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  است که به دور پروتونی به جرم تقریبی  $1/67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  در فاصله متوسط  $0/529 \times 10^{-10} \text{ m}$  از آن می‌چرخد. (الف) بزرگی نیروی الکتریکی بین این دو ذره را محاسبه کنید. (ب) بزرگی نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه و آن را با نیروی الکتریکی مقایسه کنید. ( $G = 6/67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ )

پاسخ:

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

$$F_E = k \frac{|q_p| |q_e|}{r^2} = (8/99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0/529 \times 10^{-10} \text{ m})^2}$$

$$= 8/19 \times 10^{-8} \text{ N}$$

(ب) بزرگی نیروی گرانشی از قانون گرانش عمومی به دست می‌آید که در سال پیش آموختیم:

$$F_G = G \frac{m_p m_e}{r^2} = (6/67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(1/67 \times 10^{-27} \text{ kg})(9/11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(0/529 \times 10^{-10} \text{ m})^2}$$

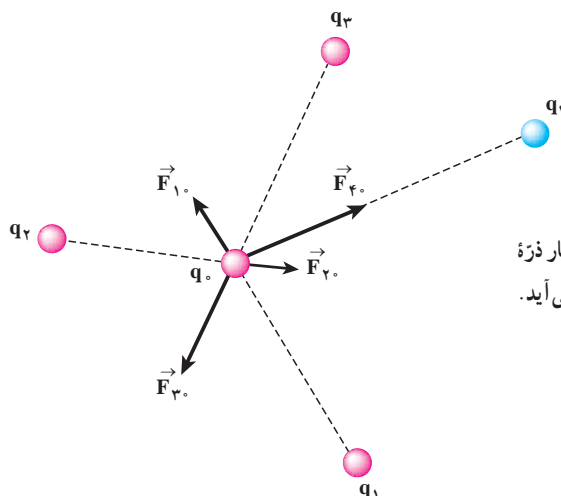
$$= 3/61 \times 10^{-47} \text{ N}$$

در نتیجه نسبت بزرگی این نیروها چنین می‌شود:

$$\frac{F_E}{F_G} = \frac{8/19 \times 10^{-8} \text{ N}}{3/61 \times 10^{-47} \text{ N}} = 2/27 \times 10^{39}$$

این نتیجه نشان‌دهنده آن است که نیروی گرانشی بسیار ضعیف‌تر از نیروهای الکتریکی است.

تجربه نشان می‌دهد اگر تعدادی ذره باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برآیند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر در غیاب سایر ذره‌ها، بر آن ذره وارد می‌کند. برای مثال، شکل ۲-۴ نیروهای وارد بر بار  $q_0$  از سوی چهار بار دیگر را نشان می‌دهد. این موضوع که از آزمایش نتیجه شده است را اصل برهم‌نهی نیروهای کولنی می‌گویند.

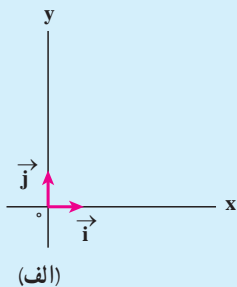


شکل ۲-۴ نیروی وارد بر بار  $q_0$ ، از جمع برداری نیروهایی که چهار ذره باردار دیگر در غیاب بقیه بارها به این ذره وارد می‌کنند، به دست می‌آید.

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

## یادداشت ریاضی

### نمایش یک بردار بر حسب بردارهای یکه و مؤلفه‌های یک بردار روی محور مختصات

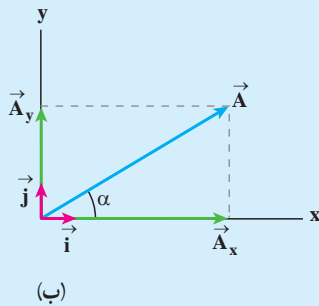


در درس ریاضی خود خوانده‌اید که با انتخاب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  به ترتیب روی محورهای  $x$  و  $y$  (شکل الف) می‌توان یک بردار را بر حسب بردارهای یکه نمایش داد. بردار یکه در راستای هر محور، برداری است به طول واحد و در جهت همان محور.

$$|\vec{i}| = |\vec{j}| = 1 \text{ واحد}$$

اگر اندازه جبری مؤلفه‌های بردار  $\vec{A}$  روی محور  $x$  و  $y$  به ترتیب برابر  $A_x$  و  $A_y$  باشد، این بردار به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\vec{A} = A_x \vec{i} + A_y \vec{j}$$



بنابراین، برای تعیین مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور  $x$  و  $y$  به روش زیر عمل می‌کنیم. مطابق شکل ب از انتهای بردار  $\vec{A}$  خط‌هایی موازی هر یک از دو محور  $x$  و  $y$  رسم می‌کنیم تا محورها را قطع کنند. به این ترتیب بردارهای  $\vec{A}_x$  و  $\vec{A}_y$  به دست می‌آیند که همان مؤلفه‌های بردار  $\vec{A}$  در راستای دو محور است.

با توجه به اینکه زاویه  $\vec{A}$  با محور  $x$  برابر  $\alpha$  است، اندازه جبری مؤلفه‌های  $\vec{A}$  روی دو محور با توجه به رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$\cos \alpha = \frac{A_x}{A} \quad \text{و} \quad \sin \alpha = \frac{A_y}{A}$$

بنابراین

$$A_x = A \cos \alpha \quad \text{و} \quad A_y = A \sin \alpha$$

بزرگی بردار  $\vec{A}$  را می‌توان با استفاده از مثلث قائم‌الزاویه شکل ب به دست آورد:

$$A^2 = A_x^2 + A_y^2$$

و در نتیجه:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

جهت بردار  $\vec{A}$  را با تعیین زاویه این بردار با سوی مثبت محور  $x$  به دست می‌آوریم. اگر در شکل ب تائزات زاویه  $\alpha$

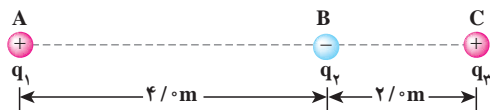
را حساب کنیم، نتیجه می‌شود:

$$\tan \alpha = \frac{A_y}{A_x}$$

توجه کنید این رابطه، دو پاسخ برای  $\alpha$  به دست می‌دهد. پاسخ درست را باید با توجه به علامت اندازه جبری مؤلفه‌های  $\vec{A}$  در راستای دو محور تعیین کرد.

## مثال ۳-۲

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



**پاسخ:** نیرویی 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 غیاب 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  $q_3$  را با  $r_{13}$  و فاصله بین بارهای  $q_2$  و  $q_3$  را با  $r_{23}$  نشان می‌دهیم. با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

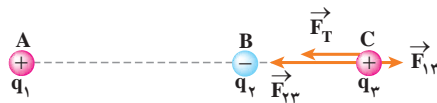
$$F_{13} = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_{13}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) \frac{(2/5 \times 10^{-6} \text{ C})(4/5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(6/5 \text{ m})^2}$$

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

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

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

نیرویی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند، رانشی و نیرویی که بار  $q_3$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند رپایشی است.



مطابق شکل، نیروهای  $\vec{F}_{13}$  و  $\vec{F}_{23}$  در جهت‌های مخالف یکدیگرند و برآیند آنها برابر است با

$$\vec{F}_{T3} = \vec{F}_{23} - \vec{F}_{13}$$

بنابراین بزرگی  $\vec{F}_T$  برابر تفاضل بزرگی آنهاست:

$$F_{T3} = F_{23} - F_{13} = 6/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

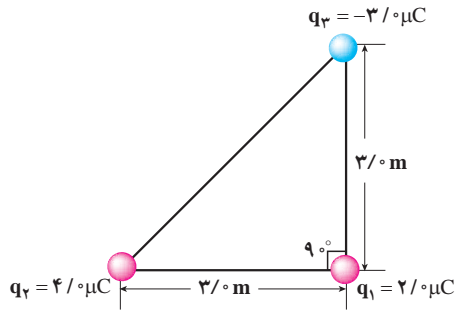
و جهت آن در جهت نیروی بزرگ‌تر ( $\vec{F}_{23}$ ) است. اگر محور x را روی خط واصل سه بار و جهت مثبت آن را به

سمت راست در نظر بگیریم و بردار یکه محور x را،  $\vec{i}$  بنامیم، داریم:

$$\vec{F}_{T3} = (-6/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$

## تمرین ۱-۲

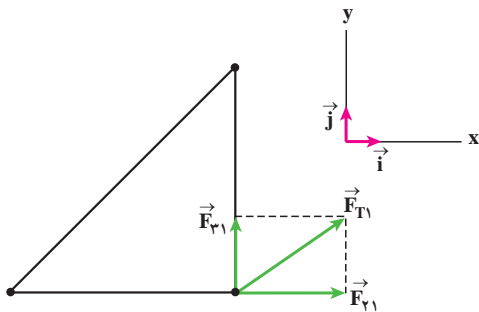
در مثال ۳-۲، نیروی وارد بر بار  $q_2$  را به دست آورید.



سه ذره باردار مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ای ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی وارد بر ذره واقع در رأس قائمه را محاسبه کنید.

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

$$F_{r1} = k \frac{|q_2| |q_1|}{r_{r1}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 8 \times 10^{-3} \text{ N}$$



با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده،  $\vec{F}_{r1}$  در جهت مثبت محور  $x$  است و بنابراین:

$$\vec{F}_{r1} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$

به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای  $q_1$  و  $q_3$  داریم:

$$F_{r1} = k \frac{|q_3| |q_1|}{r_{r1}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(3 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده  $\vec{F}_{r3}$  در جهت مثبت محور  $y$  است و بنابراین،

$$\vec{F}_{r3} = (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

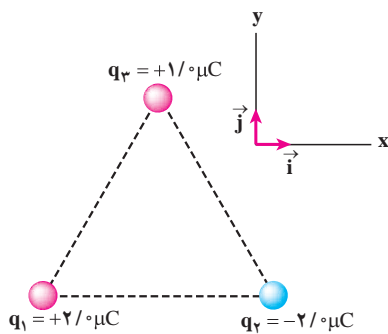
برایند نیروهای الکتریکی وارد بر بار  $q_1$  برابر است با

$$\vec{F}_{T1} = \vec{F}_{r1} + \vec{F}_{r3} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

و بزرگی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{T1} = \sqrt{(8 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (6 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 1 \times 10^{-2} \text{ N}$$

مثال ۲-۵



سه ذره باردار، مطابق شکل در سه رأس مثلث متساوی الاضلاعی به ضلع  $1/5\text{m}$  ثابت شده‌اند.

الف) نیرویی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند  $(\vec{F}_{12})$  را بر حسب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  دستگاه مختصات نشان داده شده در شکل بنویسید.

ب) نیروی  $\vec{F}_{23}$  را نیز بر حسب بردارهای یکه بنویسید.

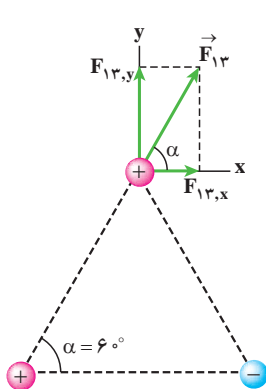
پ) برآیند نیروهای وارد بر بار  $q_2$  را به دست آورید.

پاسخ:

الف) بزرگی نیرویی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به دست می‌آوریم:

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

$$= 18 \times 10^{-3} \text{ N}$$



همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی  $\vec{F}_{12}$  دارای مؤلفه‌های  $x$  و  $y$  است، به‌طوری که:

$$F_{12,x} = F_{12} \cos \alpha = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{12,y} = F_{12} \sin \alpha = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = 15.6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

بنابراین، نیروی  $\vec{F}_{12}$  بر حسب بردارهای یکه به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F}_{12} = (9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (15.6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم:

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

$$= 18 \times 10^{-3} \text{ N}$$

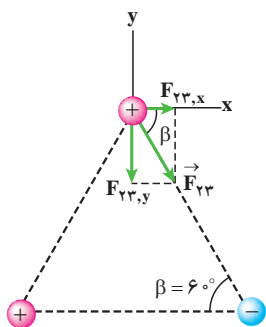
$$F_{23,x} = F_{23} \cos \beta = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{23,y} = -F_{23} \sin \beta = -(18 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = -15.6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

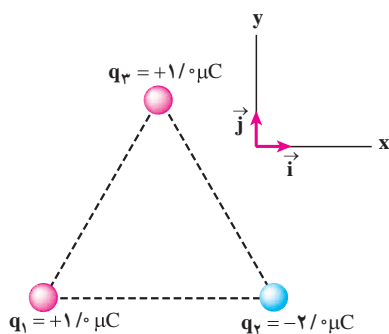
$$\vec{F}_{23} = (9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (15.6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

پ) برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر بار  $q_2$  برابر است با

$$\vec{F}_{T2} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{23} = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$







سه ذره باردار، مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث متساوی‌الاضلاعی به ضلع  $1/5\text{ m}$  ثابت شده‌اند.

الف) نیرویی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند ( $\vec{F}_{12}$ ) را برحسب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  دستگاه مختصات نشان داده شده در شکل بنویسید.

ب) نیروی  $\vec{F}_{23}$  را نیز برحسب بردارهای یکه بنویسید.

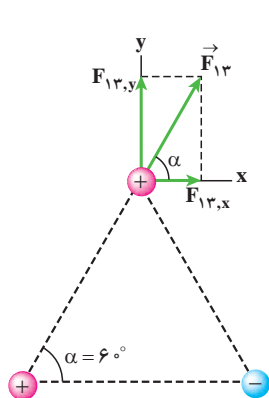
پ) برآیند نیروهای وارد بر بار  $q_2$  را به‌دست آورید.

ت) بزرگی بردار برآیند نیروهای وارد بر بار  $q_2$  چقدر است و این بردار چه زاویه‌ای با محور  $x$  می‌سازد؟

پاسخ:

الف) بزرگی نیرویی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به‌دست می‌آوریم:

$$F_{12} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r_{12}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2} = 4/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$



همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی  $\vec{F}_{12}$  دارای مؤلفه‌های  $x$  و  $y$  است، به‌طوری‌که:

$$F_{12,x} = F_{12} \cos \alpha = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 2/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{12,y} = F_{12} \sin \alpha = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = 3/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

بنابراین، نیروی  $\vec{F}_{12}$  برحسب بردارهای یکه به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F}_{12} = (2/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (3/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

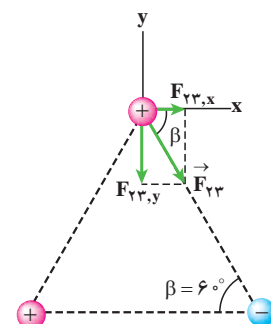
ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم:

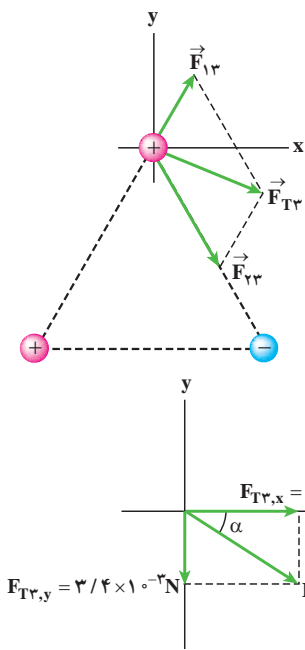
$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/0 \times 10^{-6} \text{ C})(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2} = 8/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{23,x} = F_{23} \cos \beta = (8/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 4/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{23,y} = -F_{23} \sin \beta = -(8/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = -6/9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$\vec{F}_{23} = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (6/9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$





پ) برابری نیروهای وارد بر بار  $q_2$  برابر است با

$$\vec{F}_{T2} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{23} = [(2/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (3/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}] + [(4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (6/9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}] = (6/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (3/4 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

بردار نیروی برابری  $\vec{F}_{T2}$  با استفاده از روش متوازی الاضلاع که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه آموختید در شکل روبه‌رو رسم شده است.

ت) بردار نیروی برابری  $\vec{F}_{T2}$  که در شکل قبل دیدیم را جداگانه همراه با محورهای  $x$  و  $y$  در شکل روبه‌رو به مقیاس رسم می‌کنیم. در این شکل  $\alpha$  زاویه‌ای است که  $\vec{F}_{T2}$  با محور  $x$  می‌سازد.

نخست با استفاده از قضیه فیثاغورس بزرگی  $\vec{F}_{T2}$  را به دست می‌آوریم

$$F_{T2} = \sqrt{F_{T2,x}^2 + F_{T2,y}^2} = \sqrt{(6/0 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (-3/4 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 6/9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

و با استفاده از شکل، می‌توانیم تانژانت زاویه  $\alpha$  را محاسبه کنیم:

$$\tan \alpha = \frac{F_{T2,y}}{F_{T2,x}} = \frac{-3/4 \times 10^{-3} \text{ N}}{6/0 \times 10^{-3} \text{ N}} = -0/57$$

با توجه به مقدار به دست آمده برای  $\tan \alpha$ ، زاویه  $\alpha$  می‌تواند  $3^\circ$  یا  $15^\circ$  باشد. در چنین مواردی با توجه به شکل مسئله مقدار درست زاویه  $\alpha$  را می‌یابیم. در این مسئله با توجه به شکل  $\alpha = -3^\circ$  می‌شود.

## تمرین ۲-۲

برای نیروهای وارد بر بار  $q_1$  در مثال ۲-۶ را بر حسب بردارهای یک‌محاسبه کنید.

توجه کنید که رابطه ۱-۲ برای محاسبه نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار به کار می‌رود. محاسبه نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار که نتوان آنها را ذره فرض کرد (مانند دو کره باردار بزرگ که در فاصله کمی از هم قرار دارند) به چگونگی آرایش (یا توزیع) بار در دو جسم بستگی دارد و محاسبه آن نیازمند ریاضیات پیشرفته‌تری است. اگر فاصله جسم باردار از ذره باردار (یا جسم باردار دیگر) آن قدر زیاد باشد که ابعاد جسم در مقایسه با فاصله بین آنها قابل چشم‌پوشی باشد، می‌توان جسم را مانند یک ذره باردار در نظر گرفت و از رابطه ۱-۲ برای محاسبه نیروی الکتریکی استفاده کرد.

## ۲-۲- میدان الکتریکی

در بخش ۱-۲ دیدیم که دوبار الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار دارند، بر هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. ولی این پرسش مطرح می‌شود که بار  $q_2$  چطور حضور بار  $q_1$  را حس می‌کند. به عبارت دیگر این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می‌توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ چطور ممکن است چنین کنش از راه دوری وجود داشته باشد، بی‌آنکه بارها هیچ تماسی با یکدیگر داشته باشند؟ به این پرسش این طور می‌توان پاسخ گفت که بار  $q_1$  خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می‌کند که به آن اصطلاحاً **میدان الکتریکی** بار  $q_1$  گفته می‌شود. در واقع اگر بار  $q_2$  را در هر 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 این شکل 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 زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (۳-۲)$$

بنابراین تعریف میدان الکتریکی (رابطه ۳-۲)، میدان الکتریکی کمیتی برداری است که بزرگی آن برابر  $E = \frac{F}{q_0}$  و جهت آن همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون (بار کوچک و مثبت) است. در رابطه ۳-۲ یکای نیرو ( $\vec{F}$ )، نیوتون (N)، و یکای بار آزمون ( $q_0$ )، کولن (C) است و در نتیجه یکای میدان الکتریکی ( $\vec{E}$ )، نیوتون بر کولن (N/C) می‌شود.

## مثال ۷-۲

برای تعیین میدان الکتریکی در نقطه‌ای از فضا بار آزمون  $2 \times 10^{-9} \text{ C}$  را در آن نقطه قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی  $5 \times 10^{-3} \text{ N}$  در راستای جنوب - شمال و به طرف شمال بر این بار وارد می‌شود. بزرگی و جهت میدان الکتریکی در این نقطه را مشخص کنید.

**پاسخ:** از رابطه ۳-۲ می‌توان بزرگی میدان الکتریکی در نقطه مورد نظر را محاسبه کرد.

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ N}}{2 \times 10^{-9} \text{ C}} = 2.5 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

جهت میدان در نقطه مورد نظر هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون، یعنی رو به شمال است.

## ۲-۳- 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، محاسبه کنیم (شکل ۲-۵). برای این محاسبه از رابطه ۲-۳ ( $\vec{E} = \vec{F}/q$ ) استفاده می‌کنیم. اگر بار آزمون  $q$  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 جای‌گذاری در رابطه ( $\vec{E} = \vec{F}/q$ )، بزرگی میدان الکتریکی بار  $q$  را در نقطه  $A$  به دست می‌آوریم.

**شکل ۲-۵** می‌خواهیم میدان حاصل از بار  $q$  را در نقطه  $A$  محاسبه کنیم.



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

در نتیجه :

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad (۲-۴)$$

رابطه ۲-۴ 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 مجذور فاصله از آن، نسبت وارون دارد. همان‌طور که پیش‌تر دیدیم جهت بردار میدان الکتریکی  $\vec{E}$  در نقطه  $A$ ، در همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون است که به‌طور ذهنی در نقطه  $A$  می‌گذاریم.

### مثال ۲-۸

بزرگی میدان الکتریکی ذره‌ای با بار  $2 \mu\text{C}$  را در نقطه  $M$  به فاصله الف ( $2 \text{ m}$ ) و ب ( $1 \text{ m}$ ) از این بار الکتریکی محاسبه کنید و بردار میدان را در این نقطه برای حالت الف رسم کنید.

**پاسخ :** با استفاده از رابطه ۲-۴ اندازه میدان را در نقطه‌های موردنظر، به دست می‌آوریم :

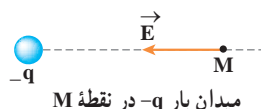
$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad \text{الف)}$$

$$E_1 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \text{ m})^2} = 45 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

ب)

$$E_2 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1 \text{ m})^2} = 45 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

برای رسم بردار میدان در نقطه  $M$  بار آزمون را در آن نقطه فرض می‌کنیم. چون بار  $q$  منفی است، بار آزمون فرضی را جذب می‌کند. میدان بار  $q$  در جهت همین نیروست که در شکل زیر نشان داده شده است.



در بخش ۱-۲ دیدیم اگر چند بار نقطه‌ای مانند  $q_1, q_2, \dots$  داشته باشیم برآیند نیروهای الکتریکی حاصل از این بارها بر بار آزمون  $q_0$  با استفاده از اصل برهم نهی نیروهای کولنی از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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:

$$\frac{\vec{F}_T}{q_0} = \frac{\vec{F}_1}{q_0} + \frac{\vec{F}_2}{q_0} + \dots$$

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

(۵-۲)

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.

## مثال ۲-۵

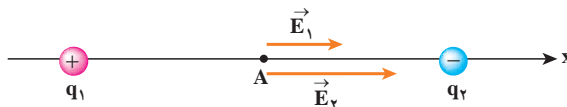
دو ذره با بارهای  $q_1 = 4 \mu\text{C}$ ،  $q_2 = -6 \mu\text{C}$  در فاصله  $8 \text{ m}$  از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به دست آورید:

(الف) در وسط خط واصل دو ذره،

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

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

(الف) در شکل زیر اگر بار آزمون را در نقطه A واقع در وسط خط واصل دو ذره قرار دهیم، بار  $q_1$  آن را می‌راند و بار  $q_2$  آن را می‌رباید. 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.



با استفاده از اصل برهم نهی 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 ۴-۲ ( $E = k|q|/r^2$ ) به دست می‌آوریم:

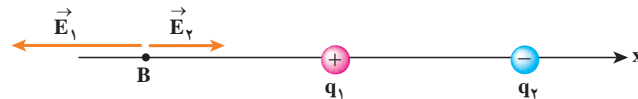
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_r = k \frac{|q_r|}{r_r^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 3.4 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین :

$$\vec{E}_A = (2.2 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (3.4 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (5.6 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

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



با استفاده از اصل برهم نهی میدان‌های الکتریکی داریم :

$$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_r = -E_1 \vec{i} + E_r \vec{i}$$

که در آن  $E_1$  و  $E_r$  برابرند با

$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(8 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 5.6 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_r = k \frac{|q_r|}{r_r^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1.6 \text{ m})^2} = 2.1 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین :

$$\vec{E}_B = (-5.6 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (2.1 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (-3.5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

## مثال ۱-۲

دو ذره با بارهای  $q_1 = +5 \text{ nC}$  و  $q_2 = -5 \text{ nC}$  در فاصله  $a = 16 \text{ cm}$  از یکدیگر ثابت شده‌اند. میدان الکتریکی را روی عمود منصف خطی که دو ذره را به یکدیگر وصل می‌کند و به فاصله  $x = 6 \text{ cm}$  از وسط خط واصل دو ذره، به دست آورید. به مجموعه این دو بار الکتریکی، **دو قطبی الکتریکی** گفته می‌شود.

**پاسخ :** همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، میدان الکتریکی حاصل از این دو بار، در نقطه موردنظر هم‌اندازه‌اند.

$$r_1 = r_2 = \sqrt{a^2 + x^2} = \sqrt{(16 \text{ cm})^2 + (6 \text{ cm})^2} = 17 \text{ cm}$$

با استفاده از رابطه ۲-۴ داریم :

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

$$E_1 = E_2 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(5 \times 10^{-9} \text{ C})}{(1.7 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 1.5 \times 10^4 \text{ N/C}$$

در نتیجه برای مؤلفه‌های میدان در نقطه M داریم :

$$E_{1x} = -E_{2x} = E_1 \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{x}{r_1} = \frac{6/10 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 0.6$$

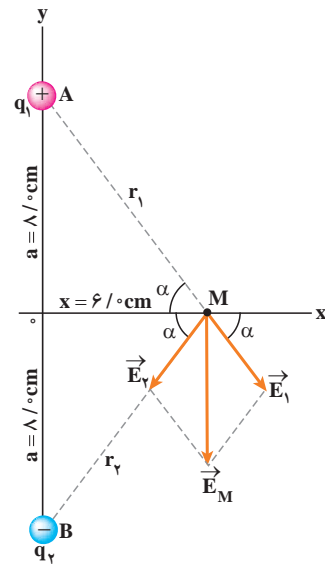
$$E_{1x} = -E_{2x} = (4/5 \times 10^4 \text{ N/C})(0.6) = 2.4 \times 10^4 \text{ N/C}$$

و

$$E_{1y} = E_{2y} = -E_1 \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{a}{r_1} = \frac{8/10 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 0.8$$

$$E_{1y} = E_{2y} = -(4/5 \times 10^4 \text{ N/C})(0.8) = -3.2 \times 10^4 \text{ N/C}$$

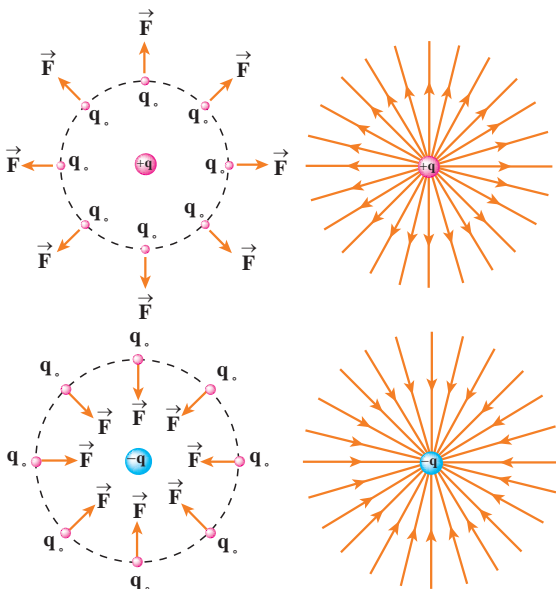


با توجه به اینکه  $E_{1x} = -E_{2x}$  است، مؤلفه  $x$  میدان الکتریکی برآیند صفر است، و با توجه به اینکه  $E_{1y} = E_{2y}$  است، مؤلفه  $y$  میدان الکتریکی برآیند  $2E_{1y}$  است و داریم:

$$\vec{E} = 2E_{1y} \vec{j} = 2 \times (-3.2 \times 10^4 \text{ N/C}) \vec{j} = (-6.4 \times 10^4 \text{ N/C}) \vec{j}$$

### تمرین ۳-۲

میدان الکتریکی حاصل از دوقطبی مثال ۲-۱ را در نقطه‌ای روی محور دوقطبی (محور  $y$ ) و به فاصله  $16 \text{ cm}$  از مرکز دوقطبی (نقطه مبدأ) به دست آورید.



### ۲-۴- خطوط میدان الکتریکی

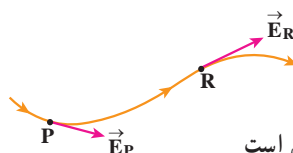
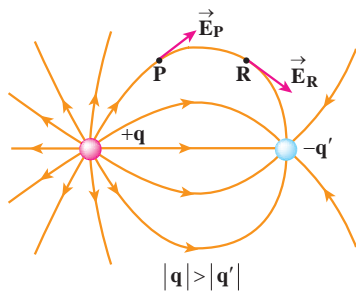
پیش از این دیدیم بارهای الکتریکی در فضای پیرامون خود میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند. برای مجسم کردن میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام دارای بار، از خط‌های جهت‌داری موسوم به **خطوط میدان الکتریکی** استفاده می‌کنیم.

این خط‌ها دارای ویژگی‌های زیرند:

۱- خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون (مثبت) واقع در آن نقطه‌اند. در نتیجه، جهت این خط‌ها برای بار مثبت روبه خارج و برای بار منفی روبه داخل است. (شکل ۲-۶)

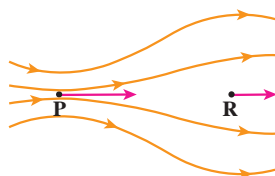
**شکل ۲-۷** خط‌های میدان الکتریکی در هر نقطه هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون مثبت واقع در آن نقطه است.

۲- میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است (شکل ۲-۷).



**شکل ۲-۷** میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است.

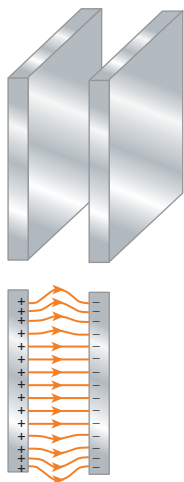
۳- در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خط‌های میدان به یکدیگر نزدیک‌تر و فشرده‌ترند (شکل ۲-۸).



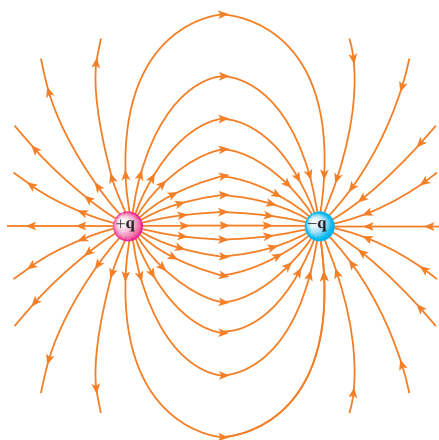
**شکل ۲-۸** در نقطه P خطوط میدان به یکدیگر نزدیک‌ترند، و بنابراین  $E_P > E_R$  است.

۴- خط‌های میدان یکدیگر را قطع نمی‌کنند؛ یعنی از هر نقطه فقط یک خط میدان می‌گذرد. به بیان دیگر، در هر نقطه فضا فقط یک میدان الکتریکی وجود دارد که همان میدان الکتریکی برآیند است.

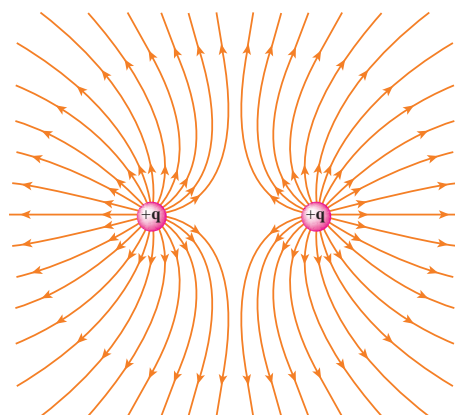
در شکل ۲-۹ خطوط میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



(پ) میدان بین دو صفحه رسانای موازی با بارهای هم‌اندازه و ناهمنام (نمونه‌ای از یک میدان یکنواخت)



(ب) دو بار الکتریکی ناهمنام و هم‌اندازه



(الف) دو بار الکتریکی مثبت و هم‌اندازه

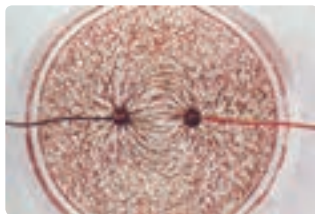
**شکل ۲-۹** میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار



## مشاهده طرح خطوط میدان الکتریکی

وسایله های آزمایش: ظرف پلاستیکی یا شیشه ای با ابعاد مناسب، پارافین مایع یا روغن مایع خوراکی، مولد واندوگراف یا هر مولد ولتاژ بالای دیگر، سیم های رابط با پوشش عایق ضخیم، الکترودهایی با شکل های مختلف (می توانید الکترودها را با ورقه آلومینیومی ضخیم بسازید)، بذر چمن.

## شرح آزمایش:



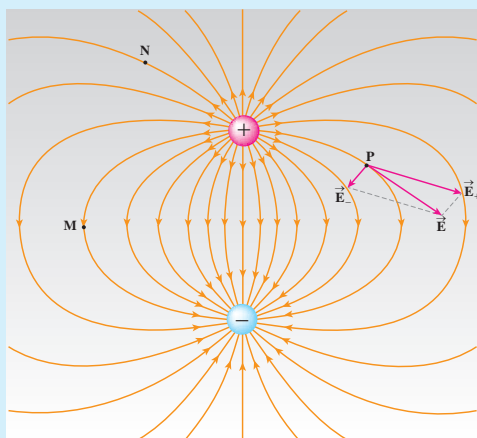
(الف)



(ب)

- ۱- روغن را در ظرف شیشه ای یا پلاستیکی بریزید.
- ۲- دو الکتروود را به صورت دو گلوله فلزی درآورید و درون روغن قرار دهید. سپس الکترودها را با سیم های رابط به پایانه های خروجی مولد واندوگراف وصل کنید.
- ۳- مولد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای بین دو الکتروود بپاشید.
- ۴- اکنون به سمت گیری دانه های بذر در فضای بین دو الکتروود توجه کنید (شکل الف)
- و با استفاده از آن طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکتروود رسم کنید.
- ۵- این بار دو الکتروود را به صورت دو صفحه موازی درون ظرف روغن قرار دهید و آنها را با سیم های رابط به پایانه های خروجی مولد واندوگراف وصل کنید.
- ۶- مولد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای میان دو الکتروود بپاشید.
- ۷- دوباره به سمت گیری دانه های بذر در فضای میان دو الکتروود توجه کنید (شکل ب)
- و با استفاده از آن، طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکتروود رسم کنید.
- ۸- برای آنکه بتوانید طرح خطوط میدان را به صورت سه بُعدی ببینید، به جای بذر چمن از بریده های کوچک نخ استفاده کنید و آن را پیش از انجام آزمایش در ظرف شیشه ای شفاف با عمق مناسب که حاوی روغن است کاملاً به هم بزنید و سپس الکترودها را مطابق آزمایش های قبل به مولد واندوگراف متصل کنید.

## فعالیت ۱-۲



- ۱- در شکل ۲-۹ پ میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه و دور از لبه های آن، یکنواخت است. با توجه به تعریف میدان الکتریکی و ویژگی های خط های میدان، برای میدان الکتریکی یکنواخت تعریفی بیان کنید.
- ۲- در شکل روبه رو میدان الکتریکی برابند یک دو قطبی الکتریکی در نقطه P رسم شده است. میدان برابند در نقطه های M و N را به دقت رسم کنید.

## ۲-۵- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی

گرچه برای تعریف میدان الکتریکی یک جسم باردار از بار آزمون مثبت استفاده کردیم  $(\vec{E} = \vec{F}/q)$  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 که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (۲-۶)$$

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.

### مثال ۲-۱۱

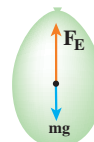
در بادکنکی به جرم  $g = ۱۰^{-۵}$  بار الکتریکی  $۲۰۰ \text{ nC}$  ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، به طوری که نیروی وزن بادکنک با نیروی الکتریکی وارد بر آن موازنه شود. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را تعیین کنید. ( $g = ۹/۸۰ \text{ m/s}^2$ )

**پاسخ:** برای اینکه نیروی الکتریکی با وزن بادکنک موازنه شود باید نیروی الکتریکی در خلاف جهت وزن بادکنک به آن وارد شود و بزرگی آن با وزن بادکنک برابر باشد<sup>۱</sup>:

$$F_E = mg$$

$$|q|E = mg$$

$$\Rightarrow E = \frac{mg}{|q|} = \frac{(۱۰^{-۵} \times ۱۰^{-۳} \text{ kg})(۹/۸۰ \text{ N/kg})}{۲۰۰ \times ۱۰^{-۹} \text{ C}} = ۴/۹۰ \times ۱۰^۵ \text{ N/C}$$

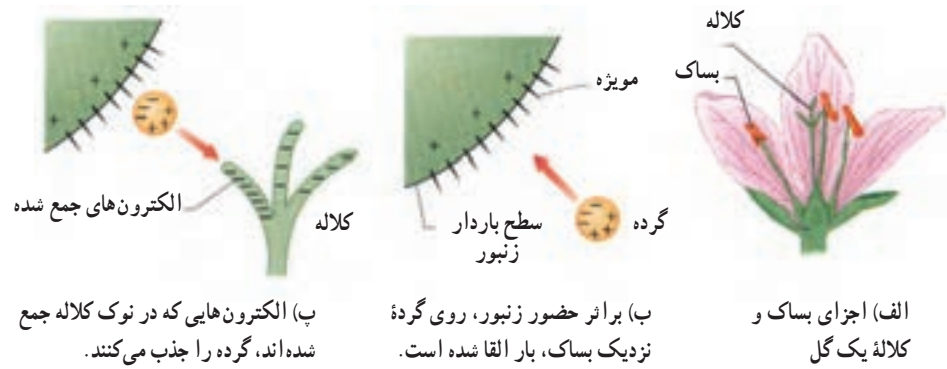


با توجه به رابطه  $\vec{F} = q\vec{E}$  و منفی بودن  $q$ ، جهت میدان الکتریکی در خلاف جهت نیروی الکتریکی و بنابراین، مستقیماً روبه پایین است.

## زنبرک‌های عسل و گرده افشانی گل‌ها: زنبرک‌های عسل معمولاً در حین پرواز دارای بار

مثبت می‌شوند و وقتی به گرده بدون باری روی بساک یک گل (شکل ۲-۱۰ الف) می‌رسند که از لحاظ الکتریکی خنثی است، میدان الکتریکی آنها روی گرده بارهای مثبت و منفی القای می‌کند، به طوری که آن سمت گرده که به طرف زنبرک است دارای بار منفی می‌شود و به این ترتیب گرده به سوی زنبرک کشیده می‌شود (شکل ۲-۱۰ ب). گرده‌ها روی موئدهای ریز زنبرک قرار می‌گیرند و سپس وقتی زنبرک در اطراف کلاله گل دیگری پرواز می‌کند، بارهایی منفی را بر روی کلاله القا می‌کند. هرگاه نیروی الکتریکی وارد از کلاله بزرگ‌تر از نیروی الکتریکی وارد از زنبرک بر گرده باشد، گرده به سمت کلاله گل کشیده می‌شود (شکل ۲-۱۰ پ) و گرده افشانی صورت می‌پذیرد.

۱- در حل این مسئله از نیروی شناوری که هوا به بادکنک وارد می‌کند چشم‌پوشی کرده‌ایم.



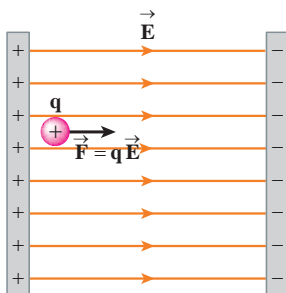
شکل ۱-۲

## فعالیت ۲-۲

رسوب‌دهنده‌های الکتروستاتیکی، دود و غبار را از گازهای زائدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌آید، جدا می‌سازند. در مورد چگونگی کار این رسوب‌دهنده‌ها تحقیق کنید.

## ۶-۲- انرژی پتانسیل الکتریکی

شکل ۲-۱ // ذره با بار  $+q_2$  در میدان الکتریکی فضای اطراف بار  $+q_1$  رها شده است.



شکل ۲-۲ // بار الکتریکی  $+q$  از مجاورت صفحه مثبت رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.



شکل ۲-۳ // جسم از نزدیکی سطح زمین رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.

آرایش دو ذره باردار الکتریکی شکل ۲-۱ 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. به نظر شما این انرژی جنبشی از کجا آمده است؟ طبق قانون پایستگی انرژی، انرژی جنبشی نمی‌تواند خود به خود به وجود آمده باشد. این انرژی، ناشی از انرژی پتانسیلی است که به نیروی الکتریکی بین دو ذره آرایش شکل ۲-۱ وابسته است و به آن **انرژی پتانسیل الکتریکی** می‌گوییم. برای آنکه به توصیفی کمی از این انرژی دست یابیم، میدان الکتریکی یکنواختی را مطابق شکل ۲-۲ در نظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحه باردار برقرار شده است. اگر بار الکتریکی  $+q$  را از مجاورت صفحه مثبت رها کنیم، به طرف صفحه منفی شروع به حرکت می‌کند و به تدریج سرعت و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد. این وضعیت شبیه چیزی است که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم. در آنجا نیز مشاهده کردیم که وقتی جسمی به جرم  $m$  از ارتفاع  $h$  رها می‌شود، جسم روبه پایین حرکت کرده و انرژی جنبشی آن بر اثر کاهش انرژی پتانسیل گرانشی به تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۲-۱۳). همچنین دیدیم تغییر انرژی پتانسیل گرانشی برابر با منفی کار نیروی گرانشی است.

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

$$\Delta U_E = -W_E \quad (2-7)$$

گرچه این رابطه برای یک میدان الکتریکی یکنواخت بیان شد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر میدان الکتریکی ناشی از بارهای ساکن (میدان الکتروستاتیکی) برقرار است.

### تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک بار ذره‌ای در میدان الکتریکی یکنواخت :

ذره‌ای  $q$  را در میدان الکتریکی یکنواخت  $\vec{E}$  در نظر بگیرید که مطابق شکل ۱۴-۲ جابه‌جایی  $\vec{d}$  را انجام داده است. کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی از رابطه زیر به دست می‌آید :

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

با توجه به اینکه  $\vec{F}_E = q \vec{E}$  است، این رابطه به صورت زیر می‌آید :

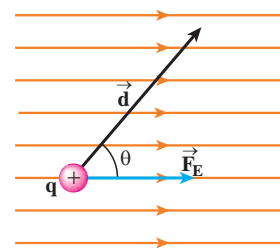
$$W_E = |q| E d \cos \theta$$

اکنون با استفاده از رابطه ۷-۲ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار ذره‌ای  $q$  چنین محاسبه می‌شود :

$$\Delta U_E = -W_E = -|q| E d \cos \theta$$

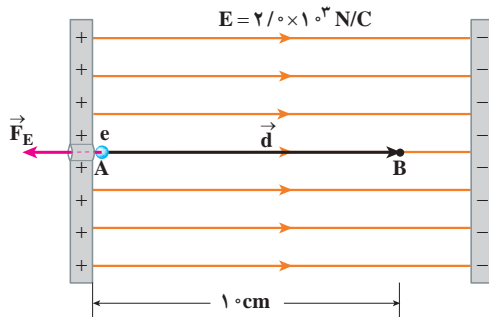
(۸-۲)

که در آن،  $\theta$  زاویه بین نیروی  $\vec{F}_E$  و جابه‌جایی  $\vec{d}$  است. 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 رابطه ۸-۲ چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است. به این منظور، مثال زیر را ملاحظه کنید.



شکل ۱۴-۲ نیروی الکتریکی وارد بر بار  $+q$  در حین جابه‌جایی  $\vec{d}$  درون میدان الکتریکی یکنواخت.

### مثال ۱۲-۲



در میدان الکتریکی یکنواخت نشان داده شده در شکل، الکترونی از نقطه A با سرعت  $v_0$  پرتاب شده است. الکترون سرانجام در نقطه B متوقف می‌شود. بار الکترون  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و جرم آن  $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$  است.

الف) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون در این جابه‌جایی

چه مقدار است؟

ب) سرعت پرتاب الکترون را پیدا کنید.

پاسخ :

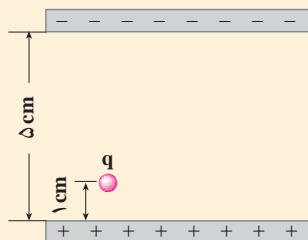
الف) با توجه به رابطه ۸-۲ داریم :

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

ب) طبق قضیه کار و انرژی می‌توان نوشت :

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

$$-3.2 \times 10^{-17} \text{ J} = \frac{1}{2} (9.1 \times 10^{-31} \text{ kg})(-v_0^2) \Rightarrow v_0 = 8.4 \times 10^6 \text{ m/s}$$



مطابق شکل، یک غبار که دارای بار الکتریکی  $1/0 \times 10^{-15} \text{ C}$  و جرم  $1/0 \times 10^{-8} \text{ g}$  است در میدان الکتریکی یکنواخت  $1/2 \times 10^5 \text{ N/C}$  بین دو صفحه افقی قرار گرفته است. اگر غبار در ابتدا ساکن و به فاصله  $1/0 \text{ cm}$  از صفحه پایینی قرار داشته باشد، در چه مدتی به صفحه بالایی می‌رسد؟

## ۲-۲- پتانسیل الکتریکی

در رابطه ۲-۸ دیدیم که تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی برای هر ذره باردار (چه مثبت و چه منفی) علاوه بر بزرگی میدان الکتریکی و جابه‌جایی ذره، به بار الکتریکی آن نیز 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** دو نقطه‌ای می‌گوییم که ذره میان آنها جابه‌جا شده است و آن را با  $\Delta V$  نمایش می‌دهیم:

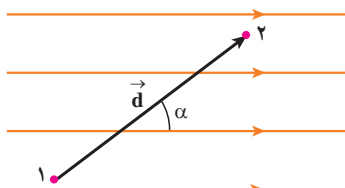
$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \quad (2-9)$$

در این رابطه، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی ( $\Delta U$ ) بر حسب ژول ( $J$ )، بار الکتریکی ( $q$ ) بر حسب کولن ( $C$ ) و اختلاف پتانسیل الکتریکی ( $\Delta V$ ) بر حسب ژول بر کولن ( $J/C$ ) است که آن را **ولت** می‌نامند و با نماد  $V$  نمایش می‌دهند.

توجه کنید که در این رابطه، علامت  $q$  در نظر گرفته می‌شود. همچنین دقت کنید که هرچند این رابطه برای میدان الکتریکی یکنواخت به‌دست آمده است، اما برای تمامی میدان‌های الکتروستاتیکی نیز برقرار است. با استفاده از روابط ۲-۸ و ۲-۹ می‌توان نشان داد در میدان الکتریکی یکنواخت شکل ۲-۱۵ داریم:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = -E d \cos \alpha \quad (2-10)$$

در این رابطه، اختلاف پتانسیل ( $\Delta V$ ) بر حسب ولت ( $V$ )، میدان الکتریکی ( $E$ ) بر حسب ولت بر متر ( $V/m$ )، جابه‌جایی ( $d$ ) بر حسب متر ( $m$ ) و  $\alpha$  زاویه بین میدان الکتریکی و جابه‌جایی است. همان‌طور که مشخص است این رابطه به ازای  $\alpha = 0$  به  $\Delta V = -Ed$  می‌انجامد.



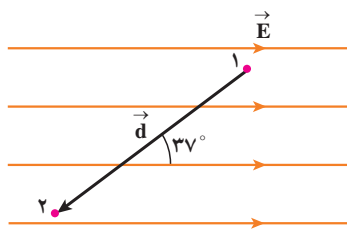
شکل ۲-۱۵ در این شکل  $\alpha$  زاویه بین میدان الکتریکی و جابه‌جایی است.

## فعالیت ۲-۳

- الف) درستی رابطه ۲-۱۰ را یک بار برای بار مثبت و یک بار برای بار منفی نشان دهید.  
 ب) نشان دهید یکاهای «نیوتون بر کولن» و «ولت بر متر» که برای میدان الکتریکی به کار می‌روند، معادل یکدیگرند.

از فعالیت ۲-۳ الف درمی‌یابیم با حرکت در سوی خطوط میدان، از پتانسیل الکتریکی بیشتر به پتانسیل الکتریکی کمتر رفته‌ایم و بالعکس.

مثال ۲-۱۳



در میدان الکتریکی یکنواخت شکل مقابل که بزرگی آن  $E = 5 \times 10^5 \text{ V/m}$  است :

الف) اختلاف پتانسیل الکتریکی بین نقاط ۱ و ۲ را بیابید.

ب) اگر بار نقطه‌ای  $q = +2 \text{ nC}$  از نقطه ۱ به نقطه ۲ جابه‌جا شود، تغییر انرژی

پتانسیل الکتریکی آن و کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی را به دست آورید.  $d = 1 \text{ cm}$

و  $\cos 37^\circ = 0.8$

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۲-۱۰ داریم :

$$\Delta V = V_2 - V_1 = -E d \cos \alpha$$

دقت کنید که زاویه بین خطوط میدان و جابه‌جایی و برابر با  $\alpha = 180^\circ - 37^\circ$  است؛ در نتیجه داریم :

$$\Delta V = -(5 \times 10^5 \text{ V/m})(1 \times 10^{-2} \text{ m})(-0.8) = 4 \times 10^4 \text{ V}$$

ب) با استفاده از رابطه ۲-۹ داریم :

$$\Delta U = q \Delta V = (2 \times 10^{-9} \text{ C})(4 \times 10^4 \text{ V}) = 8 \times 10^{-5} \text{ J} = 8 \mu\text{J}$$

و از آنجا

$$W_E = -\Delta U = -8 \mu\text{J}$$

در تشابه با انرژی پتانسیل گرانشی، در اینجا نیز می‌توانیم برای انرژی پتانسیل الکتریکی مرجعی

اختیار کنیم. در نقطه مرجع، انرژی پتانسیل الکتریکی ذره باردار، صفر و پتانسیل الکتریکی در آن

نقطه نیز صفر است. بنابراین، پتانسیل الکتریکی (V) در هر نقطه از میدان به صورت زیر می‌شود :

$$V = \frac{U}{q} \quad (2-11)$$

شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا رادیو از آنها استفاده می‌شود و

نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها معمولاً ۱/۵ ولتی، ۴/۵ ولتی یا ۹ ولتی اند. باتری خودروهای

سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ ولتی یا بیشترند. هر باتری دو پایانه دارد که یکی مثبت

و دیگری منفی است. وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی اختلاف پتانسیل الکتریکی

بین پایانه‌های منفی و مثبت آن برابر ۱۲ ولت است. اگر پتانسیل پایانه منفی را با  $V_-$  و پتانسیل پایانه

مثبت را با  $V_+$  نشان دهیم، داریم :

$$\Delta V = V_+ - V_- = 12 \text{ V}$$

بنابراین، پتانسیل پایانه مثبت به اندازه ۱۲ ولت از پتانسیل پایانه منفی آن بیشتر است. مثلاً اگر

پتانسیل پایانه منفی را برابر با  $-4 \text{ V}$  یا  $+4 \text{ V}$  فرض کنیم، پتانسیل پایانه مثبت به ترتیب برابر  $+8 \text{ V}$  یا  $+16 \text{ V}$

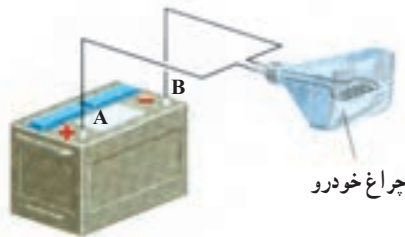
خواهد شد. می‌توان پایانه منفی را مرجع پتانسیل در نظر گرفت؛ در این صورت، پتانسیل پایانه مثبت برابر

$+12 \text{ V}$  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.

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

## مثال ۲-۱۴



اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر ۱۲۷ است. اگر در مدت ۱ s بار الکتریکی ۵۰- کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟  
پاسخ: با استفاده از رابطه ۲-۹ داریم:

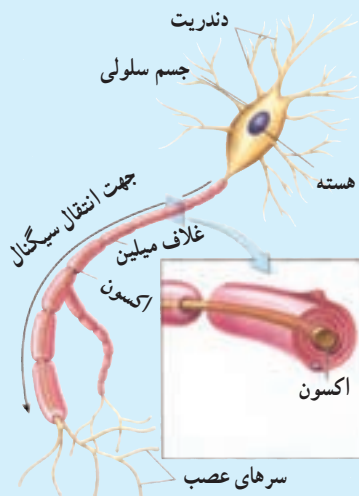
$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

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

$$= (-50\text{C})(+127\text{V}) = -6350\text{J}$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه  $6350\text{J}$  کاهش یافته است.

## فعالیت ۲-۴



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 نیز 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 سلول‌های عصبی موسوم به نورون (شکل مقابل) هستند. درباره چگونگی کار نورون‌ها تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

**کار انجام شده توسط نیروی خارجی:** فرض کنید در یک میدان الکتریکی ذره‌ای با

بار  $q$  را با اعمال نیرویی از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر جابه‌جا می‌کنیم (شکل ۲-۱۶). در حین این حرکت، نیروی خارجی ما کار خارجی  $W_{\text{خارجی}}$  را روی بار انجام می‌دهد، درحالی که نیروی الکتریکی نیز کار  $W_E$  را روی آن انجام داده است. با استفاده از قضیه کار-انرژی، تغییر انرژی جنبشی بار  $q$  چنین می‌شود:

$$\Delta K = W_{\text{خارجی}} + W_E$$



حال فرض کنید که بار  $q$  پیش و پس از این حرکت ساکن باشد. آنگاه معادله بالا به صورت زیر درمی آید:

$$W_{\text{خارجی}} = -W_E = q \Delta V \quad (۱۲-۲)$$

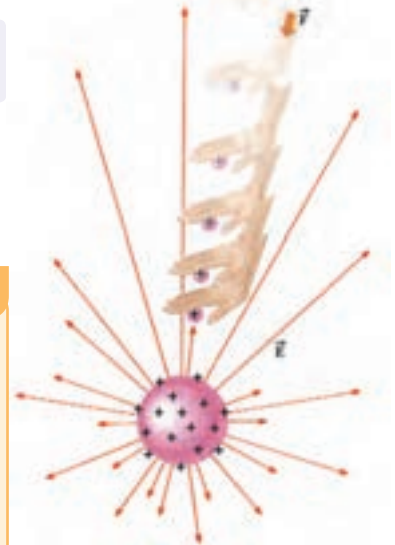
که در آن از رابطه های ۲-۷ ( $W_E = -\Delta U_E$ ) و ۲-۹ ( $\Delta U = q\Delta V$ ) استفاده کرده ایم. بسته به علامت و بزرگی  $q$  و  $\Delta V$ ، کار خارجی  $W_{\text{خارجی}}$  می تواند مثبت، منفی یا صفر باشد.

### تمرین ۲-۷

در شکل ۲-۱۶

الف) کار نیروی دست، مثبت است یا منفی؟

ب) آیا بار مثبت به نقطه ای با پتانسیل بیشتر حرکت کرده است یا به نقطه ای با پتانسیل کمتر؟ توضیح دهید.



شکل ۲-۱۶ نیروی دست، بار  $q$  را در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه جا می کند.

## ۲-۸- توزیع و القای بار در رساناها

جسم رسانایی را در نظر بگیرید که توسط عایقی از محیط اطراف خود جدا شده است (به این رسانا اصطلاحاً **رسانای منزوی** گفته می شود). اگر باری اضافی به این جسم رسانا داده شود، و یا آن جسم در یک میدان الکتریکی خارجی قرار گیرد پس از مدت زمان کوتاهی (از مرتبه  $10^{-9}$  s) میدان الکتریکی داخل رسانا صفر می شود. در ادامه این دو وضعیت را بررسی می کنیم.

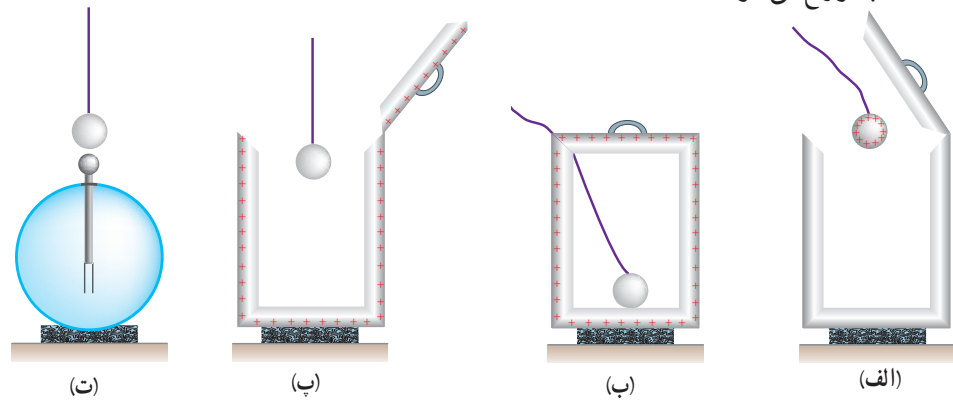
**الف) رسانای باردار:** نخستین بار **بنیامین فرانکلین** برای پی بردن به اینکه بار الکتریکی داده شده به رسانای منزوی چگونه در آن توزیع می شود، آزمایشی را در سال ۱۷۵۵ میلادی انجام داد. تقریباً ۸۰ سال بعد (۱۸۳۶ میلادی) این آزمایش توسط **مایکل فارادی** انگلیسی به گونه ای دیگر تکرار شد.

**آزمایش فارادی:** ظرف رسانایی با درپوش فلزی را در نظر بگیرید که روی پایه نارسنایی قرار دارد و روی درپوش آن دسته ای عایق نصب شده است. ابتدا ظرف بدون بار است. یک گوی فلزی را که از نخ عایق آویزان است باردار و سپس وارد ظرف می کنیم (شکل ۲-۱۷ الف) آنگاه درپوش فلزی را می بندیم. اکنون گوی را با کف ظرف تماس می دهیم (شکل ۲-۱۷ ب) سپس گوی را کمی بالا می کشیم و بعد درپوش فلزی را با دسته عایقش برمی داریم (شکل ۲-۱۷ پ). پس از خارج کردن گوی فلزی از ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می کنیم. مشاهده می شود عقربه الکتروسکوپ تکان نمی خورد (شکل ۲-۱۷ ت).

از این آزمایش نتیجه می گیریم که **بار اضافی یک رسانای منزوی روی سطح خارجی آن توزیع می شود**. به عبارتی، وقتی در شکل ۲-۱۷ ب گوی با کف ظرف تماس پیدا می کند مجموعه گوی و ظرف، رسانایی را تشکیل می دهند که در سطح خارجی این جسم رسانای مرکب بار مشابه شکل



۱۷-۲- ب توزیع می شود.



شکل ۱۷-۲ شرحی تصویری از آزمایش فارادی

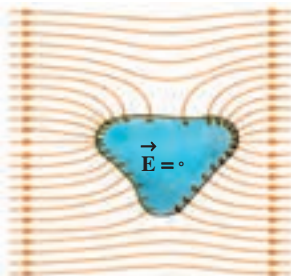
## فعالیت ۵-۲



الف) قفس یا حفاظ فارادی، مبتنی بر آزمایش فارادی است. در مورد آن و کاربردهایش تحقیق و به کلاس گزارش کنید.  
ب) تحقیق کنید چرا معمولاً شخصی که در داخل اتومبیل است از خطر آذرخش در امان می ماند.  
پ) با اعضای گروه خود آزمایش های دیگری را طراحی و اجرا کنید که نشان دهد بار اضافی داده شده به رسانا، روی سطح خارجی آن قرار می گیرد.

## ب) رسانای منزوی و خنثی در میدان الکتریکی خارجی: اگر یک رسانای خنثی منزوی

در یک میدان الکتریکی خارجی قرار داده شود الکترون های آزاد رسانا طوری روی سطح خارجی آن توزیع می شوند که اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی کنند و **میدان خالص درون رسانا صفر** شود. (شکل ۱۸-۲)

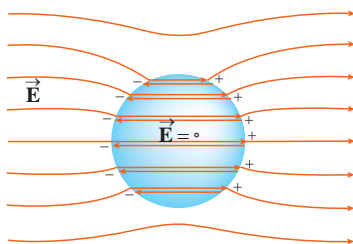


## میدان و پتانسیل الکتریکی در داخل و روی سطح رسانای منزوی: در هر دو مورد الف

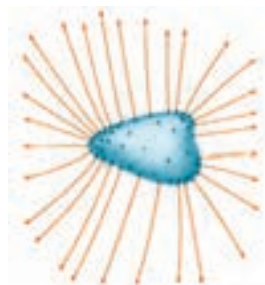
و ب میدان الکتریکی داخل رسانا پس از مدتی برابر صفر می شود؛ زیرا درغیراین صورت، این میدان باید نیروهایی بر الکترون های آزاد داخل رسانا وارد کند و در نتیجه جریانی در داخل رسانا ایجاد شود؛ یعنی بارها از جایی به جای دیگر انتقال یابند. ولی چنین جریانی داخل یک رسانا وجود ندارد، که این بدین معناست که بارها در **تعادل الکتروستاتیکی** قرار دارند.

افزون بر این، اگر روی سطح رسانا که در تعادل الکتروستاتیکی است میدان الکتریکی وجود داشته باشد، این **میدان باید عمود بر سطح رسانا باشد**؛ چرا که در غیراین صورت میدان مؤلفه ای مماس بر سطح رسانا خواهد داشت و این مؤلفه باعث حرکت الکترون های آزاد بر سطح رسانا می گردد که این در تناقض با شرط تعادل الکتروستاتیکی است (شکل های ۱۹-۲- الف و ب).

**شکل ۱۸-۲** یک رسانای بدون بار که در یک میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است. الکترون های آزاد خود را طوری در رسانا پخش کرده اند که میدان الکتریکی خالص داخل رسانا صفر شود.



(ب) میدان الکتریکی خارجی باعث جدا شدن بارهای مثبت و منفی در دو وجه رسانا شده است، به طوری که میدان خارجی در داخل رسانا را خنثی می‌کند. (توجه کنید که دو خط هر جفت خطوط میدان نشان داده شده در داخل رسانا منطبق بر هم هستند و برای آنکه دیده شوند، با فاصله اندکی از هم رسم شده‌اند.)



(الف) میدان الکتریکی یک رسانای باردار در همه جا عمود بر سطح این رسانا است.

شکل ۲-۱۹

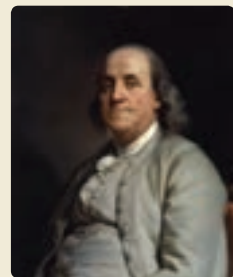
چون میدان درون رسانایی که در تعادل الکتروستاتیکی است، برابر صفر است و میدان روی سطح رسانا عمود بر این سطح است، کار نیروی الکتریکی در هر جابه‌جایی بار در داخل و روی سطح رسانا صفر است و در نتیجه همه نقاط داخل و روی سطح رسانا، پتانسیل یکسانی دارند. به عبارتی دیگر:

$$\Delta U = -W_E = 0 \Rightarrow \Delta V = \frac{\Delta U}{q} = 0$$

**چگالی سطحی بار الکتریکی رسانا:** دیدیم که بار الکتریکی اضافی روی سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود. بنابه تعریف، چگالی سطحی بار برابر با بار الکتریکی جسم رسانا بخش بر مساحت سطح آن جسم است. اگر بار الکتریکی جسم برابر  $q$  و مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده است برابر  $A$  باشد چگالی سطحی بار که با نماد  $\sigma$  نشان داده می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (۲-۱۳)$$

در این رابطه، بار الکتریکی ( $q$ ) برحسب کولن ( $C$ )، مساحت ( $A$ ) برحسب متر مربع ( $m^2$ ) و در نتیجه چگالی سطحی بار ( $\sigma$ ) برحسب کولن بر متر مربع ( $C/m^2$ ) است. در نبود میدان الکتریکی خارجی، چگالی سطحی بار الکتریکی یک رسانای کروی در همه نقاط سطح خارجی آن یکسان است. اما در اجسامی که سطح خارجی آنها شکل تقارنی کروی ندارد چگالی سطحی بار در همه جای سطح خارجی یکسان نیست.



#### بنیامین فرانکلین

بنیامین فرانکلین دانشمند، نویسنده و سیاستمدار آمریکایی در ۱۷ ژانویه سال ۱۷۰۶ میلادی (۸۵۱ هجری شمسی) در شهر بوسطن به دنیا آمد و در ۱۷ آوریل سال ۱۷۹۰ میلادی (۱۱۶۹ هجری شمسی) در شهر فیلادلفیا دیده از جهان فروست. فرانکلین در حدود سال ۱۷۴۴ میلادی با میحث 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. پیش از این تاریخ او مجالی برای پرداختن به مسائل علمی و تحقیقاتی نداشت. 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 و کمتر مبحثی در الکتروستاتیک است که از دید این کتاب پنهان مانده باشد. 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. تبحر و استادی فرانکلین در راه و رسم آزمایش و بیان واضح وی از مفاهیم فیزیکی و بالاخره کشفیات مهم او موجب ارج و قرب علوم تجربی در قرن هجدهم شد.

## آزمایش ۲-۲

### چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی جسم رسانای منزوی

**وسایل آزمایش:** مخروط فلزی یا ورقه آلومینیومی ضخیم، پایه عایق، گلوله فلزی کوچک با دسته عایق، الکتروسکوپ،

مولد واندوگراف یا دستگاه مشابه دیگر برای ایجاد بار

#### شرح آزمایش:

۱- اگر مخروط فلزی ندارید با استفاده از ورقه آلومینیومی ضخیم، یک مخروط بسازید و روی پایه عایق قرار دهید.

۲- با تماس مخروط فلزی با کلاهک مولد واندوگراف آن را باردار کنید.



۳- گلوله فلزی را با دسته عایق آن بگیرید و گلوله را با نوک تیز مخروط تماس دهید. سپس گلوله را به کلاهک الکتروسکوپ تماس دهید. چه چیزی مشاهده می کنید؟

۴- گلوله فلزی و الکتروسکوپ را با تماس با دستتان خنثی کنید، اینک گلوله را با دسته عایق آن بگیرید و با بدنه مخروط فلزی تماس دهید. سپس گلوله را با کلاهک الکتروسکوپ تماس دهید. اکنون چه چیزی مشاهده می کنید؟

۵- مراحل ۳ و ۴ را چندبار تکرار کنید. پیش از انجام دادن هریک از مراحل ۳ و ۴، گلوله فلزی و الکتروسکوپ را با تماس با دستتان خنثی کنید.

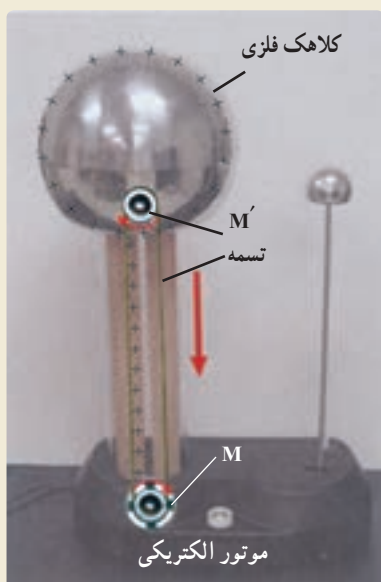
۶- از مشاهده های خود در انجام مراحل ۳ و ۴ و ۵ چه نتیجه ای می گیرید؟

آزمایش هایی مانند آزمایش ۲-۲ و نیز محاسبه نشان می دهد چگالی سطحی بار در نقاط نوک تیز سطح جسم رسانا از نقاط دیگر آن بیشتر است.

## فعالیت ۲-۷

در مورد برقگیرهای ساختمان تحقیق کنید و بررسی کنید چگونه آنها ساختمان ها را از خطر آذرخش در امان نگه می دارند.

## مطالعه آزاد



## مولد واندوگراف

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

در نمونه ساده مولد واندوگراف، غلتک M توسط یک موتور الکتریکی می چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می شود. معمولاً غلتک M از جنس پلی اتیلن و غلتک M' از جنس پرسپکس است. بر اثر مالش تسمه با غلتک ها، غلتک M بار منفی و غلتک M' بار مثبت پیدا می کند. غلتک M که بار منفی دارد، در یک شانه فلزی که متصل به