

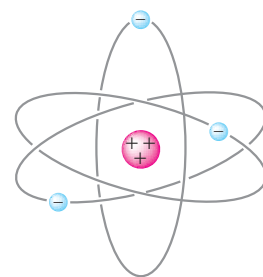
الکتریسته ساکن



تولید مثل برخی 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.

در کتاب‌های علوم دوره راهنمایی و نیز کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، با بار الکتریکی و روش ایجاد بار در اجسام آشنا شدیم و آموختیم که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد که مثبت و منفی نام گذاری شده‌اند. بر این اساس، بار الکترون منفی و بار پروتون مثبت است (شکل ۱-۱). 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، **بایستگی 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 الکتروسیسته 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.



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

۱-۱- قانون کولن

همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندیم، 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 بار الکتریکی یک جسم مثبت و بار الکتریکی دیگری منفی باشد، این نیرو، ربایشی خواهد بود.



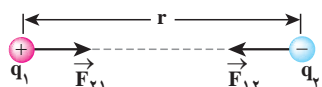
شکل ۱-۲ ترازوی پیچشی کولن. در دو سر یک میله سبک افقی یک کره کوچک و یک قرص قرار دارد. یک کره مشابه از حفره‌ای به داخل برده می‌شود. نیروی مؤثر بین بارها از اندازه‌گیری زاویه چرخش ترازوی پیچشی تارسیدن به تعادل به دست می‌آید. (تصویر از کتاب مرجع سال ۱۷۸۵ م.)

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

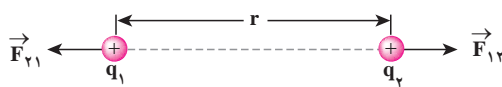
شارژ کولن، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای (شکل ۱-۲) توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آنها بستگی دارند، شناسایی کند و نتیجه آزمایش‌های خود را، که امروزه به نام **قانون کولن** شناخته شده است، به صورت زیر بیان کرد:

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:

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



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



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

ثابت کولن (k) را می‌توان برحسب یک ضریب ثابت دیگر به نام ضریب گذردهی الکتریکی خلا (ε۰) نیز نوشت:

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

که در آن

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



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 فارغ‌التحصیل شد. او در طی دوازده سال پس از فارغ‌التحصیلی 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 دزدهای 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:

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2 \quad (2-1)$$

در شکل ۳-۱، \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 ۱-۱) 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 ۱-۱

دو ذره با بارهای الکتریکی $q_1 = +2 \mu\text{C}$ و $q_2 = -5 \mu\text{C}$ در فاصله 3 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 ۱-۱ داریم:

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

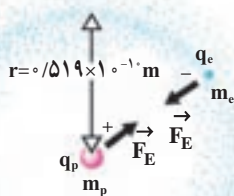
$$= (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \times \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})(5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2}$$

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

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 $9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ در نظر گرفت.

مثال ۲-۱



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 می چرخد. (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 می آید که در سال پیش آموختیم:

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

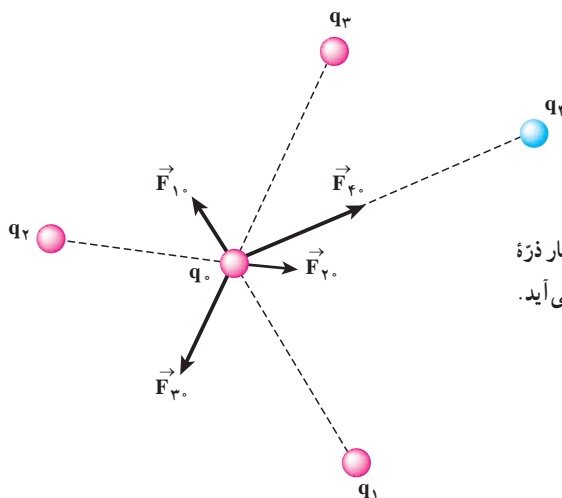
$$= 3/61 \times 10^{-47} \text{ N}$$

در نتیجه نسبت بزرگی این نیروها چنین می شود:

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

این نتیجه نشان دهنده آن است که نیروی گرانشی بسیار ضعیف تر از نیروهای الکتریکی است.

تجربه نشان می دهد اگر تعدادی ذره باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برابری نیروهایی است که هر یک از ذره های دیگر در غیاب سایر ذره ها، بر آن ذره وارد می کند. برای مثال، شکل ۱-۴ نیروهای وارد بر بار q_0 از سوی چهار بار دیگر را نشان می دهد. این موضوع که از آزمایش نتیجه شده است را اصل برهم نهی نیروهای کولنی می گویند.

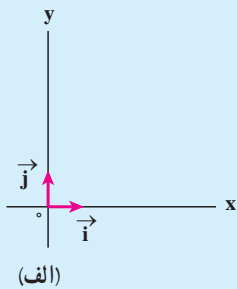


شکل ۱-۴ نیروی وارد بر بار q_0 ، از جمع برداری نیروهایی که چهار ذره باردار دیگر در غیاب بقیه بارها به این ذره وارد می کنند، به دست می آید.

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

یادداشت ریاضی

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

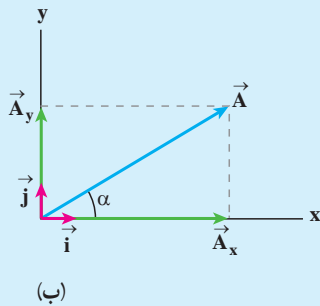


در درس ریاضی خود خوانده‌اید که با انتخاب بردارهای یکه \vec{i} و \vec{j} به ترتیب روی محورهای x و y (شکل الف) می‌توان یک بردار را بر حسب بردارهای یکه نمایش داد. بردار یکه در راستای هر محور، برداری است به طول واحد و در جهت همان محور.

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

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 α 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 تنازات زاویه α

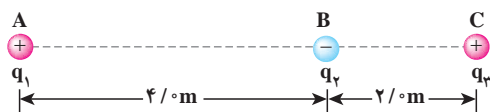
را حساب کنیم، نتیجه می‌شود:

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

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

مثال ۱-۳

سه ذره با بارهای الکتریکی $q_1 = +2/5 \mu C$ ، $q_2 = -1/0 \mu C$ و $q_3 = +4/0 \mu C$ 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 ۱-۱ داریم:

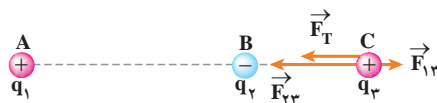
$$F_{13} = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_{13}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/5 \times 10^{-6} \text{ C})(4/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(6/0 \text{ m})^2}$$

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

$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})(4/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2/0 \text{ m})^2}$$

$$= 9/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

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 F_{13} و F_{23} در جهت‌های مخالف یکدیگرند و برآیند آنها برابر است با

$$\vec{F}_{T2} = \vec{F}_{23} + \vec{F}_{12}$$

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

$$F_{T2} = F_{23} - F_{12} = 6/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

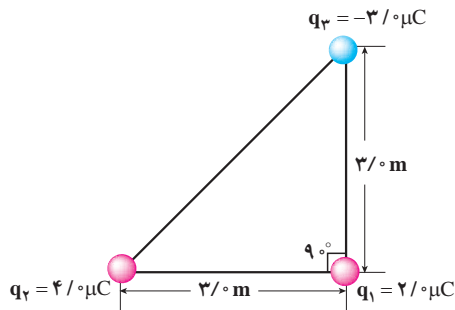
و جهت آن در جهت نیروی بزرگ‌تر (\vec{F}_{23}) است. اگر محور x را روی خط واصل سه بار و جهت مثبت آن را به

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

$$\vec{F}_{T2} = (-6/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$

تمرین ۱-۱

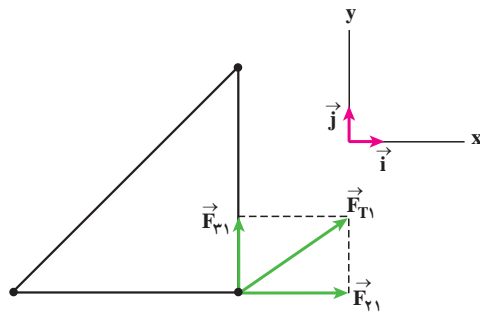
در مثال ۱-۳، نیروی وارد بر بار q_2 را به دست آورید.



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_2 و q_1 رانشی و نیروی بین بارهای q_3 و q_1 ربایشی است. با استفاده از رابطه ۱-۱ داریم:

$$F_{r1} = k \frac{|q_2| |q_1|}{r_{r1}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4/0 \times 10^{-6} \text{ C})(2/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3/0 \text{ m})^2} = 8/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$



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

$$\vec{F}_{r1} = (8/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$

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

$$F_{r1} = k \frac{|q_3| |q_1|}{r_{r1}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(3/0 \times 10^{-6} \text{ C})(2/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3/0 \text{ m})^2} = 6/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

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

$$\vec{F}_{r3} = (6/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

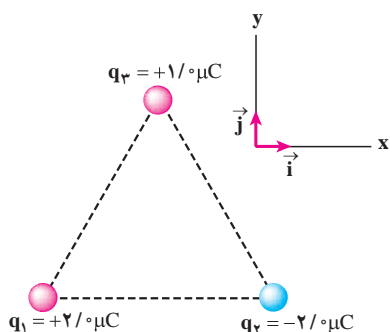
برایند نیروهای الکتریکی وارد بر بار q_1 برابر است با

$$\vec{F}_{T1} = \vec{F}_{r1} + \vec{F}_{r3} = (8/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (6/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

و بزرگی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{T1} = \sqrt{(8/0 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (6/0 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 1/0 \times 10^{-2} \text{ N}$$

مثال ۱-۵



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

الف) نیرویی که بار q_1 بر بار q_3 وارد می‌کند (\vec{F}_{13}) 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.

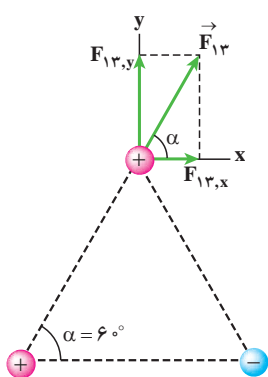
پ) برآیند نیروهای وارد بر بار q_3 را به دست آورید.

پاسخ:

الف) بزرگی نیرویی که بار q_1 بر بار q_3 وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به دست می‌آوریم:

$$F_{13} = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_{13}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})(1 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2}$$

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



همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی \vec{F}_{13} دارای مؤلفه‌های x و y است،

به طوری که:

$$F_{13,x} = F_{13} \cos \alpha = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{13,y} = F_{13} \sin \alpha = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = 15.6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

بنابراین، نیروی \vec{F}_{13} بر حسب بردارهای یکه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F}_{13} = (9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (15.6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم:

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

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

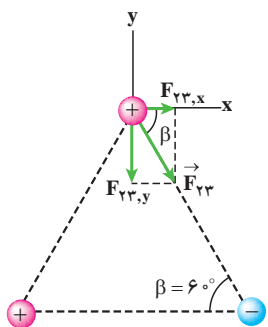
$$F_{23,x} = F_{23} \cos \beta = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

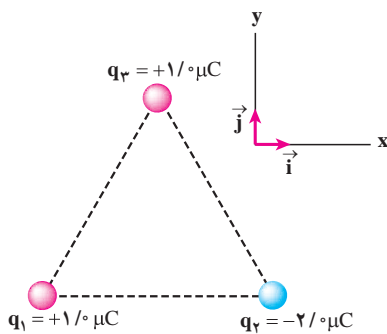
$$F_{23,y} = -F_{23} \sin \beta = -(18 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = -15.6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

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

پ) برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر بار q_3 برابر است با

$$\vec{F}_{T3} = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23} = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$





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

الف) نیروی که بار q_1 بر بار q_3 وارد می‌کند (\vec{F}_{13}) 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_3 را به دست آورید.

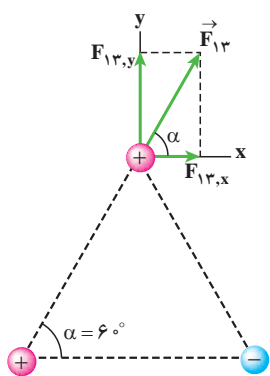
ت) بزرگی بردار برآیند نیروهای وارد بر بار q_3 چقدر است؟

پاسخ:

الف) بزرگی نیروی که بار q_1 بر بار q_3 وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به دست می‌آوریم:

$$F_{13} = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_{13}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2}$$

$$= 4/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$



همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی \vec{F}_{13} دارای مؤلفه‌های x و y است،

به طوری که:

$$F_{13,x} = F_{13} \cos \alpha = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 2/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{13,y} = F_{13} \sin \alpha = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = 3/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

بنابراین، نیروی \vec{F}_{13} برحسب بردارهای یکه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F}_{13} = (2/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (3/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم:

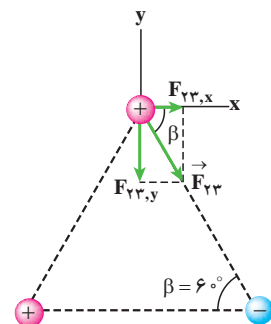
$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/0 \times 10^{-6} \text{ C})(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2}$$

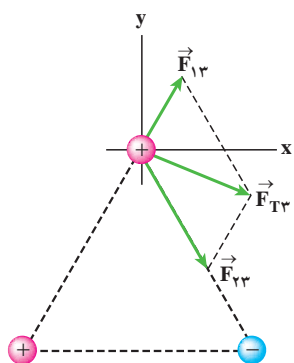
$$= 8/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

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

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

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



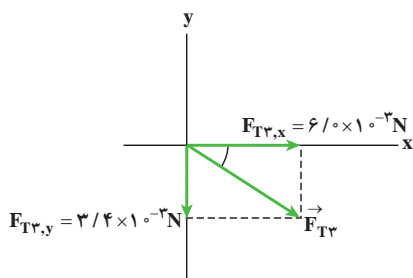


پ) برآیند نیروهای وارد بر بار q_2 برابر است با

$$\vec{F}_{T3} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{23} = [(2/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (3/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}] + [(4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (6/9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}] = (6/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (3/4 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

بردار نیروی برآیند \vec{F}_{T3} با استفاده از روش متوازی الاضلاع که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه آموختید در شکل روبه‌رو رسم شده است.

ت) بردار نیروی برآیند \vec{F}_{T3} که در شکل قبل دیدیم را جداگانه همراه با محورهای x و y در شکل روبه‌رو به مقیاس رسم می‌کنیم. با استفاده از قضیه فیثاغورس بزرگی \vec{F}_{T3} را به دست می‌آوریم:



$$F_{T3} = \sqrt{F_{T3,x}^2 + F_{T3,y}^2} = \sqrt{(6/0 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (-3/4 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 6/9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

تمرین ۲-۱

برآیند نیروهای وارد بر بار q_1 در مثال ۱-۶ را برحسب بردارهای یکه محاسبه کنید.

توجه کنید که رابطه ۱-۱ 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 ۱-۱ برای محاسبه نیروی الکتریکی استفاده کرد.

۲-۱- میدان الکتریکی

در بخش ۱-۱ 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 این‌طور 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_2 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:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (3-1)$$

بنابراین تعریف میدان الکتریکی (رابطه ۳-۱)، میدان الکتریکی کمیته 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 ۳-۱ 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 ۷-۱

برای تعیین میدان الکتریکی در نقطه‌ای از فضا بار آزمون $+2 \text{ nC}$ را در آن نقطه قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی $5/0 \times 10^{-3} \text{ N}$ 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 ۳-۱ می‌توان بزرگی میدان الکتریکی در نقطه مورد نظر را محاسبه کرد.

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{5/0 \times 10^{-3} \text{ N}}{2 \times 10^{-9} \text{ C}} = 2/5 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

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

۳-۱- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار



شکل ۱-۳ می‌خواهیم میدان حاصل از بار q را در نقطه A محاسبه کنیم.

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 ۱-۳). برای این محاسبه از رابطه ۳-۱ ($\vec{E} = \vec{F}/q_0$) 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 جای‌گذاری در رابطه ($\vec{E} = \vec{F}/q_0$)، بزرگی میدان الکتریکی

بار q را در نقطه A به دست می آوریم.

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

در نتیجه :

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

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

مثال ۸-۱

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

پاسخ : با استفاده از رابطه ۴-۱ اندازه میدان را در نقطه های مورد نظر، به دست می آوریم :

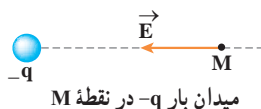
$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad \text{(الف)}$$

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

(ب)

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

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



در بخش ۱-۱ دیدیم اگر چند بار نقطه ای مانند q_1, q_2, \dots داشته باشیم برآیند نیروهای الکتریکی حاصل از این بارها برابر آزمون q_0 با استفاده از اصل برهم نهی نیروهای کولنی از رابطه زیر به دست می آید :

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

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 می کنیم. آنگاه خواهیم داشت :

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

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

این رابطه که موسوم به اصل برهم نهی میدان‌های الکتریکی است، نشان می‌دهد که میدان الکتریکی ناشی از چند بار الکتریکی در نقطه‌ای از فضا، برابر مجموع میدان‌هایی است که هر بار در نبود سایر بارها در آن نقطه از فضا ایجاد می‌کند.

مثال ۱-۱

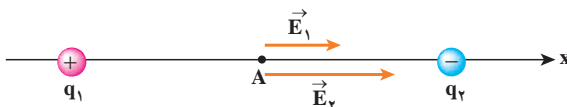
دو ذره با بارهای $q_1 = 4 \mu\text{C}$ ، $q_2 = -6 \mu\text{C}$ در فاصله 8 m از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به دست آورید:

الف) در وسط خط واصل دو ذره،

ب) در نقطه‌ای به فاصله 8 m از بار q_1 و 16 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 دو بار، 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 هم‌جهت 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 ۴-۱ ($E = k|q|/r^2$) به دست می‌آوریم:

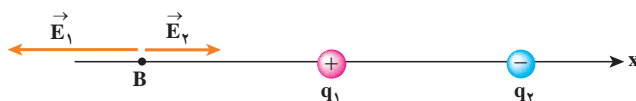
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C}$$

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

بنابراین:

$$\vec{E}_A = (2.25 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (3.375 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (5.625 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

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 :

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

که در آن E_1 و E_2 برابرند با :

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

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

بنابراین :

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

مثال ۱۰-۱

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 مورد نظر هم‌اندازه‌اند.

$$r_1 = r_2 = \sqrt{a^2 + x^2} = \sqrt{(\lambda/\text{cm})^2 + (6/\text{cm})^2} = 10 \text{ cm}$$

با استفاده از رابطه ۱-۴ داریم :

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

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

در نتیجه برای مؤلفه در نقطه M داریم :

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

$$\cos \alpha = \frac{x}{r_1} = \frac{6/\text{cm}}{10 \text{ cm}} = 0/60$$

$$E_{1x} = -E_{2x} = (4/5 \times 10^4 \text{ N/C})(0/60) = 2/7 \times 10^4 \text{ N/C}$$

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

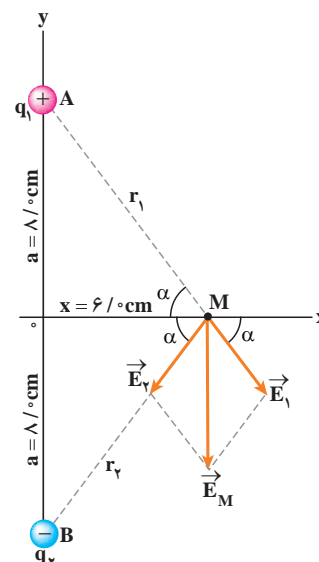
$$\sin \alpha = \frac{a}{r_1} = \frac{\lambda/\text{cm}}{10 \text{ cm}} = 0/80$$

$$E_{1y} = E_{2y} = -(4/5 \times 10^4 \text{ N/C})(0/80) = -3/6 \times 10^4 \text{ N/C}$$

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 :

$$\vec{E} = 2E_{1y} \vec{j} = 2 \times (-3/6 \times 10^4 \text{ N/C}) \vec{j} = (-7/2 \times 10^4 \text{ N/C}) \vec{j}$$



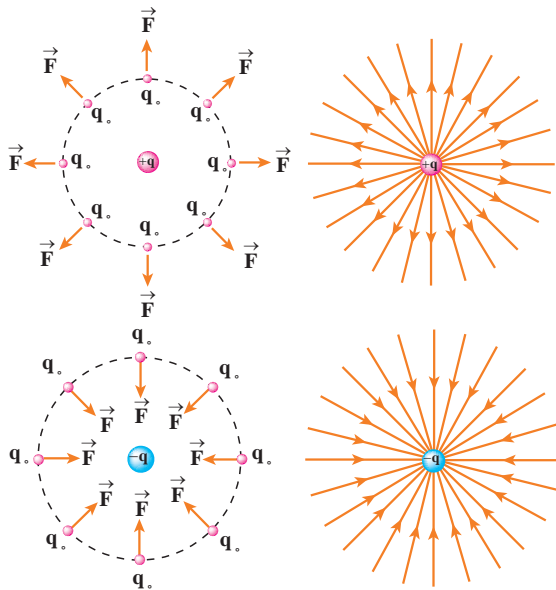
میدان الکتریکی حاصل از دو قطبی مثال ۱-۱° را در نقطه‌ای روی محور دو قطبی (محور y) و به فاصله ۱۶ cm از مرکز دو قطبی (نقطه مبدأ) به دست آورید.

۱-۴- 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:

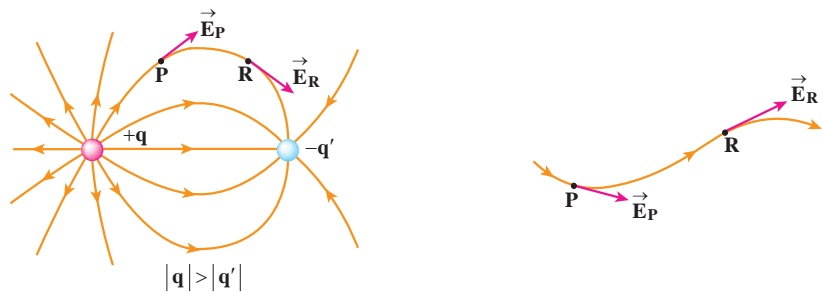
۱- خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون (مثبت) واقع در آن نقطه‌اند. در نتیجه، جهت این خط‌ها برای بار مثبت روبه خارج و برای بار منفی روبه داخل است (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۶ 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 ۱-۷).

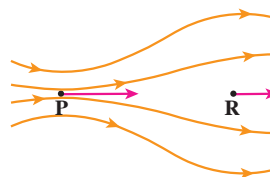


شکل ۱-۷ میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است.

۳- در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خط‌های میدان به یکدیگر نزدیک‌تر و فشرده‌ترند (شکل ۱-۸).

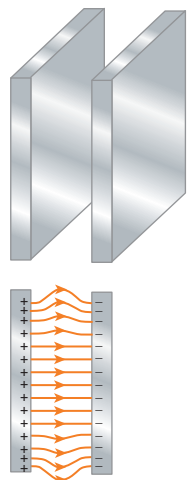
شکل ۱-۸ در نقطه P خطوط میدان به یکدیگر

نزدیک‌ترند، و بنابراین $E_P > E_R$ است.

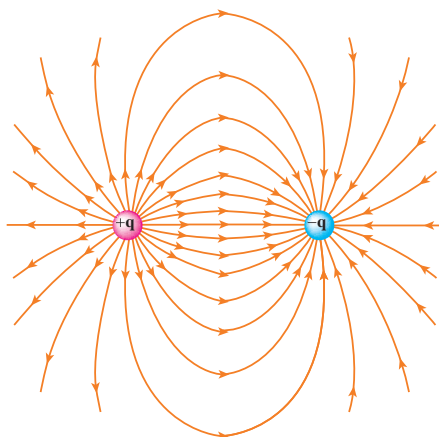


۴- خط‌های میدان یکدیگر را قطع نمی‌کنند؛ یعنی از هر نقطه فقط یک خط میدان می‌گذرد. به بیان دیگر، در هر نقطه فضا فقط یک میدان الکتریکی وجود دارد که همان میدان الکتریکی برآیند است.

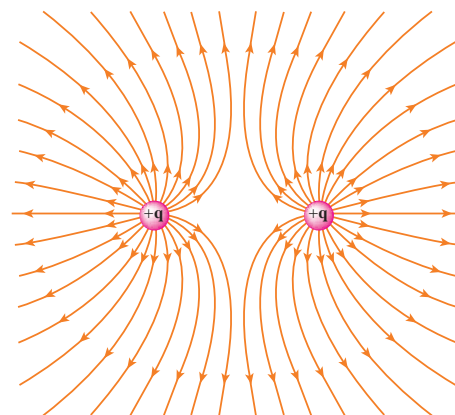
در شکل ۹-۱ خطوط میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



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



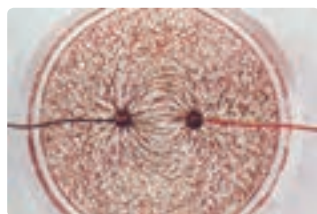
ب) دو بار الکتریکی ناهمنام و هم‌اندازه



الف) دو بار الکتریکی مثبت و هم‌اندازه

شکل ۹-۱ میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار

آزمایش ۱-۱



(الف)



(ب)

مشاهده طرح خطوط میدان الکتریکی

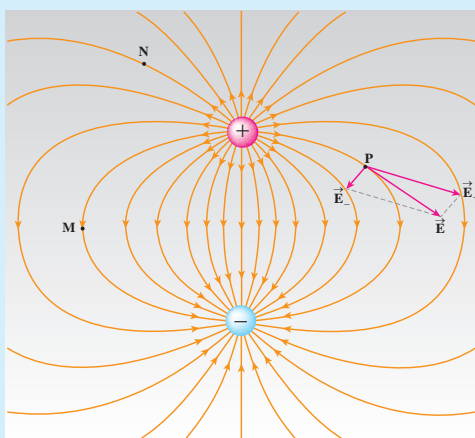
وسایله‌های آزمایش: ظرف پلاستیکی یا شیشه‌ای با ابعاد مناسب، پارافین مایع یا روغن مایع خوراکی، مولد و اندوگراف یا هر مولد ولتاژ بالای دیگر، سیم‌های رابط با پوشش عایق ضخیم، الکترودهایی با شکل‌های مختلف (می‌توانید الکترودها را با ورقه آلومینیومی ضخیم بسازید)، بذر چمن.

شرح آزمایش:

- ۱- روغن را در ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی بریزید.
- ۲- دو الکتروده را به صورت دو گلوله فلزی درآورید و درون روغن قرار دهید. سپس الکترودها را با سیم‌های رابط به پایانه‌های خروجی مولد و اندوگراف وصل کنید.
- ۳- مولد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای بین دو الکترودها بپاشید.
- ۴- اکنون به سمت گیری دانه‌های بذر در فضای بین دو الکترودها توجه کنید (شکل الف) و با استفاده از آن طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکترودها رسم کنید.

- ۵- این بار دو الکتروود را به صورت دو صفحه موازی درون ظرف روغن قرار دهید و آنها را با سیم‌های رابط به پایانه‌های 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 دانه‌های 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 بریده‌های کوچک نخ استفاده کنید و آن را پیش از انجام آزمایش در ظرف شیشه‌ای شفاف با عمق مناسب که حاوی روغن است کاملاً به هم بزنید و سپس الکتروودها را مطابق آزمایش‌های قبل به مولد واندوگراف متصل کنید.

فعالیت ۱-۱



- ۱- در شکل ۱-۹ پ میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه و دور از لبه‌های آن، یکنواخت است. با توجه به تعریف میدان الکتریکی و ویژگی‌های خط‌های میدان، برای میدان الکتریکی یکنواخت تعریفی بیان کنید.
- ۲- در شکل روبه‌رو میدان الکتریکی برآیند یک دو قطبی الکتریکی در نقطه P رسم شده است. میدان برآیند در نقطه‌های M و N را به دقت رسم کنید.

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:

$$\vec{F} = q \vec{E} \quad (۶-۱)$$

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 ۱۱-۱

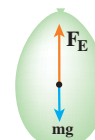
در بادکنکی به جرم $g = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg}$ بار الکتریکی $2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، به طوری که نیروی وزن بادکنک با نیروی الکتریکی وارد بر آن موازنه شود. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را تعیین کنید. ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

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:

$$F_E = mg$$

$$|q|E = mg$$

$$\Rightarrow E = \frac{mg}{|q|} = \frac{(1.0 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})}{2.0 \times 10^{-9} \text{ C}} = 4.9 \times 10^5 \text{ N/C}$$



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.

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

مثبت می‌شوند و وقتی به گرده بدون باری روی بساک یک گل (شکل ۱-۱ الف) می‌رسند که از لحاظ الکتریکی خنثی است، میدان الکتریکی آنها روی گرده بارهای مثبت و منفی القا می‌کند، به طوری که آن سمت گرده که به طرف زنبور است دارای بار منفی می‌شود و به این ترتیب گرده به سوی زنبور کشیده می‌شود (شکل ۱-۱ ب). گرده‌ها روی موپه‌های ریز زنبور قرار می‌گیرند و سپس وقتی زنبور 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 زنبور بر گرده باشد، گرده به سمت کلاله گل کشیده می‌شود (شکل ۱-۱ پ) و گرده افشانی صورت می‌پذیرد.



الف) اجزای بساک و کلاله یک گل

ب) اثر حضور زنبور، روی گرده نزدیک بساک، بار القا شده است.

پ) الکترونیایی که در نوک کلاله جمع شده‌اند، گرده را جذب می‌کنند.

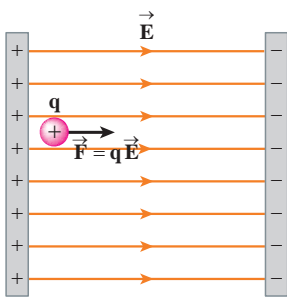
شکل ۱-۱

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

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.



شکل ۱۱-۱ ذره با بار $+q_2$ در میدان الکتریکی فضای اطراف بار $+q_1$ رها شده است.

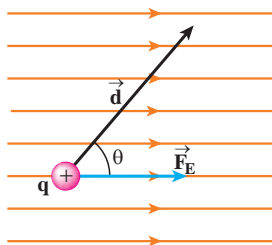


شکل ۱۲-۱ بار الکتریکی $+q$ از مجاورت صفحه مثبت رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.



$$\vec{F} = m\vec{g}$$

شکل ۱۳-۱ جسم از نزدیکی سطح زمین رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.



شکل ۱۴-۱ نیروی الکتریکی وارد بر بار $+q$ در حین جابه‌جایی \vec{d} درون میدان الکتریکی یکنواخت.

۶-۱- انرژی پتانسیل الکتریکی

آرایش دو ذره باردار الکتریکی شکل ۱۱-۱ 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 ۱۱-۱ 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 ۱۲-۱ 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 ۱۳-۱). 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:**

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

گرچه این رابطه برای یک میدان الکتریکی یکنواخت بیان شد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر میدان الکتریکی ناشی از بارهای ساکن (میدان الکتروستاتیکی) برقرار است. **تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک بار ذره‌ای در میدان الکتریکی یکنواخت:** بار ذره‌ای q در میدان الکتریکی یکنواخت \vec{E} در نظر بگیرید که مطابق شکل ۱۴-۱ 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:

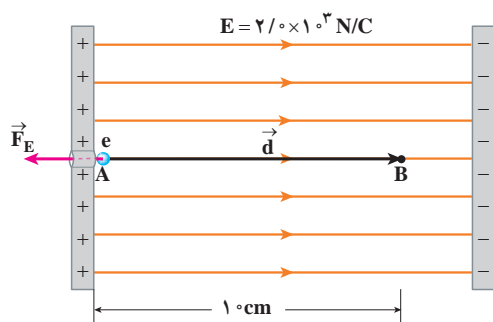
$$W_E = |q| E d \cos\theta$$

اکنون با استفاده از رابطه ۸-۱ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار ذره‌ای q چنین محاسبه می‌شود:

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

که در آن، θ زاویه بین نیروی \vec{F}_E و جابه‌جایی \vec{d} است. در این رابطه، بار الکتریکی (q) بر حسب کولن (C)، بزرگی میدان الکتریکی (E) بر حسب نیوتون بر کولن (N/C)، اندازه جابه‌جایی (d) بر حسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی (ΔU_E) بر حسب ژول (J) است. توجه کنید که رابطه ۸-۱ چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است. به این منظور، مثال زیر را ملاحظه کنید.

مثال ۱۳-۱



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 $1/6 \times 10^{-19} C$ و جرم آن $9/1 \times 10^{-31} kg$ است.

الف) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون در این جابه‌جایی چه مقدار است؟

ب) سرعت پرتاب الکترون را پیدا کنید.

پاسخ:

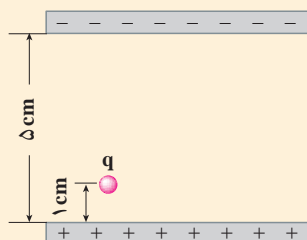
الف) با توجه به رابطه ۸-۱ داریم:

$$\Delta U_E = -|q| E d \cos\theta = -(1/6 \times 10^{-19} C)(2/0 \times 10^3 N/C)(10 \times 10^{-2} m)(\cos 180^\circ) = 3/2 \times 10^{-17} J$$

ب) طبق قضیه کار و انرژی می‌توان نوشت:

$$W_E = \Delta K \Rightarrow -\Delta U_E = \frac{1}{2} m (0 - v_0^2) \\ -3/2 \times 10^{-17} J = \frac{1}{2} (9/1 \times 10^{-31} kg)(-v_0^2) \Rightarrow v_0 = 8/4 \times 10^6 m/s$$

تمرین ۱۴-۱



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

۷-۱- پتانسیل الکتریکی

در رابطه ۸-۱ 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 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 جابه‌جا شده است و آن را با ΔV نمایش می‌دهیم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \quad (9-1)$$

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

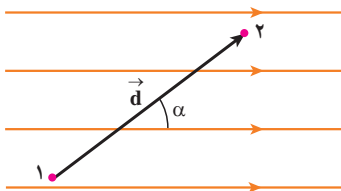
توجه کنید که در این رابطه، علامت q در نظر گرفته می‌شود. همچنین دقت کنید که هرچند این رابطه برای میدان الکتریکی یکنواخت به‌دست آمده است، اما برای تمامی میدان‌های الکتروستاتیکی نیز برقرار است.

با استفاده از روابط ۸-۱ و ۹-۱ می‌توان نشان داد در میدان الکتریکی یکنواخت شکل

۱۵-۱ داریم:

$$\Delta V = V_f - V_i = -E d \cos \alpha \quad (10-1)$$

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



شکل ۱۰-۱ در این شکل α زاویه بین میدان الکتریکی و جابه‌جایی است.

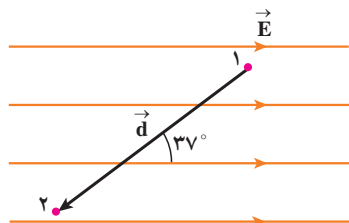
فعالیت ۳-۱

الف) درستی رابطه ۱-۱ را یک بار برای بار مثبت و یک بار برای بار منفی نشان دهید.
ب) نشان دهید یک‌گانه‌ها، «نیوتون بر کولن» و «ولت بر متر» که برای میدان الکتریکی به کار می‌روند، معادل یکدیگرند.

از فعالیت ۳-۱ الف درمی‌یابیم با حرکت در سوی خطوط میدان، از پتانسیل الکتریکی بیشتر

به پتانسیل الکتریکی کمتر رفته‌ایم و بالعکس.

مثال ۱-۱۳



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 ۱-۱۰ داریم:

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

دقت کنید که α زاویه بین خطوط میدان و جابه‌جایی و برابر با $18^\circ - 37^\circ$ 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 ۱-۹ 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:

$$V = \frac{U}{q} \quad (1-11)$$

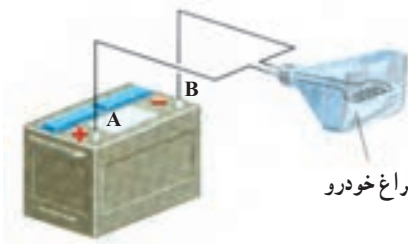
شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا رادیو از آنها استفاده می‌شود و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها معمولاً $1/5$ ولتی، $4/5$ ولتی یا 9 ولتی اند. باتری خودروهای سواری معمولاً 12 ولتی و باتری کامیون‌ها 24 ولتی یا بیشترند. هر باتری دو پایانه دارد که یکی مثبت و دیگری منفی است. وقتی می‌گوییم باتری خودرو 12 ولت است، یعنی اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایانه‌های منفی و مثبت آن برابر 12 ولت است. اگر پتانسیل 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 12 ولت از پتانسیل پایانه منفی آن بیشتر است. مثلاً اگر پتانسیل پایانه منفی را برابر با -4 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.

تمرین ۱-۵

اگر پایانه مثبت یک باتری 12 ولتی را مرجع پتانسیل در نظر بگیریم، پتانسیل پایانه منفی آن چند ولت خواهد شد؟



اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر ۱۲۷ است. اگر در مدت ۱۰s بار الکتریکی ۵۰- کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟

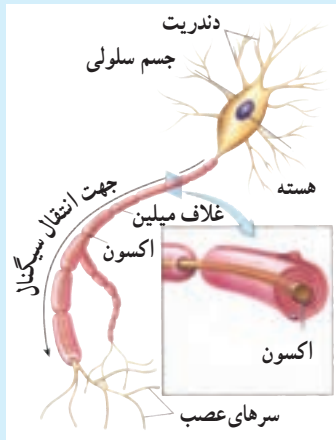
پاسخ: با استفاده از رابطه ۱-۹ داریم:

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

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

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

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه 6350J کاهش یافته است.



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.

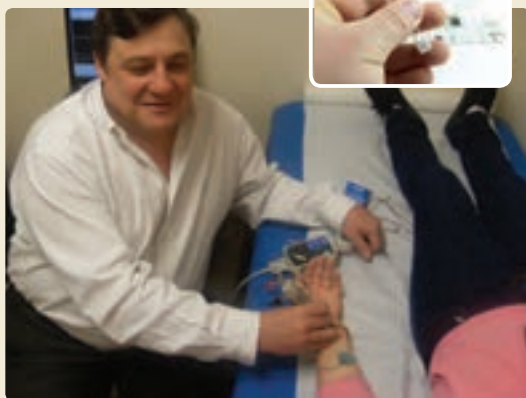
مطالعه آزاد

الکتروکاردیوگرافی و الکترومیوگرافی



در الکتروکاردیوگرافی که به اختصار EKG یا ECG خوانده می‌شود، با قرار دادن الکترودهای این دستگاه روی قفسه سینه، مچ، بازو و یا سایر بخش‌های بدن، سیگنال‌های الکتریکی ناشی از فعالیت قلب ثبت و اختلاف پتانسیل بین بخش‌های مختلف بدن (که عموماً بیش از چند mV نیست) اندازه‌گیری می‌شود. این اختلاف پتانسیل‌ها نشانگر اختلاف پتانسیل‌های بین ناحیه‌های مختلف قلب اند و در نتیجه روش حساسی برای آشکارسازی هر نابهنجاری در فعالیت قلب محسوب می‌شوند.

در الکترومیوگرافی که به اختصار EMG خوانده می‌شود، سوزن نازکی که حاوی دو الکتروود است به درون ماهیچه



دست بیمار فرو برده می شود و سیگنال های الکتریکی حاصل از این ماهیچه ها ثبت و اختلاف پتانسیل بین الکترودها با استفاده از ولت سنج حساسی اندازه گیری می شود. بدین ترتیب پزشک می تواند فعالیت الکتریکی ماهیچه ها را بکاود و بیماری های عصبی - ماهیچه ای را تشخیص دهد.

کار انجام شده توسط نیروی خارجی :

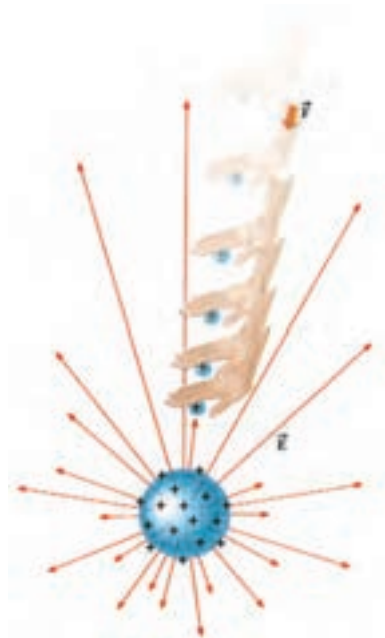
فرض کنید در یک میدان الکتریکی ذره ای با بار q را با اعمال نیرویی از نقطه ای به نقطه ای دیگر جابه جا می کنیم (شکل ۱-۱۶). در حین این حرکت، نیروی خارجی ما کار $W_{\text{خارجی}}$ را روی بار انجام می دهد، در حالی که نیروی الکتریکی نیز کار W_E را روی آن انجام داده است. با استفاده از قضیه کار - انرژی، تغییر انرژی جنبشی بار q چنین می شود:

$$\Delta K = W_{\text{خارجی}} + W_E$$

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

$$W_{\text{خارجی}} = -W_E = q \Delta V \quad (1-12)$$

که در آن از رابطه های ۱-۷ ($W_E = -\Delta U_E$) و ۱-۹ ($\Delta U = q\Delta V$) استفاده کرده ایم. بسته به علامت و بزرگی q و ΔV ، کار $W_{\text{خارجی}}$ می تواند مثبت، منفی یا صفر باشد.



شکل ۱-۱۷ نیروی دست، بار $+q$ را در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه جا می کند.

تمرین ۱-۷

در شکل ۱-۱۶

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.

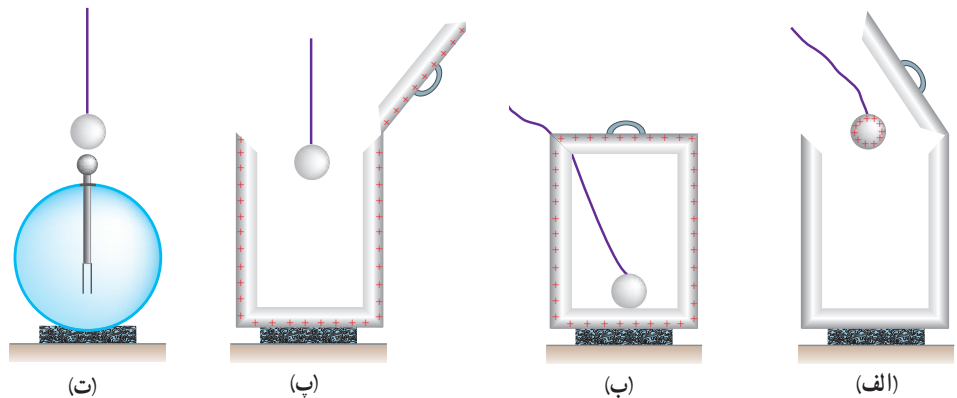
۸- توزیع و القای بار در رساناها

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 بی 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 ۱۷-۱ الف) آنگاه درپوش فلزی را می بندیم. اکنون گوی را با کف ظرف تماس می دهیم (شکل ۱۷-۱ ب) سپس گوی را کمی بالا می کشیم و بعد درپوش فلزی را با دسته عایقش برمی داریم (شکل ۱۷-۱ 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 ۱۷-۱ 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 ۱۷-۱ 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 ۱۷-۱ ب توزیع می شود.



شکل ۱۷-۱ شرحی تصویری از آزمایش فارادی

شعایت ۱-۵



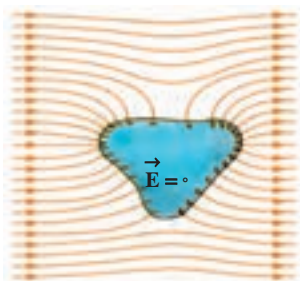
الف) قفس یا حفاظ فارادی، مبتنی بر آزمایش فارادی است. در مورد آن و کاربردهایش تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

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 الکترون‌های آزاد رسانا طوری روی سطح خارجی آن توزیع می‌شوند که اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی کنند و میدان خالص درون رسانا صفر شود (شکل ۱۸-۱).



شکل ۱۸-۱ یک رسانای بدون بار که در یک میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است. الکترون‌های آزاد خود را طوری در رسانا پخش کرده‌اند که میدان الکتریکی خالص داخل رسانا صفر شود.

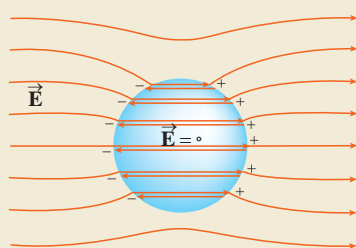
مطالعه آزاد

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

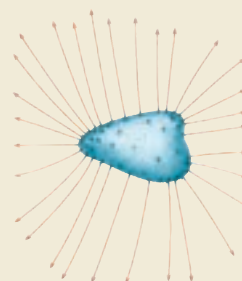
داخل رسانا پس از مدتی برابر صفر می‌شود؛ زیرا در غیراین صورت، این میدان باید نیروهایی بر الکترون‌های آزاد داخل رسانا وارد کند و در نتیجه جریانی در داخل رسانا ایجاد شود؛ یعنی بارها از جایی به جای دیگر انتقال یابند. ولی چنین جریانی داخل یک رسانا وجود ندارد، که این بدین معناست که بارها در **تعادل الکتروستاتیکی** 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 مؤلفه‌ای مماس بر سطح رسانا خواهد داشت و این مؤلفه باعث حرکت الکترون‌های آزاد بر سطح رسانا می‌گردد که این در تناقض با شرط تعادل الکتروستاتیکی است (شکل‌های ۱-۱۹- الف و ب). 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 این رسانا، پتانسیل یکسانی دارند. به عبارتی دیگر :

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

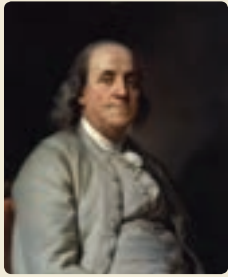


ب) میدان الکتریکی خارجی باعث جدا شدن بارهای مثبت و منفی در دو وجه رسانا نشده است، به طوری که میدان خارجی در داخل رسانا را خنثی می‌کند. (توجه کنید که دو خط هر جفت خطوط میدان نشان داده شده در داخل رسانا منطبق بر هم هستند و برای آنکه دیده شوند، با فاصله اندکی از هم رسم نشده‌اند).



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

شکل ۱۹-۱



بنیامین فرانکلین

بنیامین فرانکلین دانشمند، نویسنده و سیاستمدار آمریکایی در ۱۷ ژانویه سال ۱۷۰۶ میلادی (۸۵ هجری شمسی) در شهر بوستون 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 مبحث الکتروسیستیمه 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 الکتروسیستیمه» است که بسیاری آن را با کتاب «اصول ریاضیات» / *Scholarly Newton* مقایسه کرده‌اند. فرانکلین در این کتاب شالوده و بنیاد اصول علم الکتروسیستیمه 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 الکتروسیستیمه بوده است و بسیاری از واژگانی که ما امروزه در الکتروسیستیمه 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.

چگالی سطحی بار الکتریکی رسانا: دیدیم که بار الکتریکی اضافی روی سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود. بنا به 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 σ نشان داده می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (13-1)$$

در این رابطه، بار الکتریکی (q) بر حسب کولن (C)، مساحت (A) بر حسب متر مربع (m^2) و در نتیجه چگالی سطحی بار (σ) بر حسب 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.

آزمایش ۲-۱

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 و اندوگراف 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 و اندوگراف 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 می‌کنید؟

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 می‌کنید؟

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

۶- از مشاهده‌های خود در انجام مراحل ۳ و ۴ و ۵ چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟