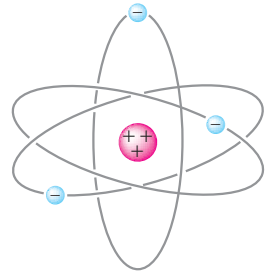
۱ الکتریسیتهٔ ساکن

تولید مثل برخی از گل‌ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده‌ها به واسطهٔ نیروی الکتروستاتیکی از یک گل به زنبور عسل می‌چسبند و در طی پروازِ زنبور به آن چسبیده می‌مانند و سپس به واسطهٔ همین نیرو به‌سوی گل دوم می‌جهند.



شکل ۱ــ۱ مدل ساده‌ای از اتم؛ بار الکترون‌ها منفی و بار پروتون‌ها مثبت است.

در کتاب‌های علوم دورهٔ 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 ۱ــ۱). علاوه بر این، در آزمایش‌های مختلف دیده‌ایم که بار الکتریکی به‌وجود نمی‌آید و از بین نمی‌رود و فقط از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این اصل، پایستگی بارالکتریکی 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 ذرّه‌ها و بسیاری از پدیده‌هایی را که در طبیعت رخ می‌دهند، توصیف کرد. دامنهٔ کاربرد الکتریسیته در فنّاوری 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 کمّیت‌های الکتریکی و رابطهٔ بین آنها می‌پردازیم.

شکل ۱ــ۲ ترازوی پیچشی کولن. در دو سر یک میلهٔ سبک افقی یک کرهٔ کوچک و یک قرص قرار دارد. یک کرهٔ مشابه از حفره‌ای به داخل برده می‌شود. نیروی مؤثر بین بارها از اندازه‌گیری زاویهٔ چرخش ترازوی پیچشی تا رسیدن به تعادل به‌دست می‌آید. (تصویر از کتاب مرجع سال ۱۷۸۵م.)

۱ــ۱ــ قانون کولن

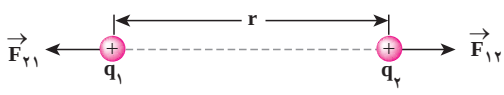
همان‌طورکه در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندیم، دو جسمِ باردار بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. نیرویی که دو جسم باردار بر هم وارد می‌کنند، نیروی الکتریکی نام دارد. نیروهای الکتریکی ممکن است ربایشی یا رانشی باشند. دیدیم که اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، یعنی هر دو مثبت یا هر دو منفی باشند، این نیرو، 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 اندازهٔ این نیروها را از چه رابطه‌ای می‌توان محاسبه کرد؟

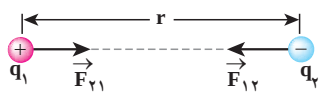
شارل کولن، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای (شکل ۱ــ۲) توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آنها بستگی دارند، شناسایی کند و نتیجهٔ آزمایش‌های خود را، که امروزه به نام قانون کولن شناخته شده است، به‌صورت زیر بیان کرد :

بزرگی نیروی الکتریکی ربایشی یا رانشی بین دو ذرّه با بارهای q_1 و q_2 که در فاصلهٔ r از یکدیگر قرار دارند، با حاصل‌ضرب اندازهٔ بار دو ذرّه نسبت مستقیم و با مجذور فاصلهٔ دو ذرّه از هم، نسبت وارون دارد. بنابراین :

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2} \qquad (۱ــ۱)$$



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



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

شکل ۱ــ۳

که در آن q_1 و q_2 بارهای الکتریکی دو ذرّه برحسب کولن (C)، r فاصلهٔ بین دو ذرّه برحسب متر (m)، F بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر هر ذرّه برحسب نیوتون (N) است. در این رابطه k ثابت کولن نام دارد و برابر است با[1] :

$$k=۸/۹۹\times۱۰^{۹}\ N.m^{۲}/C^{۲} \qquad (۲ــ۱)$$

در شکل ۱ــ۳، $\vec{F}_{۱۲}$ به معنای نیرویی است که ذرّهٔ اول به ذرّهٔ دوم وارد می‌کند و $\vec{F}_{۲۱}$ نیرویی است که ذرّهٔ دوم به ذرّهٔ اول وارد می‌کند.

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

$$\vec{F}_{۱۲}=-\vec{F}_{۲۱} \Rightarrow F_{۱۲}=F_{۲۱}=F$$

به کمک قانون کولن (رابطهٔ ۱ــ۱) می‌توان اندازهٔ نیروی الکتریکی‌ای را که دو ذرّهٔ باردار به یکدیگر وارد می‌کنند، محاسبه کرد. ربایشی یا رانشی بودن نیروها را به کمک نوع بارها مشخص می‌کنیم.

مثال ۱ــ۱

دو ذرّه با بارهای الکتریکی $q_1=+۲/۰\ \mu C$ و $q_2=-۵/۰\ \mu C$ در فاصلهٔ $۳/۰\ m$ از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی نیرویی که دو ذرّه به یکدیگر وارد می‌کنند و نوع آن را مشخص کنید.

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱ داریم :

$$F=k\frac{|q_1||q_2|}{r^{۲}}$$

$$=(۹/۰\times۱۰^{۹}\ N.m^{۲}/C^{۲})\times\frac{(۲/۰\times۱۰^{-۶}C)(۵/۰\times۱۰^{-۶}C)}{(۳/۰m)^{۲}}$$

$$=۱/۰\times۱۰^{-۲}N$$

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

ثابت کولن (k) را می‌توان برحسب یک ضریب ثابت دیگر به نام ضریب گذردهی الکتریکی خلأ ($\varepsilon_۰$) نیز نوشت :

$$k=\frac{۱}{۴\pi\varepsilon_۰}$$

که در آن

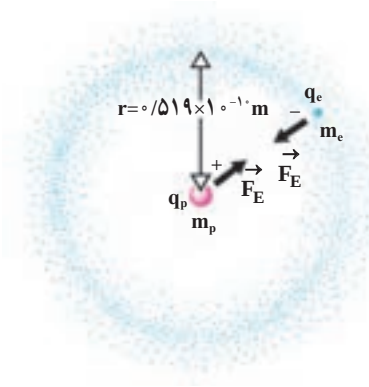
$$\varepsilon_۰=۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}C^{۲}/N.m^{۲}$$

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 ذرّه‌ای به‌طور معکوسی با فاصلهٔ بین آنها تغییر می‌کند، به چاپ رساند. نتیجهٔ 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.

۱ــ در بسیاری از مثال‌ها می‌توان برای سادگی محاسبه، مقدار k را $۹/۰\times۱۰^{۹}\ N.m^{۲}/C^{۲}$ درنظر گرفت.

مثال ۱ـ۲



اتم هیدروژن شامل یک الکترون به جرم تقریبی $۹/۱۱\times۱۰^{-۳۱}kg$ است که به‌دور پروتونی به جرم تقریبی $۱/۶۷\times۱۰^{-۲۷}kg$ در فاصلهٔ متوسط $۰/۵۲۹\times۱۰^{-۱۰}m$ از آن می‌چرخد. (الف) بزرگی نیروی الکتریکی بین این دو ذرّه را محاسبه کنید. (ب) بزرگی نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه و آن را با نیروی الکتریکی مقایسه کنید. $(G=۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}N.m^۲/kg^۲)$

پاسخ :

(الف) با استفاده از قانون کولن برای بزرگی نیروی الکتریکی بین دو ذرّه داریم .

$$F_E = k\frac{|q_p||q_e|}{r^۲} = (۸/۹۹\times۱۰^۹N.m^۲/C^۲)\frac{(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}C)(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}C)}{(۰/۵۲۹\times۱۰^{-۱۰}m)^۲}$$

$$= ۸/۱۹\times۱۰^{-۸}N$$

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

$$F_G = G\frac{m_p m_e}{r^۲} = (۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}N.m^۲/kg^۲)\frac{(۱/۶۷\times۱۰^{-۲۷}kg)(۹/۱۱\times۱۰^{-۳۱}kg)}{(۰/۵۲۹\times۱۰^{-۱۰}m)^۲}$$

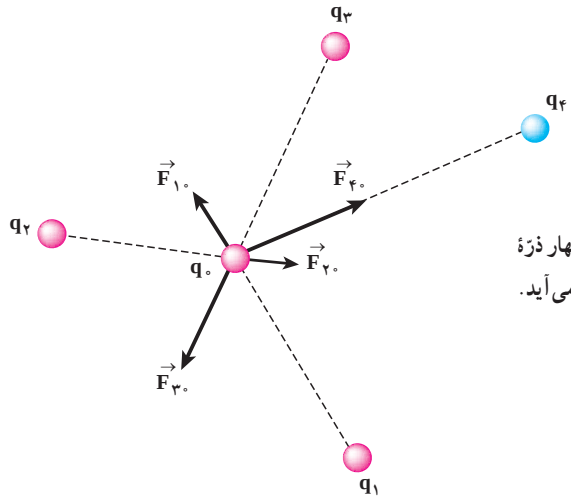
$$= ۳/۶۱\times۱۰^{-۴۷}N$$

درنتیجه نسبت بزرگی این نیروها چنین می‌شود :

$$\frac{F_E}{F_G} = \frac{۸/۱۹\times۱۰^{-۸}N}{۳/۶۱\times۱۰^{-۴۷}N} = ۲/۲۷\times۱۰^{۳۹}$$

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

تجربه نشان می‌دهد اگرتعدادی ذرّهٔ باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذرّه، برایند نیروهایی است که هر یک از ذرّه‌های دیگر در غیاب سایر ذرّه‌ها، بر آن ذرّه وارد می‌کند. برای مثال، شکل ۱ـ۴ نیروهای وارد بر بار $q_۰$ از سوی چهار بار دیگر را نشان می‌دهد. این موضوع که از آزمایش نتیجه شده است را اصل بر هم‌نهی نیروهای کولنی می‌گویند.



شکل ۱ـ۴ نیروی وارد بر بار $q_۰$، از جمع برداری نیروهایی که چهار ذرّهٔ باردار دیگر در غیاب بقیهٔ بارها به این ذرّه وارد می‌کنند، به‌دست می‌آید.

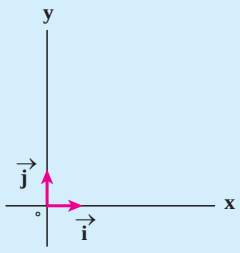
$$\vec{F}_{T۰} = \vec{F}_{۱۰} + \vec{F}_{۲۰} + \vec{F}_{۳۰} + \vec{F}_{۴۰}$$

الکترونیکی ساکن

یادداشت ریاضی

نمایش یک بردار برحسب بردارهای یکه و مؤلفه‌های یک بردار روی محور مختصات

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



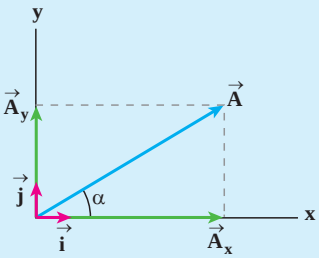
(الف)

$|\vec{i}|=|\vec{j}|=$ واحد ۱

اگر اندازهٔ جبری مؤلفه‌های بردار $\vec{A}$ روی محور x و y به ترتیب برابر A_x و A_y باشد، این بردار به‌صورت 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 y و x رسم می‌کنیم تا محورها را قطع کنند. به این ترتیب بردارهای $\vec{A}_x$ و $\vec{A}_y$ به‌دست می‌آیند که همان مؤلفه‌های بردار $\vec{A}$ در راستای دو محور است.



(ب)

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

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

بنابراین

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

بزرگی بردار $\vec{A}$ را می‌توان با استفاده از مثلث قائم‌الزاویهٔ شکل ب به‌دست آورد :

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

و در نتیجه :

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

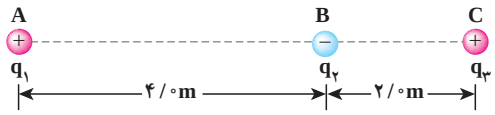
جهت بردار $\vec{A}$ را با تعیین زاویهٔ این بردار با سوی مثبت محور x به‌دست می‌آوریم. اگر در شکل ب تانژانت زاویهٔ α را حساب کنیم، نتیجه می‌شود :

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

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

مثال ۱ـ۳

سه ذرّه با بارهای الکتریکی $q_1=+2/5\mu C$، $q_2=-1/0\mu C$ و $q_3=+4/0\mu C$ درنقطه‌های A، B و C مطابق شکل زیر ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی وارد بر q_3 را محاسبه کنید.



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

فاصلهٔ بین بارهای q_1 و q_3 را با r_{13} و فاصلهٔ بین بارهای q_2 و q_3 را با r_{23} نشان می‌دهیم. با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱ داریم :

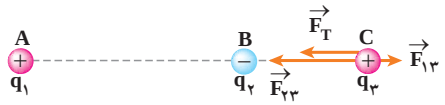
$$F_{13}=k\frac{|q_1||q_3|}{r_{13}^2}=(9/0\times10^9\ N.m^2/C^2)\ \frac{(2/5\times10^{-6}C)(4/0\times10^{-6}C)}{(6/0m)^2}$$

$$=2/5\times10^{-3}N$$

$$F_{23}=k\frac{|q_2||q_3|}{r_{23}^2}=(9/0\times10^9\ N.m^2/C^2)\ \frac{(1/0\times10^{-6}C)(4/0\times10^{-6}C)}{(2/0m)^2}$$

$$=9/0\times10^{-3}N$$

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



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

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

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

$$F_T=F_{23}-F_{13}=6/5\times10^{-3}N$$

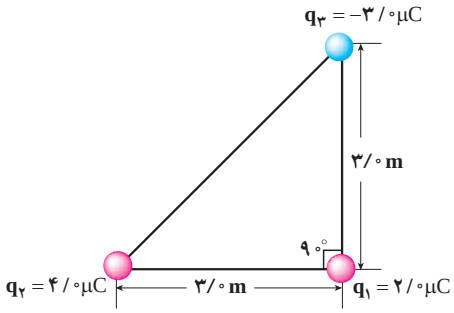
و جهت آن در جهت نیروی بزرگ‌تر ($\vec{F}_{23}$) است. اگر محور x را روی خط واصل سه بار و جهت مثبت آن را به سمت راست درنظر بگیریم و بردار یکهٔ محور x را، $\vec{i}$ بنامیم، داریم :

$$\vec{F}_T=(-6/5\times10^{-3}N)\,\vec{i}$$

تمرین ۱ـ۱

در مثال ۱ــ۳، نیروی وارد بر بار q_2 را به‌دست آورید.

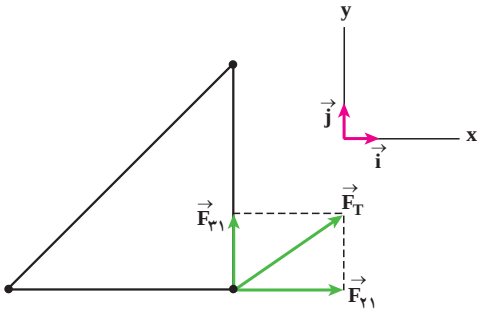
مثال ۱ـ۴



سه ذرّهٔ باردار مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ای ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی وارد بر ذرّهٔ 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 رابطهٔ ۱ـ۱ داریم :

$$F_{21} = k\frac{|q_2||q_1|}{r_{21}^2}$$
$$= (9/0\times10^{9}\,N.m^2/C^2)\frac{(4/0\times10^{-6}\,C)(2/0\times10^{-6}\,C)}{(3/0\,m)^2}$$
$$= 8/0\times10^{-3}\,N$$



با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده، $\vec{F}_{21}$ در جهت مثبت محور x است و بنابراین :

$$\vec{F}_{21} = (8/0\times10^{-3}\,N)\,\vec{i}$$

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

$$F_{31} = k\frac{|q_3||q_1|}{r_{31}^2} = (9/0\times10^{9}\,N.m^2/C^2)\frac{(3/0\times10^{-6}\,C)(2/0\times10^{-6}\,C)}{(3/0\,m)^2}$$
$$= 6/0\times10^{-3}\,N$$

با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده $\vec{F}_{31}$ درجهت مثبت محور y است و بنابراین،

$$\vec{F}_{31} = (6/0\times10^{-3}\,N)\,\vec{j}$$

برایند نیروهای الکتریکی وارد بر بار q_1 برابر است با

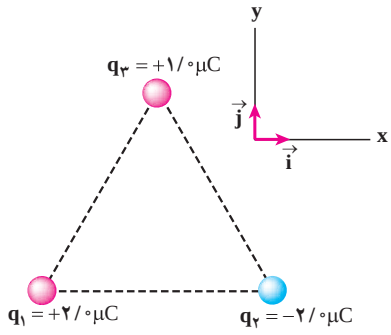
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} = (8/0\times10^{-3}\,N)\,\vec{i} + (6/0\times10^{-3}\,N)\,\vec{j}$$

و بزرگی آن از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$F_T = \sqrt{(8/0\times10^{-3}\,N)^2 + (6/0\times10^{-3}\,N)^2}$$
$$= 1/0\times10^{-2}\,N$$

مثال ۱ـ۵

سه ذرّهٔ باردار، مطابق شکل در سه رأس مثلث متساوی‌الاضلاعی به ضلع ۱/۵m ثابت شده‌اند.



الف) نیرویی که بار $q_۱$ بر بار $q_۳$ وارد می‌کند ($\vec{F}_{۱۳}$) را بر حسب بردارهای یکهٔ $\vec{i}$ و $\vec{j}$ دستگاه مختصات نشان داده شده در شکل بنویسید.

ب) نیروی $\vec{F}_{۲۳}$ را نیز برحسب بردارهای یکه بنویسید.

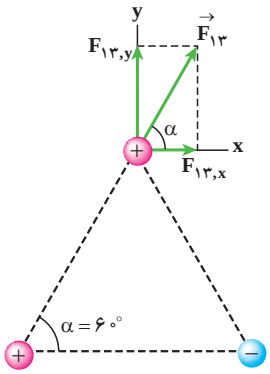
پ) برایند نیروهای وارد بر بار $q_۳$ را به‌دست آورید.

پاسخ :

الف) بزرگی نیرویی که بار $q_۱$ بربار $q_۳$ وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به‌دست می‌آوریم :

$$F_{۱۳} = k\frac{|q_۱||q_۳|}{r_{۱۳}^۲} = (۹/۰\times۱۰^۹\,N.m^۲/C^۲)\frac{(۲/۰\times۱۰^{-۶}\,C)(۱/۰\times۱۰^{-۶}\,C)}{(۱/۵m)^۲}$$
$$= ۸/۰\times۱۰^{-۳}N$$

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی $\vec{F}_{۱۳}$ دارای مؤلفه‌های x و y است، به‌طوری که :

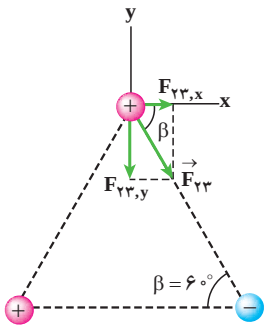


$$F_{۱۳,x}=F_{۱۳}\cos\alpha=(۸/۰\times۱۰^{-۳}N)\cos۶۰^\circ=۴/۰\times۱۰^{-۳}N$$
$$F_{۱۳,y}=F_{۱۳}\sin\alpha=(۸/۰\times۱۰^{-۳}N)\sin۶۰^\circ=۶/۹\times۱۰^{-۳}N$$

بنابراین، نیروی $\vec{F}_{۱۳}$ برحسب بردارهای یکه به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\vec{F}_{۱۳} = (۴/۰\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{i} + (۶/۹\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{j}$$

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم :



$$F_{۲۳} = k\frac{|q_۲||q_۳|}{r_{۲۳}^۲} = (۹/۰\times۱۰^۹\,N.m^۲/C^۲)\frac{(۲/۰\times۱۰^{-۶}\,C)(۱/۰\times۱۰^{-۶}\,C)}{(۱/۵m)^۲}$$
$$= ۸/۰\times۱۰^{-۳}N$$

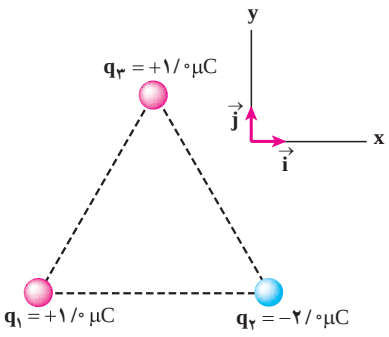
$$F_{۲۳,x}=F_{۲۳}\cos\beta=(۸/۰\times۱۰^{-۳}N)\cos۶۰^\circ=۴/۰\times۱۰^{-۳}N$$
$$F_{۲۳,y}=-F_{۲۳}\sin\beta=-(۸/۰\times۱۰^{-۳}N)\sin۶۰^\circ=-۶/۹\times۱۰^{-۳}N$$
$$\vec{F}_{۲۳} = (۴/۰\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{i} - (۶/۹\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{j}$$

پ) برایند نیروهای الکتریکی وارد بر بار $q_۳$ برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{۱۳} + \vec{F}_{۲۳} = (۸/۰\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{i}$$

مثال ۱ـ۷

سه ذرّهٔ باردار، مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث متساوی‌الاضلاعی به ضلع ۱/۵m ثابت شده‌اند.



الف) نیرویی که بار $q_۱$ بر بار $q_۳$ وارد می‌کند ($\vec{F}_{۱۳}$) را برحسب بردارهای یکهٔ $\vec{i}$ و $\vec{j}$ دستگاه مختصات نشان داده شده در شکل بنویسید.

ب) نیروی $\vec{F}_{۲۳}$ را نیز برحسب بردارهای یکه بنویسید.

پ) برایند نیروهای وارد بر بار $q_۳$ را به‌دست آورید.

ت) بزرگی بردار برایند نیروهای وارد بر بار $q_۳$ چقدر است؟

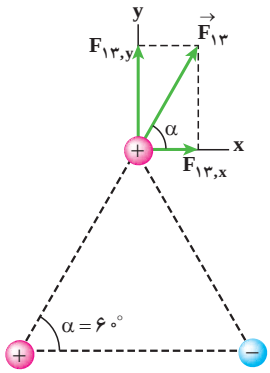
پاسخ :

الف) بزرگی نیرویی که بار $q_۱$ بر بار $q_۳$ وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به‌دست می‌آوریم :

$$F_{۱۳} = k\frac{|q_۱||q_۳|}{r_{۱۳}^۲} = (۹/۰\times۱۰^۹ N.m^۲/C^۲)\frac{(۱/۰\times۱۰^{-۶} C)(۱/۰\times۱۰^{-۶} C)}{(۱/۵m)^۲}$$

$$= ۴/۰\times۱۰^{-۳} N$$

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی $\vec{F}_{۱۳}$ دارای مؤلّفه‌های x و y است، به‌طوری‌که :



$$F_{۱۳,x} = F_{۱۳}\cos\alpha = (۴/۰\times۱۰^{-۳} N)\cos۶۰^\circ = ۲/۰\times۱۰^{-۳} N$$

$$F_{۱۳,y} = F_{۱۳}\sin\alpha = (۴/۰\times۱۰^{-۳} N)\sin۶۰^\circ = ۳/۵\times۱۰^{-۳} N$$

بنابراین، نیروی $\vec{F}_{۱۳}$ برحسب بردارهای یکه به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\vec{F}_{۱۳} = (۲/۰\times۱۰^{-۳} N)\,\vec{i} + (۳/۵\times۱۰^{-۳} N)\,\vec{j}$$

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم :

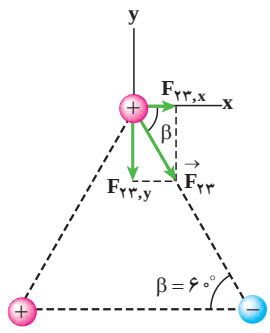
$$F_{۲۳} = k\frac{|q_۲||q_۳|}{r_{۲۳}^۲} = (۹/۰\times۱۰^۹ N.m^۲/C^۲)\frac{(۲/۰\times۱۰^{-۶} C)(۱/۰\times۱۰^{-۶} C)}{(۱/۵m)^۲}$$

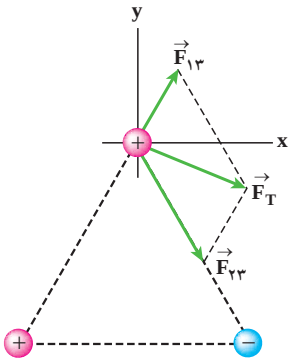
$$= ۸/۰\times۱۰^{-۳} N$$

$$F_{۲۳,x} = F_{۲۳}\cos\beta = (۸/۰\times۱۰^{-۳} N)\cos۶۰^\circ = ۴/۰\times۱۰^{-۳} N$$

$$F_{۲۳,y} = -F_{۲۳}\sin\beta = -(۸/۰\times۱۰^{-۳} N)\sin۶۰^\circ = -۶/۹\times۱۰^{-۳} N$$

$$\vec{F}_{۲۳} = (۴/۰\times۱۰^{-۳} N)\,\vec{i} - (۶/۹\times۱۰^{-۳} N)\,\vec{j}$$



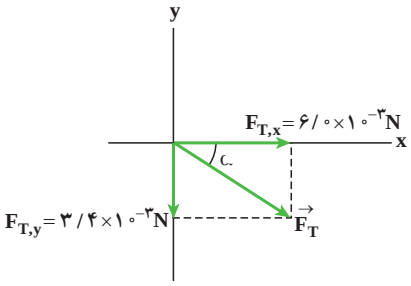


پ) برایند نیروهای وارد بر بار $q_۳$ برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{۱۳} + \vec{F}_{۲۳} = [(۲/۰\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{i} + (۳/۵\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{j}] + [(۴/۰\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{i} - (۶/۹\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{j}] = (۶/۰\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{i} - (۳/۴\times۱۰^{-۳}\,N)\,\vec{j}$$

بردار نیروی برایند $\vec{F}_T$ با استفاده از روش متوازی‌الاضلاع که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه آموختید در شکل روبه‌رو رسم شده است.

ت) بردار نیروی برایند $\vec{F}_T$ که در شکل قبل دیدیم را جداگانه همراه با محورهای x و y در شکل روبه‌رو به مقیاس رسم می‌کنیم. با استفاده از قضیهٔ فیثاغورس بزرگی $\vec{F}_T$ را به‌دست می‌آوریم :



$$F_T = \sqrt{F_{T,x}^۲ + F_{T,y}^۲} = \sqrt{(۶/۰\times۱۰^{-۳}\,N)^۲ + (-۳/۴\times۱۰^{-۳}\,N)^۲}$$

$$= ۶/۹\times۱۰^{-۳}N$$

تمرین ۱ـ۲

برایند نیروهای وارد بر بار $q_۱$ در مثال ۱ـ۶ را برحسب بردارهای یکّه محاسبه کنید.

توجه کنید که رابطهٔ ۱ـ۱ برای محاسبهٔ نیروی الکتریکی بین دو ذرّهٔ باردار به کار می‌رود. محاسبهٔ نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار که نتوان آنها را ذرّه فرض کرد (مانند دو کرهٔ باردار بزرگ که در فاصلهٔ کمی از هم قرار دارند) به چگونگی آرایش (یا توزیع) بار در دو جسم بستگی دارد و محاسبهٔ آن نیازمند ریاضیات پیشرفته‌تری است. اگر فاصلهٔ جسم باردار از ذرّهٔ باردار (یا جسم باردار دیگر) آن‌قدر زیاد باشد که ابعاد جسم در مقایسه با فاصلهٔ بین آنها قابل چشم‌پوشی باشد، می‌توان جسم را مانند یک ذرّهٔ باردار در نظر گرفت و از رابطهٔ ۱ـ۱ برای محاسبهٔ نیروی الکتریکی استفاده کرد.

۱ـ۲ـ میدان الکتریکی

در بخش ۱ـ۱ دیدیم که دوبار الکتریکی $q_۱$ و $q_۲$ که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار دارند، بر هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. ولی این پرسش مطرح می‌شود که بار $q_۲$ چطور حضور بار $q_۱$ را حس می‌کند. به‌عبارت دیگر این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می‌توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ چطور ممکن است چنین کنشِ از راه دوری وجود داشته باشد، بی‌آنکه بارها هیچ تماسی با یکدیگر داشته باشند؟ به این پرسش این طور می‌توان پاسخ گفت که بار $q_۱$ خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می‌کند که به آن اصطلاحاً میدان الکتریکی بار $q_۱$ گفته می‌شود. در واقع اگر بار $q_۲$ 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 به‌وسیلهٔ 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 به‌صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \qquad (۳\text{ـ}۱)$$

بنابه تعریف میدان الکتریکی (رابطهٔ ۱ـ۳)، میدان الکتریکی کمّیتی 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 رابطهٔ ۱ـ۳ یکای نیرو ($\vec{F}$)، نیوتون (N)، و یکای بار آزمون (q_0)، کولن (C) است و در نتیجه یکای میدان الکتریکی ($\vec{E}$)، نیوتون برکولن (N/C) می‌شود.

مثال ۱ـ۷

برای تعیین میدان الکتریکی در نقطه‌ای از فضا بار آزمون $+۲۰\,nC$ را در آن نقطه قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی $۵/۰\times۱۰^{-۳}N$ در راستای جنوب ــ شمال و به طرف شمال بر این بار وارد می‌شود. بزرگی و جهت میدان الکتریکی در این نقطه را مشخص کنید.

پاسخ : از رابطهٔ ۱ـ۳ می‌توان بزرگی میدان الکتریکی در نقطهٔ موردنظر را محاسبه کرد.

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

$$= \frac{۵/۰\times۱۰^{-۳}N}{۲۰\times۱۰^{-۹}C} = ۲/۵\times۱۰^{۵}\frac{N}{C}$$

جهت میدان در نقطهٔ موردنظر هم‌جهت با نیروی وارد بر بار آزمون، یعنی رو به شمال است.

۱ـ۳ـ میدان الکتریکی حاصل از یک ذرهٔ باردار

می‌خواهیم میدان الکتریکی ناشی از ذرّه‌ای با بار q را در نقطهٔ A که به فاصلهٔ r از بار q قرار دارد، محاسبه کنیم (شکل ۱ـ۵). برای این محاسبه از رابطهٔ ۱ـ۳ ($\vec{E} = \vec{F}/q_0$) استفاده می‌کنیم. اگر بار آزمون q_0 در نقطهٔ 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 رابطهٔ ($\vec{E} = \vec{F}/q_0$)، بزرگی میدان الکتریکی

شکل ۱ـ۵ می‌خواهیم میدان حاصل از بار q را در نقطهٔ A محاسبه کنیم.

بار q را در نقطهٔ A به‌دست می‌آوریم.

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

در نتیجه :

$$E=k\frac{|q|}{r^2} \qquad (۴_۱)$$

رابطهٔ ۱ــ۴ عامل‌های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از ذرّه‌ای با بار q را مشخص می‌کند. طبق این رابطه، میدان با اندازهٔ بار q نسبت مستقیم و با مجذور فاصله از آن، نسبت وارون دارد. همان‌طور که پیش‌تر دیدیم جهت بردار میدان الکتریکی $\vec{E}$ در نقطهٔ A، در همان جهت نیروی وارد بر بار آزمونی است که به‌طور ذهنی در نقطهٔ A می‌گذاریم.

مثال ۱ــ۸

بزرگی میدان الکتریکی ذرّه‌ای با بار $-۲/۰\,\mu C$ را در نقطهٔ M به فاصلهٔ الف) $۲/۰\,m$ و ب) $۲۰\,m$ از این بار الکتریکی محاسبه کنید و بردار میدان را در این نقطه برای حالت الف رسم کنید.

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۴ اندازهٔ میدان را در نقطه‌های موردنظر، به‌دست می‌آوریم :

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

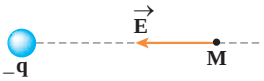
الف)

$$E_1=(۹/۰\times۱۰^۹\,N.m^2/C^2)\frac{(۲/۰\times۱۰^{-۶}\,C)}{(۲/۰\,m)^2}=۴/۵\times۱۰^۳\,\frac{N}{C}$$

ب)

$$E_2=(۹/۰\times۱۰^۹\,N.m^2/C^2)\frac{(۲/۰\times۱۰^{-۶}\,C)}{(۲۰\,m)^2}=۴۵\,\frac{N}{C}$$

برای رسم بردار میدان در نقطهٔ M بار آزمونی 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.



میدان بار $-q$ در نقطهٔ M

در بخش ۱ــ۱ دیدیم اگر چند بار نقطه‌ای مانند q_1، q_2 ، ... داشته باشیم برایند نیروهای الکتریکی حاصل از این بارها بر بار آزمون q_0 با استفاده از اصل برهم‌نهیِ نیروهای کولنی از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\vec{F}_{T0}=\vec{F}_{10}+\vec{F}_{20}+\cdots$$

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

$$\frac{\vec{F}_{T0}}{q_0}=\frac{\vec{F}_{10}}{q_0}+\frac{\vec{F}_{20}}{q_0}+\cdots$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots \qquad (۵ــ۱)$$

این رابطه که موسوم به اصل برهم نِهیِ 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 نبودِ سایر بارها در آن نقطه از فضا ایجاد می‌کند.

مثال ۱ـ۹

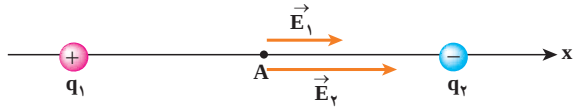
دو ذرّه با بارهای $q_1 = ۴/۰\,\mu C$، $q_2 = -۶/۰\,\mu C$ در فاصلهٔ $۸/۰\,m$ از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به‌دست آورید :

الف) در وسط خط واصل دو ذرّه،

ب) در نقطه‌ای به فاصلهٔ $۸/۰\,m$ از بار q_1 و $۱۶\,m$ 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. میدانِ حاصل از مجموعهٔ دوبار، برایند این دو میدان خواهد بود.

الف) در شکل زیر اگر بار آزمون را در نقطهٔ A واقع در وسط خط واصل دو ذرّه 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 نقطهٔ A هم‌جهت و به سوی بار q_2 (در سوی مثبت محور x) هستند.



با استفاده از اصل برهم نِهیِ 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 رابطهٔ ۱ــ۴ ($E=k|q|/r^2$) به‌دست می‌آوریم :

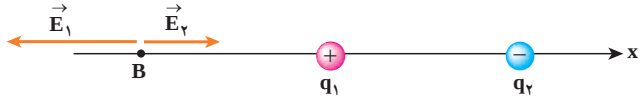
$$E_1 = k\frac{|q_1|}{r_1^2} = (۹/۰\times۱۰^۹\,N.m^2/C^2)\frac{(۴/۰\times۱۰^{-۶}\,C)}{(۴/۰\,m)^2} = ۲/۲\times۱۰^۳\,N/C$$

$$E_2 = k\frac{|q_2|}{r_2^2} = (۹/۰\times۱۰^۹\,N.m^2/C^2)\frac{(۶/۰\times۱۰^{-۶}\,C)}{(۴/۰\,m)^2} = ۳/۴\times۱۰^۳\,N/C$$

بنابراین :

$$\vec{E}_A = (۲/۲\times۱۰^۳\,N/C)\,\vec{i} + (۳/۴\times۱۰^۳\,N/C)\,\vec{i} = (۵/۶\times۱۰^۳\,N/C)\,\vec{i}$$

ب) اکنون اگر بار آزمون را در نقطهٔ B قرار دهیم شکل میدان‌ها به‌صورت زیر در می‌آید :



با استفاده از اصل برهم نهیِ میدان‌های الکتریکی داریم :

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

که در آن E_1 و E_2 برابرند با :

$$E_1 = k\frac{|q_1|}{r_1^2} = (9/0\times10^9\ \mathrm{N.m^2/C^2})\frac{4/0\times10^{-6}}{(8/0\mathrm{m})^2} = 5/6\times10^2\ \mathrm{N/C}$$

$$E_2 = k\frac{|q_2|}{r_2^2} = (9/0\times10^9\ \mathrm{N.m^2/C^2})\frac{(6/0\times10^{-6}\mathrm{C})}{(16\mathrm{m})^2} = 2/1\times10^2\ \mathrm{N/C}$$

بنابراین :

$$\vec{E}_B = (-5/6\times10^2\ \mathrm{N/C})\,\vec{i} + (2/1\times10^2\ \mathrm{N/C})\,\vec{i} = (-3/5\times10^2\ \mathrm{N/C})\,\vec{i}$$

مثال ۱ـ۱۰

دو ذره با بارهای $q_1 = +50\,\mathrm{nC}$ و $q_2 = -50\,\mathrm{nC}$ در فاصلهٔ $2a = 16\,\mathrm{cm}$ از یکدیگر ثابت شده‌اند. میدان الکتریکی را روی عمودمنصف خطی که دو ذرّه را به یکدیگر وصل می‌کند و به فاصلهٔ $x = 6/0\,\mathrm{cm}$ از وسط خط واصل دو ذرّه، به‌دست آورید. به مجموعهٔ 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 نقطهٔ موردنظر هم‌اندازه‌اند.

$$r_1 = r_2 = \sqrt{a^2 + x^2} = \sqrt{(8/0\mathrm{cm})^2 + (6/0\mathrm{cm})^2} = 10\mathrm{cm}$$

با استفاده از رابطهٔ ۱ـ۴ داریم :

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

$$E_1 = E_2 = (9/0\times10^9\ \mathrm{N.m^2/C^2})\frac{(50\times10^{-9}\mathrm{C})}{(10\times10^{-2}\mathrm{m})^2} = 4/5\times10^4\ \mathrm{N/C}$$

در نتیجه برای مؤلفه در نقطه M داریم :

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

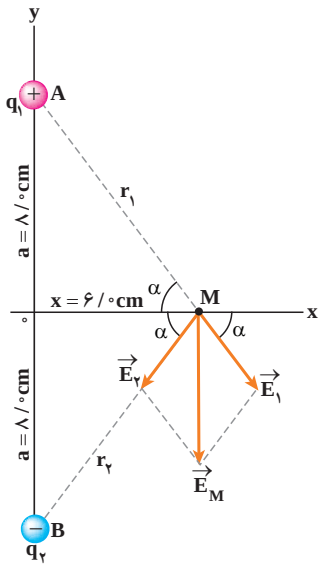
$$\cos\alpha = \frac{x}{r_1} = \frac{6/0\mathrm{cm}}{10\mathrm{cm}} = 0/60$$

$$E_{1x} = -E_{2x} = (4/5\times10^4\ \mathrm{N/C})(0/60) = 2/7\times10^4\ \mathrm{N/C}$$

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

$$\sin\alpha = \frac{a}{r_1} = \frac{8/0\mathrm{cm}}{10\mathrm{cm}} = 0/80$$

$$E_{1y} = E_{2y} = -(4/5\times10^4\ \mathrm{N/C})(0/8) = -3/6\times10^4\ \mathrm{N/C}$$



با توجه به اینکه $E_{1x} = -E_{2x}$ است، مؤلفهٔ x میدان الکتریکیِ برایند صفر است و با توجه به اینکه $E_{1y} = E_{2y}$ است، مؤلفهٔ y ی میدان الکتریکی برایند $2E_{1y}$ است و داریم :

$$\vec{E} = 2E_{1y}\,\vec{j} = 2\times(-3/6\times10^4\ \mathrm{N/C})\,\vec{j} = (-7/2\times10^4\ \mathrm{N/C})\,\vec{j}$$

تمرین ۱ـ۳

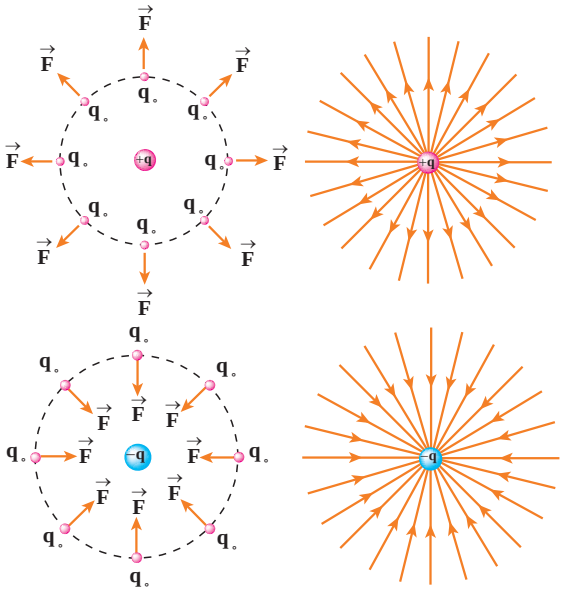
میدان الکتریکی حاصل از دوقطبی مثال ۱ـ۱۰ را در نقطه‌ای روی محور دوقطبی (محور y) و به فاصلهٔ ۱۶ cm از مرکز دوقطبی (نقطهٔ مبدأ) به‌دست آورید.

۱ـ۴ـ 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.

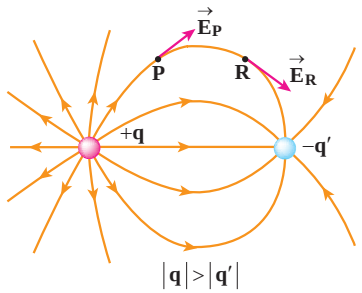
این خط‌ها دارای ویژگی‌های زیرند :

۱ـ خط‌های میدان در هر نقطه، هم‌جهت با نیروی وارد بر بار آزمون (مثبت) واقع در آن نقطه‌اند. درنتیجه، جهت این خط‌ها برای بار مثبت روبه خارج و برای بار منفی روبه داخل است (شکل ۱ـ۶).

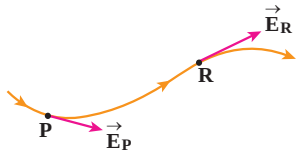


شکل ۱ـ۶ خط‌های میدان الکتریکی در هر نقطه هم‌جهت با نیروی وارد بر بار آزمون مثبت واقع در آن نقطه است.

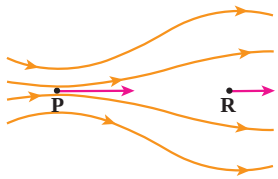
۲ـ میدان در هر نقطه ، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم‌جهت است (شکل ۱ـ۷).



شکل ۱ـ۷ میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خطِ میدان هم‌جهت است.



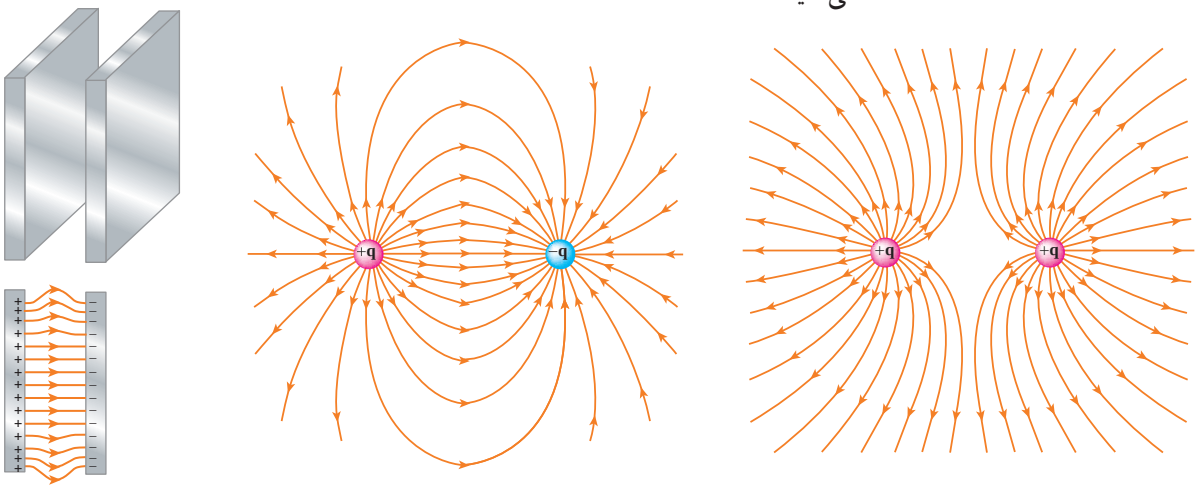
۳ـ در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خط‌های میدان به یکدیگر نزدیک‌تر و فشرده‌ترند (شکل ۱ـ۸).



شکل ۱ـ۸ در نقطهٔ P خطوط میدان به یکدیگر نزدیک‌ترند، و بنابراین $E_P > E_R$ است.

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

در شکل ۱ــ۹ خطوط میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



الف) دو بار الکتریکی مثبت و هم‌اندازه

ب) دو بار الکتریکی ناهمنام و هم‌اندازه

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

شکل ۱ــ۹ میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار

آزمایش ۱ــ۱

مشاهدهٔ طرح خطوط میدان الکتریکی

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

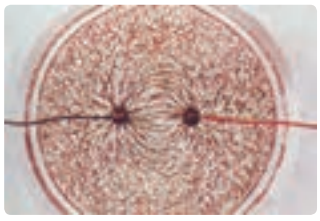
شرح آزمایش :

۱ــ روغن را در ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی بریزید.

۲ــ دو الکترود را به‌صورت دو گلولهٔ فلزی درآورید و درون روغن قرار دهید. سپس الکترودها را با سیم‌های رابط به پایانه‌های خروجی مولّد واندوگراف وصل کنید.

۳ــ مولّد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای بین دو الکترود بپاشید.

۴ــ اکنون به سمت‌گیری دانه‌های بذر در فضای بین دو الکترود توجه کنید (شکل الف) و با استفاده از آن طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکترود رسم کنید.



(الف)

(ب)

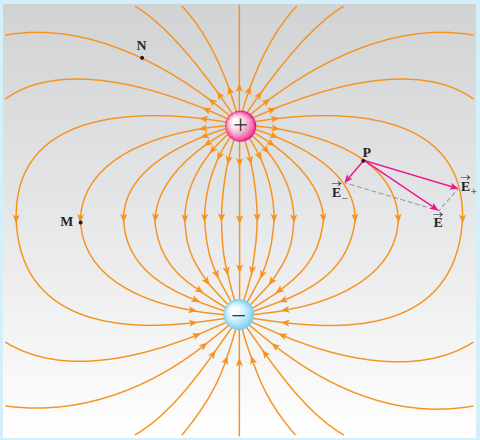
۵ــ این بار دو الکترود را به‌صورت دو صفحهٔ موازی درون ظرف روغن قرار دهید و آنها را با سیم‌های رابط به پایانه‌های خروجی مولّد واندوگراف وصل کنید.

۶ــ مولد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای میان دو الکترود بپاشید.

۷ــ دوباره به سمت‌گیری دانه‌های بذر در فضای میان دو الکترود توجه کنید (شکل ب) و با استفاده از آن، طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکترود رسم کنید.

۸ــ برای آنکه بتوانید طرح خطوط میدان را به صورت سه‌بُعدی ببینید، به‌جای بذر چمن از بریده‌های کوچک نخ استفاده کنید و آن را پیش از انجام آزمایش در ظرف شیشه‌ای شفافی با عمق مناسب که حاوی روغن است کاملاً به هم بزنید و سپس الکترودها را مطابق آزمایش‌های قبل به مولّد واندوگراف متصل کنید.

فعالیت ۱ـ۱



۱ــ درشکل ۱ــ۹ــ پ میدان الکتریکی در فضای بین دوصفحه و دور از لبه‌های آن، یکنواخت است. با توجه به تعریف میدان الکتریکی و ویژگی‌های خط‌های میدان، برای میدان الکتریکی یکنواخت تعریفی بیان کنید.

۲ــ در شکل روبه‌رو میدان الکتریکی برایند یک دوقطبی الکتریکی در نقطهٔ P رسم شده است. میدان برایند در نقطه‌های M و N را به‌دقت رسم کنید.

۱ــ۵ــ نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی

گرچه برای تعریف میدان الکتریکی یک جسم باردار از بار آزمون مثبت استفاده کردیم ($\vec{E} = \vec{F}/q_0$) 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 رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\vec{F} = q\vec{E} \qquad (۶ــ۱)$$

بزرگی این نیرو از رابطهٔ $F = |q|E$ به‌دست 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 ۱ـ۱۱

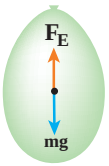
در بادکنکی به جرم ۱۰/۰ g بار الکتریکی ۲۰۰ nC− ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، به‌طوری که نیروی وزن بادکنک با نیروی الکتریکی وارد بر آن موازنه شود. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را تعیین کنید. ($g = ۹/۸۰ m/s^۲$)

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[۱] :

$$F_E = mg$$

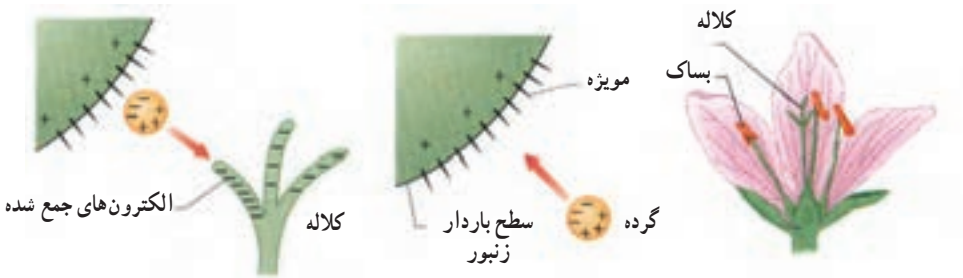
$$|q|E = mg$$

$$\Rightarrow E = \frac{mg}{|q|} = \frac{(۱۰/۰\times۱۰^{-۳}\,kg)(۹/۸۰ N/kg)}{۲۰۰\times۱۰^{-۹}\,C} = ۴/۹۰\times۱۰^{۵}\,N/C$$



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

زنبورهای عسل و گرده‌افشانی گل‌ها : زنبورهای عسل معمولاً در حین پرواز دارای بار مثبت می‌شوند و وقتی به گردهٔ بدون باری روی بساک یک گل (شکل ۱ـ۱۰ـ الف) می‌رسند که از لحاظ الکتریکی خنثی است، میدان الکتریکی آنها روی گرده بارهای مثبت و منفی القا می‌کند، به‌طوری که آن سمت گرده که به طرف زنبور است دارای بار منفی می‌شود و به این ترتیب گرده به سوی زنبور کشیده می‌شود (شکل ۱ـ ۱۰ـ ب). گرده‌ها روی مویزه‌های ریز زنبور قرار می‌گیرند و سپس وقتی زنبور در اطراف کلالهٔ 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 کلالهٔ گل کشیده می‌شود (شکل ۱ـ۱۰ـ پ) و گرده‌افشانی صورت می‌پذیرد.



الف) اجزای بساک و کلالهٔ یک گل

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

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

شکل ۱ـ۱۰

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

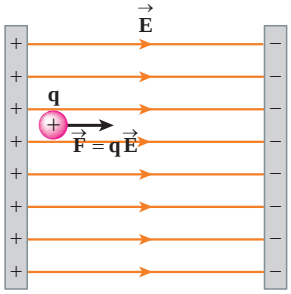
فعالیت ۱ـ۲

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.

۱ـ۶ ـ انرژی پتانسیل الکتریکی

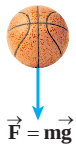
آرایش دو ذرّهٔ باردار الکتریکی شکل ۱ـ۱۱ را درنظر بگیرید که در آن، بار q_1+ درجای خود ثابت و بار q_2+ در فضای اطراف آن رها شده است. می‌دانیم بار q_2+ بر اثر میدان الکتریکی حاصل از بار q_1+ از آن رانده و دارای انرژی جنبشی می‌شود. به‌نظر شما این انرژی جنبشی از کجا آمده است؟ طبق قانون پایستگی انرژی، انرژی جنبشی نمی‌تواند خود به خود به‌وجود آمده باشد. این انرژی، ناشی از انرژی پتانسیلی است که به نیروی الکتریکی بین دو ذرّهٔ آرایش شکل ۱ـ۱۱ وابسته است و به آن انرژی پتانسیل الکتریکی می‌گوییم. برای آنکه به توصیفی کمّی از این انرژی دست یابیم، میدان الکتریکی یکنواختی را مطابق شکل ۱ـ۱۲ درنظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحهٔ باردار برقرار شده است.

شکل ۱ـ۱۱ ذرهٔ با بار q_2+ در میدان الکتریکی فضای اطراف بار q_1+ رها شده است.



شکل ۱ـ۱۲ بار الکتریکی q+ از مجاورت صفحهٔ مثبت رها می‌شود و به‌تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.

اگر بار الکتریکی q+ را از مجاورت صفحه مثبت رها کنیم، به طرف صفحهٔ منفی شروع به حرکت می‌کند و به‌تدریج 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 به‌تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۱ـ۱۳). همچنین دیدیم تغییر انرژی پتانسیل گرانشی برابر با منفیِ کار نیروی گرانشی است.



شکل ۱ـ۱۳ جسم از نزدیکی سطح زمین رها می‌شود و به‌تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.

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

$$\Delta U_E = -W_E \qquad (۷ـ۱)$$

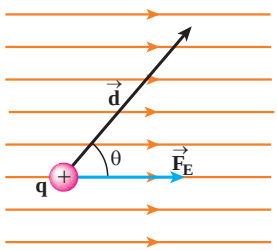
گرچه این رابطه برای یک میدان الکتریکی یکنواخت بیان شد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر میدان الکتریکی ناشی از بارهای ساکن (میدان الکتروستاتیکی) برقرار است.

تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک بار ذرّه‌ای در میدان الکتریکی یکنواخت : بار ذره‌ای q را در میدان الکتریکی یکنواخت $\vec{E}$ درنظر بگیرید که مطابق شکل ۱ـ۱۴ جابه‌جایی $\vec{d}$ را انجام داده است. کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

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

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

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



شکل ۱ـ۱۴ نیروی الکتریکی وارد بر بار q+ درحین جابه‌جایی $\vec{d}$ درون میدان الکتریکی یکنواخت.

اکنون با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۷ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار ذره‌ای q چنین محاسبه می‌شود :

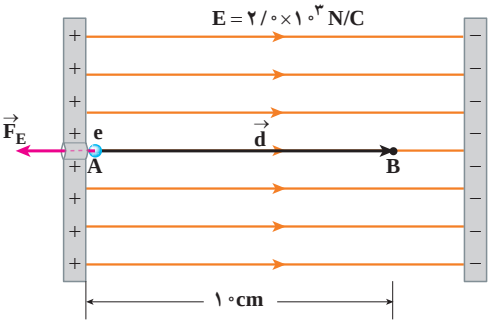
$$\Delta U_E = -W_E = -|q|\, E\, d\cos\theta \qquad (۱ــ۸)$$

که در آن، θ زاویهٔ 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)، اندازهٔ جابه‌جایی (d) برحسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی (ΔU_E) برحسب ژول (J) است.

توجه کنید که رابطهٔ ۱ــ۸ چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذرّه‌ای منفی برقرار است. به این منظور، مثال زیر را ملاحظه کنید.

مثال ۱ـ۱۲

در میدان الکتریکی یکنواخت نشان داده شده در شکل، الکترونی از نقطهٔ A با سرعت v_0 پرتاب شده است. الکترون سرانجام در نقطهٔ B متوقف می‌شود. بار الکترون $-1/6\times10^{-19}C$ و جرم آن $9/1\times10^{-31}kg$ است.



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

ب) سرعت پرتاب الکترون را پیدا کنید.

پاسخ :

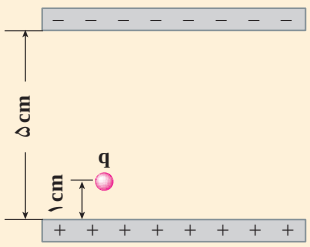
الف) با توجه به رابطهٔ ۱ــ۸ داریم :

$$\Delta U_E = -|q|\,E\,d\cos\theta = -(1/6\times10^{-19}C)(2/0\times10^{3}N/C)(10\times10^{-2}m)(\cos180^\circ)$$
$$= 3/2\times10^{-17}J$$

ب) طبق قضیهٔ کار و انرژی می‌توان نوشت :

$$W_E = \Delta K \Rightarrow -\Delta U_E = \frac{1}{2}m(0 - v_0^2)$$
$$-3/2\times10^{-17}J = \frac{1}{2}(9/1\times10^{-31}kg)(-v_0^2) \Rightarrow v_0 = 8/4\times10^{6}m/s$$

تمرین ۱ـ۴



مطابق شکل، یک غبار که دارای بار الکتریکی $1/0\times10^{-15}C$ و جرم $1/0\times10^{-8}g$ است در میدان الکتریکی یکنواخت $1/2\times10^{5}N/C$ بین دو صفحهٔ افقی قرار گرفته است. اگر غبار در ابتدا ساکن و به فاصلهٔ 1/0 cm از صفحهٔ پایینی قرار داشته باشد، در چه مدتی به صفحهٔ بالایی می‌رسد؟

۱ــ۷ــ پتانسیل الکتریکی

در رابطهٔ ۱ــ۸ دیدیم که تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی برای هر ذرهٔ بارداری (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** دونقطه‌ای می‌گوییم که ذرّه میان آنها جابه‌جا شده است و آن را با ΔV نمایش می‌دهیم :

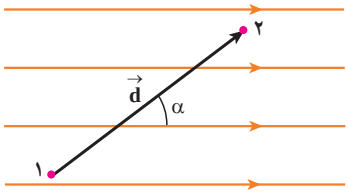
$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \qquad (۹ــ۱)$$

در این رابطه، تغییرانرژی پتانسیل الکتریکی (ΔU) برحسب ژول (J)، بار الکتریکی (q) برحسب کولن (C) و اختلاف پتانسیل الکتریکی (ΔV) برحسب 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 درنظر 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 ۱ــ۸ و ۱ــ۹ می‌توان نشان داد در میدان الکتریکی یکنواخت شکل ۱ــ۱۵داریم :

$$\Delta V = V_۲ - V_۱ = -E\, d \cos\alpha \qquad (۱۰ــ۱)$$



شکل ۱ــ۱۵ در این شکل α زاویهٔ بین میدان الکتریکی و جابه‌جایی است.

در این رابطه، اختلاف پتانسیل (ΔV) برحسب ولت (V)، میدان الکتریکی (E) برحسب ولت بر متر (V/m)، جابه‌جایی (d) برحسب متر (m) و α *زاویهٔ بین میدان الکتریکی و جابه‌جایی* است. همان‌طور که مشخص است این رابطه به ازای $\alpha=۰$ به $\Delta V=-Ed$ می‌انجامد.

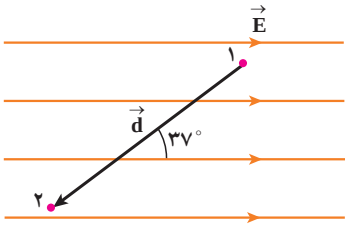
فعالیت ۱ــ۳

الف) درستی رابطهٔ ۱ــ۱۰ را یک بار برای بار مثبت و یک بار برای بار منفی نشان دهید.

ب) نشان دهید یکاهای، «نیوتون بر کولن» و «ولت‌بر متر» که برای میدان الکتریکی به‌کار می‌روند، معادل یکدیگرند.

از فعالیت ۱ــ۳ الف درمی‌یابیم با حرکت در سوی خطوط میدان، از پتانسیل الکتریکی بیشتر به پتانسیل الکتریکی کمتر رفته‌ایم و بالعکس.

مثال ۱ـ۱۳



در میدان الکتریکی یکنواخت شکل مقابل که بزرگی آن $E = ۵/۰ \times ۱۰^{۵} V/m$ است :

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

ب) اگر بار نقطه‌ای $q = +۲/۰ nC$ از نقطهٔ ۱ به نقطهٔ ۲ جابه‌جا شود، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن و کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی را به‌دست آورید. ($d = ۱۰ cm$ و $\cos ۳۷^\circ = ۰/۸۰$)

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۱ـ۱۰ داریم :

$$\Delta V = V_۲ - V_۱ = -E\, d \cos \alpha$$

دقت کنید که α زاویهٔ بین خطوط میدان و جابه‌جایی و برابر با $۱۸۰^\circ - ۳۷^\circ$ است؛ در نتیجه داریم :

$$\Delta V = -(۵/۰ \times ۱۰^{۵} V/m)(۱۰ \times ۱۰^{-۲} m)(-۰/۸۰) = ۴/۰ \times ۱۰^{۴} V$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۱ـ۹ داریم :

$$\Delta U = q\Delta V = (۲/۰ \times ۱۰^{-۹} C)(۴/۰ \times ۱۰^{۴} V) = ۸/۰ \times ۱۰^{-۵} J = ۸۰ \mu J$$

و از آنجا

$$W_E = -\Delta U = -۸۰ \mu J$$

در تشابه با انرژی پتانسیل گرانشی، در اینجا نیز می‌توانیم برای انرژی پتانسیل الکتریکی مرجعی اختیار کنیم. در نقطهٔ مرجع، انرژی پتانسیل الکتریکی ذرهٔ باردار، صفر و پتانسیل الکتریکی در آن نقطه نیز صفر است. بنابراین، پتانسیل الکتریکی (V) در هر نقطه از میدان به‌صورت زیر می‌شود :

$$V = \frac{U}{q} \qquad (۱۱ـ۱)$$

شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ‌قوه یا رادیو از آنها استفاده می‌شود و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها معمولاً ۱/۵ ولتی، ۴/۵ ولتی یا ۹ ولتی‌اند. باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ولتی 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 پایانهٔ منفی را با $-V$ و پتانسیل پایانهٔ مثبت را با $+V$ نشان دهیم، داریم :

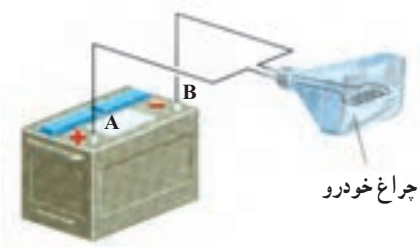
$$\Delta V = V_+ - V_- = ۱۲V$$

بنابراین، پتانسیل پایانهٔ مثبت به اندازهٔ ۱۲ ولت از پتانسیل پایانهٔ منفی آن بیشتر است. مثلاً اگر پتانسیل پایانهٔ منفی را برابر با $-۴V$ یا $+۴V$ فرض کنیم، پتانسیل پایانهٔ مثبت به ترتیب برابر $+۸V$ یا $+۱۶V$ خواهد شد. می‌توان پایانهٔ منفی را مرجع پتانسیل درنظر گرفت؛ در این صورت، پتانسیل پایانهٔ مثبت برابر $+۱۲V$ می‌شود. معمولاً (به‌خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین یا نقطه‌ای از مدار را برابر صفر می‌گیرند و به آن نقطه اصطلاحاً نقطهٔ زمین می‌گویند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به آن می‌سنجند.

تمرین ۱ـ۵

اگر پایانهٔ مثبت یک باتری ۱۲ ولتی را مرجع پتانسیل درنظر بگیریم، پتانسیل پایانهٔ منفی آن چند ولت خواهد شد؟

مثال ۱ـ۱۴



اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر ۱۲V است. اگر در مدت ۱۰s بار الکتریکی ۵۰− کولن از پایانهٔ منفی به پایانهٔ مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۱ـ۹ داریم :

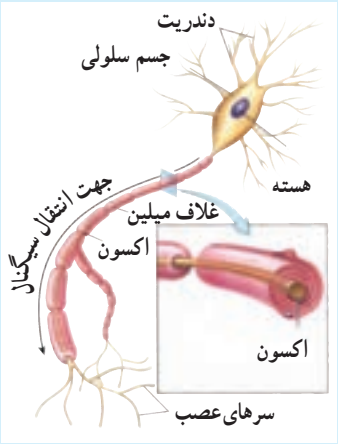
$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

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

$$= (-۵۰C)(+۱۲V) = -۶/۰\times۱۰^۲ J$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازهٔ $۶/۰ \times ۱۰^۲ J$ کاهش یافته است.

فعالیت ۱ـ۴



عمل مغز اساساً برمبنای کنش‌ها و فعالیت‌های الکتریکی است. سیگنال‌های عصبی چیزی جز عبور جریان‌های الکتریکی نیست. مغز این سیگنال‌ها را دریافت می‌کند و اطلاعات نیز به‌صورت 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. دربارهٔ چگونگی کار نورون‌ها تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

مطالعهٔ آزاد

الکتروکاردیو گرافی و الکترومیوگرافی

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

در الکترومیوگرافی که به اختصار EMGخوانده می‌شود، سوزن نازکی که حاوی دو الکترود است به درون ماهیچهٔ

دست بیمار فرو برده می‌شود و سیگنال‌های الکتریکی حاصل از این ماهیچه‌ها ثبت و اختلاف پتانسیل بین الکترودها با استفاده از ولت‌سنج حساسی اندازه‌گیری می‌شود. بدین ترتیب پزشک می‌تواند فعالیت الکتریکی ماهیچه‌ها را بکاود و بیماری‌های عصبی ــ ماهیچه‌ای را تشخیص دهد.

کار انجام شده توسط نیروی خارجی : فرض کنید در یک میدان الکتریکی ذرّه‌ای با بار q را با اعمال نیرویی از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر جابه‌جا می‌کنیم (شکل ۱ــ۱۶). در حین این حرکت، نیروی خارجی ما کار $W_{خارجی}$ را روی بار انجام می‌دهد، درحالی که نیروی الکتریکی نیز کار W_E را روی آن انجام داده است. با استفاده از قضیهٔ کار ــ انرژی، تغییر انرژی جنبشی بار q چنین می‌شود :

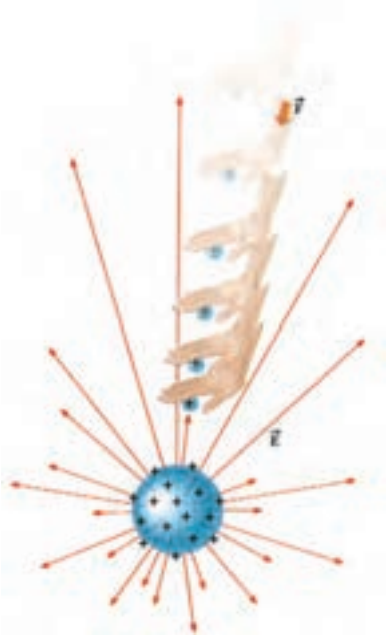
$$\Delta K = W_{خارجی} + W_E$$

حال فرض کنید که بار q پیش و پس از این حرکت ساکن باشد. آنگاه معادلهٔ بالا به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$W_{خارجی} = - W_E = q\,\Delta V \qquad (۱ــ۱۲)$$

که در آن از رابطه‌های ۱ــ۷ ($W_E = - \Delta U_E$) و ۱ــ۹ ($\Delta U = q\Delta V$) استفاده کرده‌ایم.

بسته به علامت و بزرگی q و ΔV، کار $W_{خارجی}$ می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد.



شکل ۱ــ۱۶ نیروی دست، بار q+ را در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه‌جا می‌کند.

تمرین ۱ــ۶

در شکل ۱ــ۱۶

الف) کار نیروی دست، مثبت است یا منفی؟

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

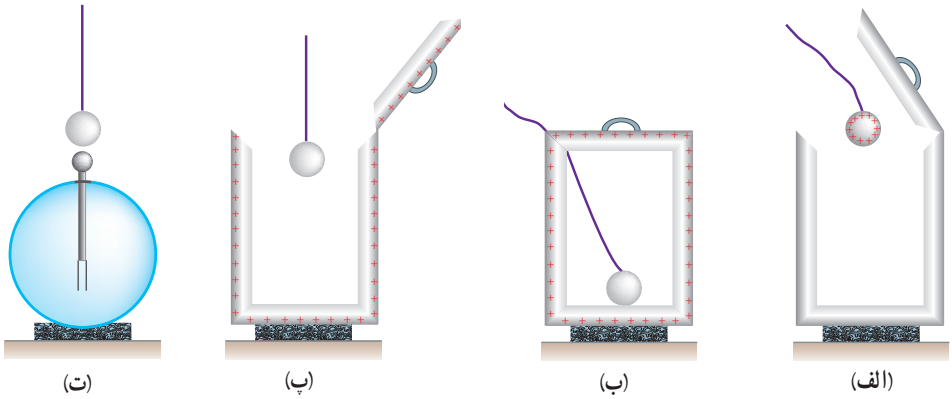
۱ــ۸ــ توزیع و القای بار در رساناها

جسم رسانایی را درنظر بگیرید که توسط عایقی از محیط اطراف خود جدا شده است (به این رسانا اصطلاحاً رسانای منزوی گفته می‌شود). 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 مرتبهٔ 10^{-9}s) میدان الکتریکی داخل رسانا صفر می‌شود. در ادامه این دو وضعیت را بررسی می‌کنیم.

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

آزمایش فارادی : ظرف رسانایی با درپوش فلزی را درنظر بگیرید که روی پایهٔ نارسانایی قرار دارد و روی درپوش آن دسته‌ای عایق نصب شده است. ابتدا ظرف بدون بار است. یک گوی فلزی را که از نخی عایق آویزان است باردار و سپس وارد ظرف می‌کنیم (شکل ۱ــ۱۷ــ الف) آنگاه درپوش فلزی را می‌بندیم. اکنون گوی را با کف ظرف تماس می‌دهیم (شکل ۱ــ۱۷ــ ب) سپس گوی را کمی بالا می‌کشیم و بعد درپوش فلزی را با دستهٔ عایقش برمی‌داریم (شکل ۱ــ۱۷ــ پ). پس از خارج کردن گوی فلزی از ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود عقربهٔ الکتروسکوپ تکان نمی‌خورد (شکل ۱ــ۱۷ــ ت).

از این آزمایش نتیجه می‌گیریم که بار اضافی یک رسانای منزوی روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود. به عبارتی، وقتی در شکل ۱ــ۱۷ــ ب گوی با کف ظرف تماس پیدا می‌کند مجموعهٔ گوی و ظرف، رسانایی را تشکیل می‌دهند که در سطح خارجی این جسم رسانای مرکب بار مشابه شکل ۱ــ۱۷ــ ب توزیع می‌شود.



شکل ۱ــ۱۷ شرحی تصویری از آزمایش فارادی

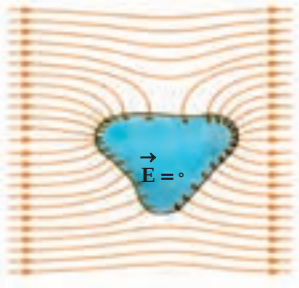
فعالیت ۱ـ۵

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 می‌ماند.

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

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 ۱ــ۱۸).



شکل ۱ــ۱۸ 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.

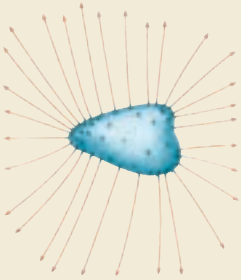
مطالعهٔ آزاد

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 درغیراین‌صورت، این میدان باید نیروهایی برالکترون‌های آزاد داخل رسانا وارد کند و در نتیجه جریانی در داخل رسانا ایجاد شود؛ یعنی بارها از جایی به‌جای دیگر انتقال یابند. ولی چنین جریانی داخل یک رسانا وجود ندارد، که این بدین معناست که بارها در تعادل الکتروستاتیکی قرار دارند.

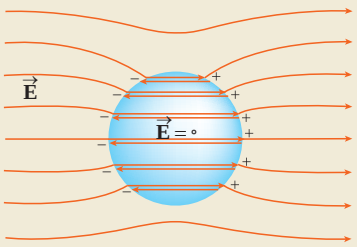
افزون بر این، اگر روی سطح رسانا که در تعادل الکتروستاتیکی است میدان الکتریکی وجود داشته باشد، این میدان باید عمود بر سطح رسانا باشد؛ چرا که در غیراین‌صورت میدان مؤلفه‌ای مماس بر سطح رسانا خواهد داشت و این مؤلفه باعث حرکت الکترون‌های آزاد بر سطح رسانا می‌گردد که این در تناقض با شرط تعادل الکترواستاتیکی است (شکل‌های ۱ــ۱۹ــ 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 همهٔ نقاط داخل و روی سطح این رسانا، پتانسیل یکسانی دارند. به عبارتی دیگر :

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



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



ب) میدان الکتریکی خارجی باعث جدا شدن بارهای مثبت و منفی در دو وجه رسانا شده است، به‌طوری 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 فاصلهٔ اندکی از هم رسم شده‌اند).

شکل ۱ــ۱۹

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 σ نشان داده می‌شود از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

$$\sigma = \frac{q}{A} \qquad (۱۳_۱)$$

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

در نبود میدان الکتریکی خارجی، چگالی سطحی بار الکتریکی یک رسانای کروی در همهٔ 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 (۱۰۸۵هجری شمسی) در شهر بوستون به دنیا آمد و در ۱۷ آوریل سال ۱۷۹۰ میلادی (۱۱۶۹ هجری شمسی) در شهر فیلادلفیا دیده از جهان فروبست. فرانکلین در حدود سال ۱۷۴۴ میلادی با مبحث الکتریسیته آشنا شد و عمدهٔ 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 الکتریسیته» است که بسیاری آن را با کتاب «اصول ریاضیات» *اسحاق نیوتون* مقایسه کرده‌اند. فرانکلین در این کتاب شالوده و بنیاد اصول علم الکتریسیته 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 الکتریسیته بوده است و بسیاری از واژگانی که ما امروزه در الکتریسیته به‌کار می‌گیریم نخستین بار توسط فرانکلین به‌کار 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 ۱ـ۲

چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی جسم رسانای منزوی

وسایل آزمایش : مخروط فلزی یا ورقهٔ آلومینیومی ضخیم، پایهٔ عایق، گلوله فلزی کوچک با دستهٔ عایق، الکتروسکوپ، مولّد واندوگراف یا دستگاه مشابه دیگر برای ایجاد بار

شرح آزمایش :

۱ـ اگر مخروط فلزی ندارید با استفاده از ورقهٔ آلومینیومی ضخیم، یک مخروط بسازید و روی پایهٔ عایق قرار دهید.

۲ـ با تماس مخروط فلزی با کلاهک مولّد واندوگراف آن را باردار کنید.

۳ـ گلولهٔ فلزی را با دستهٔ عایق آن بگیرید و گلوله را با نوک تیز مخروط تماس دهید. سپس گلوله را به کلاهک الکتروسکوپ تماس دهید. چه چیزی مشاهده می‌کنید؟

۴ـ گلولهٔ فلزی و الکتروسکوپ را با تماس با دستتان خنثی کنید، اینک گلوله را با دستهٔ عایق آن بگیرید و با بدنهٔ مخروط فلزی تماس دهید. سپس گلوله را با کلاهک الکتروسکوپ تماس دهید. اکنون چه چیزی مشاهده می‌کنید؟

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

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