

۶



شکل بالا یک مولد وان دوگراف را در موزه‌ی علوم بوستون نشان می‌دهد. این مولد یک تخلیه‌ی الکتریکی عظیم ایجاد می‌کند. اما همان‌طور که در شکل دیده می‌شود شخص درون قفس فلزی (اتاقک فارادی) از اثرهای این تخلیه حفاظت شده است.

## الکتریسیته ی ساکن

در کتاب‌های علوم دوره‌ی راهنمایی و نیز کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، با بارالکتریکی و نحوه‌ی باردار کردن اجسام آشنا شدید و آموختید که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد. بار الکترون را بار منفی و بار پروتون را مثبت نام‌گذاری کرده‌اند. علاوه بر این، دیدید که بار الکتریکی به‌وجود نمی‌آید و نیز از بین نمی‌رود و فقط از یک جسم به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این بیان، پایداری بارالکتریکی گفته می‌شود. هم‌چنین آموختید اجسام باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. این نیروها ممکن است رپایشی یا رانشی باشند. بیش‌تر نیروهایی که شما با آن‌ها آشنا هستید و با آن‌ها سرو کار دارید، 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. دامنه‌ی کاربرد دانش الکتریسیته در فناوری و صنعت به قدری گسترده است که نیازی به بیان ندارد.

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

## ۲-۱- قانون کولن

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

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

شارل کولن، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای

توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آن‌ها بستگی دارند، شناسایی کند. شما هم می‌توانید با انجام دادن آزمایش‌های ساده‌ای، با این عامل‌ها آشنا شوید.

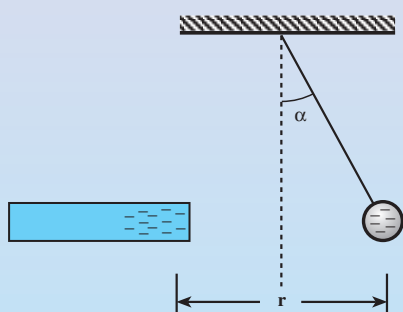
## آزمایش ۱-۲

وسایلهای آزمایش: میله‌ی پلاستیکی – پارچه‌ی پشمی – ورقه‌ی نازک آلومینیومی و مقداری نخ خشک  
شرح آزمایش:

۱- کمی ورقه‌ی آلومینیومی را فشرده کنید و آن را به‌صورت کره‌ی کوچکی در آورید. این کره‌ی کوچک را به کمک یک تکه نخ خشک آویزان کنید. این وسیله را آونگ الکتریکی می‌نامیم و از آن در آزمایش‌های الکتریسته‌ی ساکن استفاده می‌کنیم.  
۲- به آونگ الکتریکی به روش القا یا با تماس به جسمی که بار منفی دارد، بار الکتریکی منفی بدهید.

۳- میله را باردار کرده و آن را به آونگ الکتریکی نزدیک کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟

۴- میله را در فاصله‌ی معینی از آونگ و نزدیک آن نگاه دارید و زاویه‌ی انحراف آونگ را از وضع قائم با دقت مشاهده کنید.



شکل ۱-۲\*

۵- مرحله‌ی ۴ را تکرار کنید و هر بار فاصله‌ی میله را از آونگ تغییر دهید. مراقب باشید که در مراحل ۴ و ۵، میله با آونگ تماس پیدا نکند. نتیجه‌ی آزمایش را بنویسید و به کلاس گزارش دهید.

\* اجسام باردار با بار منفی را، با رنگ آبی و با بار مثبت را با رنگ قرمز نشان می‌دهیم.

کولن نیز با انجام دادن آزمایش و اندازه‌گیری‌های دقیق به این نتیجه رسید که :  
نیروهای الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار با مجذور فاصله‌ی آن‌ها از یک‌دیگر نسبت

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

وارون دارد؛ یعنی :

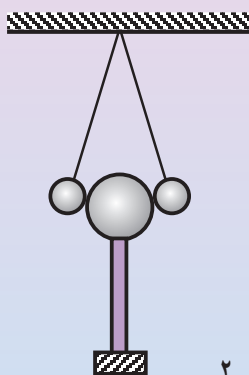
برای آن‌که معلوم شود نیروی الکتریکی به چه عامل یا عامل‌های دیگری بستگی دارد،  
آزمایش ۲-۲ را انجام دهید.

## آزمایش ۲-۲

وسيله‌های آزمایش: برای انجام دادن این آزمایش، علاوه بر وسیله‌های آزمایش  
۱-۲ به دو کره‌ی فلزی کوچک و هم‌اندازه که روی پایه‌های عایق نصب شده باشند،  
نیاز دارید.

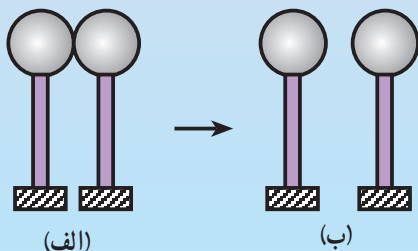
شرح آزمایش:

- ۱- دو آونگ الکتریکی کاملاً مشابه بسازید و آن‌ها را از یک نقطه آویزان کنید.
- ۲- یک کره را باردار کنید و آن را هم‌زمان به دو آونگ تماس دهید. سپس آن را از آونگ‌ها دور کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟ زاویه‌ی بین دو نخ آونگ‌ها را بعد از دور شدن کره‌ی فلزی اندازه‌گیری کنید.



شکل ۲-۲

- ۳- کره‌ی دیگر را که بدون بار است به کره‌ی باردار تماس دهید و آن‌ها را از یک‌دیگر جدا کنید. با انجام دادن این عمل، بار الکتریکی به‌طور مساوی بین دو کره تقسیم می‌شود.



شکل ۳-۲

۴- ابتدا با تماس دست به آونگ‌ها، بار آنها را تخلیه کنید. سپس یکی از کره‌های باردار را مانند مرحله‌ی ۲ به دو آونگ تماس دهید. این بار نیز زاویه‌ی بین دو آونگ را اندازه‌گیری کنید.

۵- نتیجه‌ی مرحله‌های ۲ و ۴ را با یک‌دیگر مقایسه کنید. نتیجه را بنویسید و به کلاس گزارش دهید.

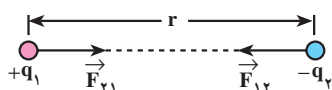
کولن نیز با انجام دادن آزمایش و اندازه‌گیری‌های دقیق به این نتیجه رسید که : نیروی الکتریکی با حاصل ضرب اندازه‌ی بار دو ذره نسبت مستقیم دارد ؛ یعنی :

$$F \propto q_1 \cdot q_2$$

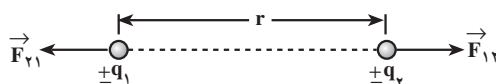
کولن، نتیجه‌ی آزمایش‌های خود را که امروزه به نام قانون کولن شناخته شده است ، به صورت زیر بیان کرد :

نیروی الکتریکی ربایشی یا رانشی بین دو ذره‌ی باردار  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله‌ی  $r$  از یک‌دیگر قرار دارند، با حاصل ضرب بار دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصله‌ی دو ذره از یک‌دیگر نسبت وارون دارد.

$$F \propto \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$



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



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

شکل ۲-۴

در شکل ۲-۴ به معنای نیرویی است که ذره‌ی اول به ذره‌ی دوم وارد می‌کند و  $\vec{F}_{21}$  نیرویی است که ذره‌ی دوم به ذره‌ی اول وارد می‌کند.

نیروهای الکتریکی که دو ذره‌ی باردار به یک‌دیگر وارد می‌کنند، هم‌اندازه و در جهت‌های مخالف یک‌دیگرند (قانون سوم نیوتون). اگر اندازه‌ی این نیروها را با  $F$  نشان دهیم، داریم :

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

قانون کولن را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (۱-۲)$$

در این رابطه،  $q_1$  و  $q_2$  برحسب کولن،  $r$  برحسب متر و  $F$  برحسب نیوتون است.  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  ضریب تناسب است که در آن ضریب  $\epsilon_0$  یک ثابت جهانی است و ضریب گذردهی الکتریکی خلأ نام دارد.

$$\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N.m^2}$$

برای سادگی در نوشتن، می‌توان ضریب قانون کولن را با نماد  $k$  نشان داد.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \frac{N.m^2}{C^2}$$

به کمک قانون کولن (رابطه‌ی ۱-۲) می‌توان اندازه‌ی نیروی الکتریکی‌ای را که دو ذره‌ی باردار به یک‌دیگر وارد می‌کنند، محاسبه کرد. در محاسبه‌ها، علامت مثبت یا منفی بارهای الکتریکی را در رابطه‌ی ۱-۲ وارد نمی‌کنیم و ربایشی یا رانشی بودن نیروها را به کمک نوع بارها مشخص می‌کنیم.

## مثال ۱-۲

دو ذره با بارهای الکتریکی  $q_1 = +2\mu C$  و  $q_2 = +5\mu C$  در فاصله‌ی ۳cm از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. اندازه‌ی نیرویی که دو ذره به یک‌دیگر وارد می‌کنند و نوع آن را مشخص کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ داریم:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{(2 \times 10^{-6}) \cdot (5 \times 10^{-6})}{9 \times 10^{-4}}$$

$$F = 100 N$$

چون بارهای الکتریکی دو ذره هم‌نوع‌اند، نیرویی که دو ذره به یک‌دیگر وارد می‌کند، رانشی است.

اگر تعدادی ذره‌ی باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برآیند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر در غیاب سایر ذره‌ها، بر آن ذره وارد می‌کنند.

## مثال ۲-۲

سه ذره با بارهای الکتریکی  $q_1 = +2/5 \mu\text{C}$ ،  $q_2 = -1 \mu\text{C}$  و  $q_3 = +4 \mu\text{C}$  در نقطه‌های A و B و C مطابق شکل ۵-۲ ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی وارد بر  $q_3$  را محاسبه کنید.  $BC = 2 \text{ cm}$  و  $AC = 6 \text{ cm}$ .



شکل ۵-۲

**حل:** نیرویی که بر  $q_3$  وارد می‌شود، برآیند دو نیرویی است که از طرف  $q_1$  و  $q_2$  بر آن وارد می‌شوند. برای محاسبه‌ی این نیرو، نیرویی را که هریک از بارهای  $q_1$  و  $q_2$  در غیاب دیگری، بر  $q_3$  وارد می‌کند، محاسبه می‌کنیم. نیروی الکتریکی وارد بر  $q_3$ ، برآیند این دو نیروست (شکل ۶-۲). با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ داریم:

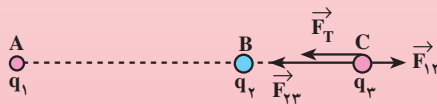
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \times \frac{2/5 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{13} = 25 \text{ N} \quad \text{نیرویی که } q_1 \text{ بر } q_3 \text{ وارد می‌کند، رانشی است.}$$

$$F_{23} = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 4 \times 10^{-12}}{4 \times 10^{-4}}$$

$$F_{23} = 90 \text{ N} \quad \text{نیرویی که } q_2 \text{ بر } q_3 \text{ وارد می‌کند، ربایشی است.}$$



شکل ۶-۲

مطابق شکل ۶-۲ نیروهای  $\vec{F}_{13}$  و  $\vec{F}_{23}$  در جهت‌های مخالف یک‌دیگرند. اندازه‌ی برآیند آن‌ها،  $\vec{F}_T$ ، برابر تفاضل اندازه‌های آن‌ها و در جهت نیروی بزرگ‌تر (در جهت  $\vec{F}_{23}$ ) است.

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

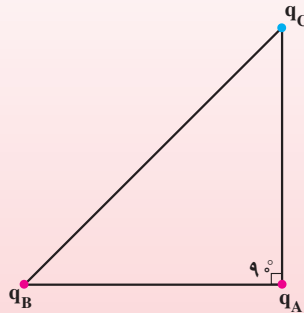
$$F_T = F_{23} - F_{13} = 65 \text{ N}$$

## تمرین ۱-۲

در مثال ۲-۲، نیروی وارد بر  $q_1$  را به دست آورید.

## مثال ۳-۲

سه ذره ی باردار مطابق شکل ۷-۲ در سه رأس مثلث قائم الزاویه ی ABC ثابت شده اند. بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر ذره ی باردار واقع در رأس زاویه ی قائمه را محاسبه کنید؛ در صورتی که  $q_A = +2\mu C$ ،  $q_B = +4\mu C$ ،  $q_C = -4\mu C$ ،  $AB = 3\text{cm}$  و  $AC = 2\sqrt{3}\text{cm}$  باشد.



شکل ۷-۲

**حل:** نیروی بین  $q_A$  و  $q_B$  رانشی و بین  $q_A$  و  $q_C$ ، ربایشی است. با استفاده از رابطه ی ۱-۲ داریم:

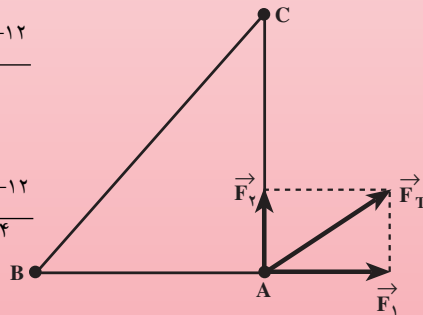
$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F_{BA} = F_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 2 \times 10^{-12}}{9 \times 10^{-4}}$$

$$F_1 = 8 \text{ N}$$

$$F_{CA} = F_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 2 \times 10^{-12}}{12 \times 10^{-4}}$$

$$F_2 = 6 \text{ N}$$



شکل ۸-۲



نیروهای  $\vec{F}_1$  و  $\vec{F}_2$  در شکل ۸-۲ نشان داده شده‌اند. این دو نیرو بر یک دیگر عمودند و  $\vec{F}_T$  برآیند آن‌هاست. داریم:

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

$$F_T^2 = F_1^2 + F_2^2$$

$$F_T^2 = (3)^2 + (4)^2$$

$$F_T = 5 \text{ N}$$

## یادداشت ریاضی

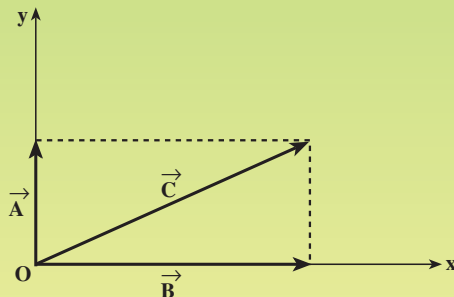
برای حل کردن مسأله‌های فیزیک به محاسبه‌هایی نظیر محاسبه‌های برداری نیازمندیم که شما در کتاب‌های ریاضی سال‌های گذشته با آن‌ها آشنا شده‌اید. در این جا این محاسبه‌ها را صرفاً جهت حل مسأله‌های فیزیکی آورده‌ایم و جزء درس فیزیک منظور نمی‌شوند. در کتاب ریاضی سال سوم راهنمایی و کتاب ریاضی ۲ دبیرستان با مؤلفه‌های یک بردار روی محورهای مختصات و نیز نمایش یک بردار بر حسب مؤلفه‌ها و بردارهای یک‌به‌یک و نیز محاسبه‌های برداری به کمک بردارهای یک‌به‌یک آشنا شدید. در این جا با نحوه‌ی استفاده از آن‌ها در مبحث‌های فیزیک آشنا می‌شوید. مرور این مبحث، از کتاب ریاضی ۲ شما را در حل مسأله‌های فیزیکی یاری می‌دهد.

### مؤلفه‌های یک بردار روی محورهای مختصات

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در محاسبه‌ها می‌توان به جای دو بردار، مثلاً بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  در شکل ۲-۹- برای آن‌ها، یعنی بردار  $\vec{C}$  را جایگزین کرد.

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$$

$$C^2 = A^2 + B^2$$



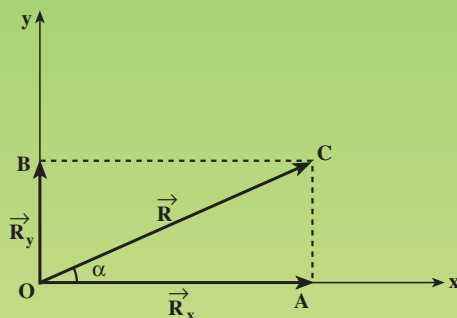
شکل ۲-۹- بردار  $\vec{C}$  برابند بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  است.

به‌طور وارون و هر جا که مناسب باشد، می‌توان به جای بردار  $\vec{C}$ ، دو بردار  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  را به کار برد. در این صورت، به بردارهای  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$ ، مؤلفه‌های بردار  $\vec{C}$  در امتداد محورهای  $x$  و  $y$  گفته می‌شود.

معمولاً مؤلفه‌ی یک بردار روی یک محور را با نام آن بردار و زیرنویس نام

محور، مشخص می‌کند؛ مثلاً مؤلفه‌ی بردار  $\vec{C}$  در راستای محور  $x$  را  $\vec{C}_x$  و مؤلفه‌ی آن در راستای محور  $y$  را  $\vec{C}_y$  می‌نامیم.

برای تعیین مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور  $x$  و  $y$  به روش زیر عمل می‌کنیم. مطابق شکل ۱-۲ از انتهای بردار  $\vec{R}$ ، خط‌هایی موازی هر یک از دو محور  $Ox$  و  $Oy$  رسم می‌کنیم تا محورها را در نقطه‌های  $A$  و  $B$  قطع کنند. بردارهای  $\vec{OA}$  و  $\vec{OB}$  مؤلفه‌های بردار  $\vec{R}$  روی دو محورند که آن‌ها را  $\vec{R}_x$  و  $\vec{R}_y$  می‌نامیم.



شکل ۱-۲

اگر زاویه‌ی  $\vec{R}$  با محور  $x$  برابر  $\alpha$  باشد، اندازه‌ی مؤلفه‌های آن روی دو محور به روش زیر محاسبه می‌شود.

$$\cos \alpha = \frac{R_x}{R}$$

$$R_x = R \cos \alpha \quad (2-2)$$

$$\sin \alpha = \frac{R_y}{R}$$

$$R_y = R \sin \alpha \quad (3-2)$$

مثال ۱: بردار  $\vec{A}$  به بزرگی ۵ واحد با محور  $x$  زاویه‌ی  $37^\circ$  درجه می‌سازد. اندازه‌ی مؤلفه‌های آن را روی محورهای  $x$  و  $y$  به دست آورید.  
حل: با استفاده از رابطه‌های ۲-۲ و ۳-۲ داریم:

$$A_x = A \cos \alpha$$

$$A_x = 5 \cos 37^\circ$$

$$A_x = 5 \times 0.8 = 4 \text{ واحد}$$

$$A_y = A \sin \alpha$$

$$A_y = 5 \sin 37^\circ$$

$$A_y = 5 \times 0.6 = 3 \text{ واحد}$$

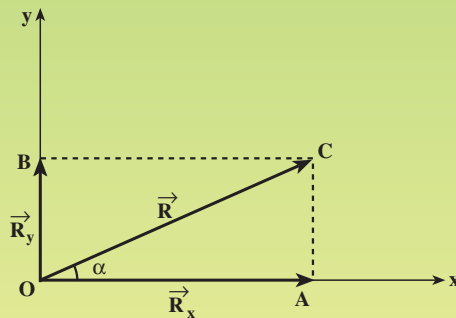
به طور وارون، بامعلوم بودن اندازه‌ی مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور  $x$  و  $y$ ، می‌توان اندازه و جهت بردار را معلوم کرد. جهت هر بردار را با تعیین زاویه‌ی آن بردار با جهت محور  $x$  مشخص می‌کنیم.

مثال ۲: بزرگی مؤلفه‌های بردار  $\vec{R}$  روی محورهای  $x$  و  $y$  مطابق شکل ۲-۱۱ به ترتیب برابر ۸ و  $13/9$  واحد است. بزرگی این بردار و زاویه‌ی آن با محور  $x$  (جهت بردار  $\vec{R}$ ) را تعیین کنید.

حل: با استفاده از شکل ۲-۱۱ در مثلث قائم‌الزاویه‌ی  $OAC$ ، داریم:

$$\vec{R} = \vec{R}_x + \vec{R}_y \quad (2-4)$$

$$R = (\vec{R}_x + \vec{R}_y) \rightarrow R = 16 \text{ واحد}$$



شکل ۲-۱۱

اگر در شکل ۲-۱۱ تانژانت زاویه‌ی  $\alpha$  را حساب کنیم، نتیجه می‌شود:

$$\tan \alpha = \frac{R_y}{R_x} \quad (2-5)$$

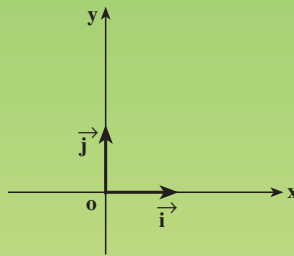
$$\tan \alpha = \frac{13/9}{8} \approx 1/73$$

$$\alpha \approx 6^\circ$$

## نمایش یک بردار برحسب بردارهای یکه

در کتاب‌های ریاضی سال سوم راهنمایی و ریاضی ۲ دبیرستان خواندید که با انتخاب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  به ترتیب روی محورهای  $x$  و  $y$  (شکل ۲-۱۲) می‌توان یک بردار را برحسب بردارهای یکه نمایش داد. بردار یکه در راستای هر محور، برداری است به طول واحد و در جهت همان محور.

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



شکل ۲-۱۲

اگر اندازه‌ی مؤلفه‌های بردار  $\vec{A}$  روی محور  $x$  و  $y$  به ترتیب برابر  $A_x$  و  $A_y$  باشد، نمایش این بردار به کمک بردارهای یکه به صورت رابطه‌ی زیر است.

$$\vec{A} = A_x \vec{i} + A_y \vec{j} \quad (۲-۶)$$

مثال ۳: بردار  $\vec{A}$  را در مثال ۱ برحسب بردارهای یکه نشان دهید.

حل: از حل مثال ۱ نتیجه شد که  $A_x = ۴$  و  $A_y = ۳$  واحد است. با استفاده

از رابطه‌ی (۲-۶) داریم:

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

$$\vec{A} = ۴ \vec{i} + ۳ \vec{j}$$

## محاسبه‌های برداری به کمک بردارهای یکه

نمایش بردارها برحسب بردارهای یکه به ما کمک می‌کند تا محاسبه‌های برداری

— مثلاً محاسبه‌ی برابری چند بردار یا تفاضل دو بردار — را به سادگی انجام دهیم.

**مثال ۴:** برابند دو نیروی  $\vec{F}_1 = 5\vec{i} - 2\vec{j}$  و  $\vec{F}_2 = 3\vec{i} + 8\vec{j}$  نیوتونی برابر چند نیوتون است و با محور x چه زاویه ای می سازد؟  
**حل:** با توجه به این که مؤلفه های بردارها روی یک محور، هم راستا هستند و برابند آنها برابر جمع جبری آنهاست، داریم:

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

$$\vec{F} = (F_{1x} + F_{2x})\vec{i} + (F_{1y} + F_{2y})\vec{j}$$

$$\vec{F} = (5 + 3)\vec{i} + (-2 + 8)\vec{j}$$

$$\vec{F} = 8\vec{i} + 6\vec{j}$$

با استفاده از رابطه های ۴-۲ و ۵-۲ داریم:

$$F^2 = F_x^2 + F_y^2$$

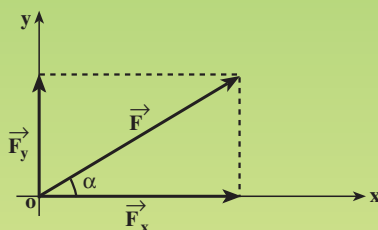
$$F^2 = 64 + 36$$

$$F = 10 \text{ N}$$

$$\tan \alpha = \frac{F_y}{F_x}$$

$$\tan \alpha = \frac{6}{8} = \frac{3}{4}$$

$$\alpha = 37^\circ$$



شکل ۲-۱۳

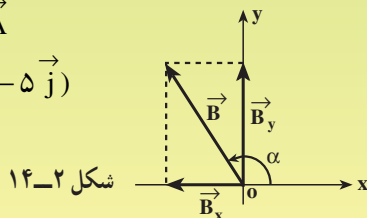
**مثال ۵:** اگر  $\vec{A} = 2\vec{i} - 5\vec{j}$  واحد و  $\vec{R} = -3\vec{i} + 4\vec{j}$  واحد و  $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$  باشد، بردار  $\vec{B}$  با محور x چه زاویه ای می سازد؟

**حل:**

$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B} \rightarrow \vec{B} = \vec{R} - \vec{A}$$

$$\vec{B} = (-3\vec{i} + 4\vec{j}) - (2\vec{i} - 5\vec{j})$$

$$\vec{B} = -5\vec{i} + 9\vec{j}$$



شکل ۲-۱۴

$$\tan \alpha = \frac{B_y}{B_x}$$

با استفاده از رابطه ی ۵-۲ داریم:

$$\tan \alpha = \frac{9}{-5} = -1.8$$

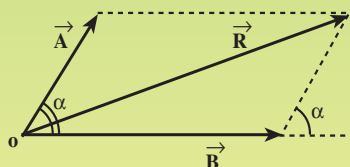
$$\alpha \cong 112^\circ$$

توجه کنید که مؤلفه ی  $B_y$  مثبت و در جهت محور  $y$  و مؤلفه ی  $B_x$  منفی و در خلاف جهت محور  $x$  است. در نتیجه، انتهای بردار  $\vec{B}$  در ربع دوم دستگاه مختصات قرار دارد.

### محاسبه ی برآیند دو بردار به روش متوازی الاضلاع

محاسبه ی برآیند بردارها به روش متوازی الاضلاع، روش ساده ای است برای محاسبه ی اندازه ی برآیند و نیز مشخص کردن جهت برآیند دو بردار که در یک صفحه قرار دارند. این نوع محاسبه، در فیزیک کاربرد فراوان دارد.

این روش، در واقع همان روش ترسیمی (چند ضلعی) است. همان گونه که شکل ۱۵-۲ نشان می دهد، ابتدا دو بردار را از یک نقطه رسم می کنیم. این دو بردار را دو ضلع یک متوازی الاضلاع می گیریم و متوازی الاضلاع را با رسم دو ضلع دیگر آن کامل می کنیم. آن قطر متوازی الاضلاع که از محل تلاقی دو بردار می گذرد، نشان دهنده ی برآیند دو بردار است.



شکل ۱۵-۲- برآیند دو بردار، منطبق بر قطر متوازی الاضلاعی است که روی دو بردار ساخته می شود.

اگر زاویه ی بین دو بردار برابر  $\alpha$  باشد، اندازه ی برآیند از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$$

$$R^2 = A^2 + B^2 + 2A.B.\cos \alpha \quad (7-2)$$

مثال ۶: برابری دو بردار به بزرگی ۳ و ۵ واحد را که با یکدیگر زاویه‌ی ۶۰° درجه می‌سازند، محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲-۷ داریم:

$$R^2 = A^2 + B^2 + 2A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

$$R^2 = 9 + 25 + 2 \times 3 \times 5 \cos 60^\circ$$

$$R^2 = 49$$

$$R = 7 \text{ واحد}$$

در حالت خاصی که دو بردار  $\vec{A}$  و  $\vec{B}$  هم‌اندازه باشند، رابطه‌ی ۲-۷ به صورت زیر ساده می‌شود.

$$A = B \rightarrow R^2 = 2A^2(1 + \cos \alpha)$$

در درس ریاضی دیده‌اید که « $1 + \cos \alpha = 2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$ » است. در نتیجه، خواهیم داشت:

$$R^2 = 4A^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$R = 2A \cos \frac{\alpha}{2} \quad (2-8)$$

مثال ۷: سرعت جسمی در دو لحظه‌ی  $t_1 = 2s$  و  $t_2 = 5s$  به ترتیب و برحسب

$\frac{m}{s}$  به صورت  $\vec{V}_1 = 14\vec{i} + 7\vec{j}$  و  $\vec{V}_2 = 26\vec{i} + 16\vec{j}$  مشخص شده است. شتاب

متوسط این جسم در بازه‌ی زمانی  $\Delta t = t_2 - t_1$  چند  $\frac{m}{s^2}$  است؟

حل: در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندید که شتاب متوسط برابر تغییرات

سرعت جسم در واحد زمان است. تغییرات سرعت در یک بازه‌ی زمانی، برابر تفاضل

بردارهای سرعت جسم در شروع و پایان آن بازه است؛ بنابراین، داریم:

$$\Delta \vec{V} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$$

$$\Delta \vec{V} = (26\vec{i} + 16\vec{j}) - (14\vec{i} + 7\vec{j})$$

$$\Delta \vec{V} = 12\vec{i} + 9\vec{j}$$



با توجه به تعریف شتاب متوسط داریم :

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$$

$$\vec{a} = \frac{12\vec{i} + 9\vec{j}}{5-2}$$

$$\vec{a} = 4\vec{i} + 3\vec{j}$$

با استفاده از رابطه ی ۲-۴ نتیجه می شود :

$$\bar{a} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

$$\bar{a} = \sqrt{16 + 9}$$

$$\bar{a} = 5 \text{ m/s}^2$$

اکنون به مثال‌های دیگری از نیروهای الکتریکی توجه کنید.

## مثال ۴-۲

سه ذره‌ی باردار، مطابق شکل ۱۶-۲ در سه رأس مثلث متساوی‌الاضلاعی به ضلع ۶cm ثابت شده‌اند. بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر بار  $q_3$  را محاسبه کنید.  
**حل:** نیروهای وارد بر بار  $q_3$  و برآیند این نیروها در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است.  
 است. با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ داریم:

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \times \frac{2/5 \times 10^{-8} \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{13} = 5N \quad \text{رانشی}$$

$$F_{23} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-8} \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{23} = 8N \quad \text{جاذبه‌ای}$$

اکنون با استفاده از رابطه‌ی ۷-۲، برآیند دو نیرو را حساب می‌کنیم.

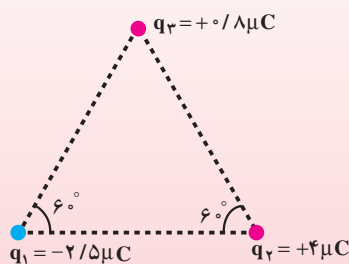
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$$

$$F_T^2 = F_{13}^2 + F_{23}^2 + 2F_{13} \cdot F_{23} \cdot \cos \alpha$$

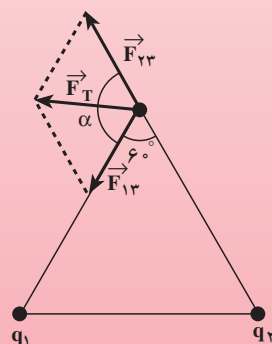
$$\alpha = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$$

$$F_T^2 = 25 + 64 + 2 \times 5 \times 8 \times \cos 120^\circ$$

$$F_T^2 = 49 \rightarrow F_T = 7N$$



شکل ۱۶-۲



شکل ۱۷-۲

## تمرین ۲-۲

نیروهای وارد بر بارهای الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  را در مثال ۴-۲ محاسبه کنید.

## مثال ۵-۲

مطابق شکل ۱۸-۲ چهار بار الکتریکی در رأس‌های مربعی به ضلع ۶cm قرار دارند.  
نیروی الکتریکی وارد بر بار الکتریکی  $q_1$  را محاسبه کنید.  
حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ داریم:

$$F_{21} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

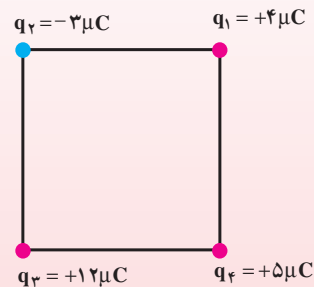
$$F_{21} = 30 \text{ N} \text{ رایشی}$$

$$F_{31} = 9 \times 10^9 \times \frac{12 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 2 \times 10^{-4}}$$

$$F_{31} = 60 \text{ N} \text{ رایشی}$$

$$F_{41} = 9 \times 10^9 \times \frac{5 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{41} = 50 \text{ N} \text{ رایشی}$$



شکل ۱۸-۲

با انتخاب محورهای مختصات مطابق شکل ۱۹-۲ و استفاده از رابطه‌های

۲-۲ و ۳-۲ و ۶-۲ داریم:

$$\vec{F}_{21} = -30 \vec{i}$$

$$\vec{F}_{31} = (60 \cos 45^\circ) (\vec{i} + \vec{j})$$

$$\vec{F}_{31} \approx 42 (\vec{i} + \vec{j})$$

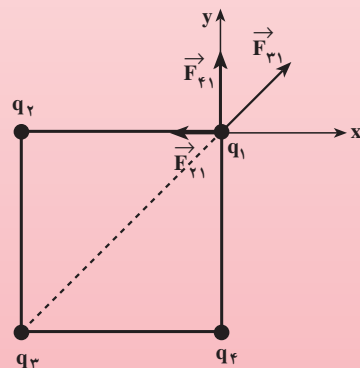
$$\vec{F}_{41} = 50 \vec{j}$$

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41}$$

$$\vec{F}_T = (-30 + 42) \vec{i} + (42 + 50) \vec{j}$$

$$\vec{F}_T = 12 \vec{i} + 92 \vec{j}$$

$$F_T = \sqrt{12^2 + 92^2} \approx 92.7 \text{ N}$$



شکل ۱۹-۲

## تمرین ۲-۳

نیروی الکتریکی وارد بر  $q_4$  را در مثال ۲-۵ محاسبه کنید.

رابطه ۱-۲ برای محاسبه‌ی نیروی الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار به کار می‌رود. محاسبه‌ی نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار به چگونگی آرایش (یا توزیع) بار در دو جسم بستگی دارد و محاسبه‌ی آن نیازمند ریاضیات پیشرفته‌تری است. در این کتاب، همواره نیروهای بین دو ذره‌ی باردار را محاسبه می‌کنیم. روشن است که اگر فاصله‌ی جسم باردار از ذره‌ی باردار (یا جسم باردار دیگر) آن قدر زیاد باشد که ابعاد جسم در مقابل فاصله‌ی بین آن‌ها قابل چشم‌پوشی باشد، می‌توان جسم را مانند یک ذره‌ی باردار در نظر گرفت و از رابطه‌ی ۱-۲ برای محاسبه‌ی نیروی الکتریکی استفاده کرد.

## فعالیت ۱-۲

اکنون که با قانون کولن و محاسبه‌ی نیروی الکتریکی آشنا شده‌اید، شایسته است



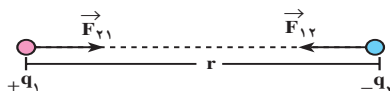
آزمایش‌های کولن و چگونگی کار او را بیش‌تر بشناسید. در سال ۱۷۸۰ میلادی شارل کولن، دانشمند فرانسوی، با استفاده از وسیله‌ای که «ترازوی پیچشی» نام دارد، آزمایش‌هایی انجام داد. نتیجه‌ی آن‌ها به بیان قانون کولن منجر شد. در مورد آزمایش‌های کولن تحقیق کنید و شرح آزمایش‌ها و نتیجه‌گیری‌های او را به کلاس گزارش دهید.

شکل ۲-۲۰- ترازوی پیچشی کولن

## ۲-۲- میدان الکتریکی

در بخش ۱-۲ دیدید که دو بار الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله‌ی  $r$  از یک‌دیگر واقع‌اند (شکل ۲-۲۱)، بر هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. اگر دو آهن‌ربا در فاصله‌ی کمی از یک‌دیگر قرار گیرند، بر هم نیرو وارد می‌کنند. زمین و

خورشید نیز با وجود آن که میلیون‌ها کیلومتر از یک‌دیگر دورند، بر هم نیروی جاذبه‌ی گرانشی وارد می‌کنند.

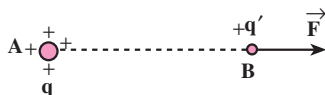


شکل ۲۱-۲ دو بار الکتریکی از فاصله‌ی  $r$  بر هم نیرو وارد می‌کنند.

## فعالیت ۲-۲

- ۱- یک آونگ الکتریکی بسازید و آن را از نقطه‌ای بیاویزید.
- ۲- آونگ را به روش القای الکتریکی یا تماس با جسم باردار دیگری باردار کنید.
- ۳- به یک میله‌ی پلاستیکی (یا شیشه‌ای) به کمک مالش با پارچه پشمی (یا ابریشمی) بار الکتریکی بدهید.
- ۴- میله را بدون تماس با آونگ از جهت‌های مختلف به آونگ نزدیک کنید و نتیجه‌ی آنچه را که مشاهده می‌کنید، به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید کره‌ی باردار کوچکی با بار  $+q$  مطابق شکل ۲۲-۲ در نقطه‌ی A قرار دارد. اگر ذره‌ای با بار الکتریکی  $+q'$  را در نقطه‌ی B قرار دهیم، از طرف بار  $+q$  بر آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌شود (می‌دانید که بار  $q'$  نیز بر بار  $q$  نیرو وارد می‌کند که واکنش نیروی  $\vec{F}$  است اما در شکل نشان داده نشده است).



شکل ۲۲-۲



شکل ۲۳-۲

اکنون به این پرسش و نیز پاسخ آن بیندیشید: «اگر کره‌ی باردار  $q$  را از نقطه‌ی  $A$  برداریم (شکل ۲-۲۳) آیا در نقطه‌ی  $B$  بر بار  $q'$  نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟ پاسخ شما چیست؟ آیا قبول دارید که وجود بار  $q$  در نقطه‌ی  $A$  باعث می‌شود که بر بار  $q'$  در نقطه‌ی  $B$  نیروی الکتریکی وارد شود؟ آیا می‌توانیم بگوییم که وقتی بار  $q$  را در نقطه‌ی  $A$  قرار می‌دهیم، در نقطه‌ی  $B$  خاصیتی ایجاد می‌شود که اگر بار  $q$  در  $A$  نباشد، این خاصیت نیز در  $B$  وجود نخواهد داشت؟ آیا وجود بار  $q$  در نقطه‌ی  $A$ ، این خاصیت را فقط در نقطه‌ی  $B$  ایجاد کرده است یا اگر بار  $q'$  را در هر نقطه‌ی دیگری در مجاورت نقطه‌ی  $A$  قرار دهیم، باز هم بر آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟ مثلاً در فعالیتی که انجام دادید، اگر آونگ الکتریکی باردار را در هر نقطه‌ای مجاور میله‌ی باردار قرار دهید، آیا به آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟



شکل ۲-۲۴

با توجه به آنچه گفته شد، یک بار الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف خود، خاصیتی ایجاد می‌کند که به آن میدان الکتریکی می‌گویند. اگر یک بار الکتریکی را در نقطه‌ای از میدان الکتریکی قرار دهیم، از طرف میدان بر آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود. میدان الکتریکی به طور کمی در بخش ۲-۳ تعریف شده است.

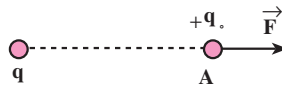
## ۲-۳- تعریف کمی میدان الکتریکی

میدان الکتریکی به طور کمی را به کمک نیرویی که میدان بر یک بار الکتریکی واقع در میدان وارد می‌کند، به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

نیروی وارد بر یکای بار الکتریکی مثبت را در هر نقطه، میدان الکتریکی در آن نقطه می‌نامیم.

اگر بار الکتریکی نقطه‌ای  $+q$  مطابق شکل ۲-۲۵ در میدان الکتریکی حاصل از بار  $q$  قرار گیرد، از طرف میدان حاصل از بار  $q$  بر آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌شود. بر اساس تعریف بالا، میدان بار  $q$  در محل قرارگرفتن بار  $+q$  که آن را با نماد  $\vec{E}$  نشان می‌دهیم، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{+q} \quad (۲-۹)$$



شکل ۲-۲۵

میدان الکتریکی کمیتی برداری است و در محاسبه‌ها باید به این نکته توجه کرد. یکای میدان الکتریکی، نیوتون بر کولن ( $\frac{N}{C}$ ) نام دارد.

### مثال ۲-۶

بر بار الکتریکی  $2\mu C / +$  در یک نقطه از میدان بار  $q$ ، نیروی  $5 \times 10^{-2} N$  وارد می‌شود. اندازه‌ی میدان الکتریکی را در این نقطه محاسبه کنید.

حل: از رابطه‌ی ۲-۹ می‌توان اندازه‌ی میدان الکتریکی را محاسبه کرد.

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

$$E = \frac{5 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-7}}$$

$$E = 2.5 \times 10^5 \frac{N}{C}$$

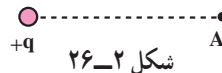
### ۲-۴- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره‌ی باردار

می‌خواهیم میدان الکتریکی حاصل از بار ذره‌ای  $q$  را در نقطه‌ی  $A$  که به فاصله‌ی  $r$  از بار  $q$  است، محاسبه کنیم (شکل ۲-۲۶). برای این محاسبه از رابطه‌ی ۲-۹ استفاده می‌کنیم. اگر بار ذره‌ای  $+q_0$  در نقطه‌ی  $A$  قرار گیرد، از طرف بار  $q$  به آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌شود. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی  $F$  را محاسبه می‌کنیم و با جای‌گذاری در رابطه‌ی ۲-۹، بزرگی میدان الکتریکی بار  $q$  را در نقطه‌ی  $A$  به دست می‌آوریم.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_0}{r^2}$$

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

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$



شکل ۲-۲۶

(۲-۱۰)

رابطه‌ی ۲-۱۰ عامل‌های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از بار ذره‌ای  $q$  را مشخص

می‌کند. بنابراین رابطه، میدان با اندازه‌ی بار  $q$  نسبت مستقیم و با مجذور فاصله از آن، نسبت وارون دارد.

برای مشخص کردن جهت بردار میدان در یک نقطه — مثلاً نقطه‌ی A در شکل ۲-۲۶، فرض می‌کنیم که بار الکتریکی مثبتی را در آن نقطه قرار داده‌ایم. میدان در آن نقطه، در جهت نیروی وارد بر این بار فرضی خواهد بود. بنابراین، میدان الکتریکی در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت واقع در آن نقطه است.

## مثال ۲-۷

بزرگی میدان الکتریکی بار ذره‌ای  $-2\mu\text{C}$  را در نقطه‌ی M به فاصله‌ی الف)  $2\text{ mm}$  و ب)  $20\text{ cm}$  از این بار الکتریکی محاسبه کنید و بردار میدان را در این نقطه برای یک حالت رسم کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲-۱۰ اندازه‌ی میدان را در نقطه‌های خواسته شده، به دست می‌آوریم:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad \text{الف)}$$

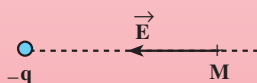
$$E_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-6}}$$

$$E_1 = 4/5 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{C}} \quad \text{ب)}$$

$$E_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-2}}$$

$$E_2 = 4/5 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

برای نشان دادن میدان، فرض می‌کنیم بار مثبتی در نقطه‌ی M، در  $2$  میلی‌متری بار  $q$  واقع باشد. چون بار  $q$  منفی است، بار مثبت فرضی را جذب می‌کند. میدان بار  $q$  در جهت همین نیروست که در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۷ — میدان بار منفی  $q$  در نقطه‌ی M



همان‌طور که مثال‌های ۲-۶ و ۲-۷ نشان می‌دهند در محاسبه‌ی اندازه‌ی میدان الکتریکی، علامت بار را در رابطه‌ی ۲-۹ یا ۲-۱۰ وارد نمی‌کنیم و جهت میدان در هر نقطه را به کمک جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت فرضی واقع در آن نقطه، تعیین می‌کنیم.

**میدان الکتریکی حاصل از مجموعه‌ی ذره‌های باردار:** اگر در یک ناحیه از فضا چند ذره‌ی باردار قرار داشته باشند، در هر نقطه یک میدان الکتریکی وجود دارد. این میدان، بر ایندها می‌باشد که هر ذره‌ی باردار در غیاب سایر بارهای الکتریکی در آن نقطه ایجاد می‌کند.

## مثال ۲-۸

دو بار الکتریکی ذره‌ای  $q_1 = +4\mu\text{C}$  و  $q_2 = -6\mu\text{C}$  در فاصله‌ی ۸ cm از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به دست آورید.

الف - در وسط خط واصل دو ذره‌ی باردار،

ب - در نقطه‌ای به فاصله‌ی ۲ cm از بار  $q_2$  و ۱۰ cm از بار  $q_1$  و روی خط واصل دوبار.

**حل:** در غیاب هر یک از دو ذره، میدان حاصل از بار دیگر را محاسبه می‌کنیم. میدان حاصل از مجموعه‌ی دوبار، بر ایندها می‌باشد که بر ایندها خواهد بود.

الف - اگر بار مثبتی را در نقطه‌ی A قرار دهیم، بار  $q_1$  آن را می‌راند و بار  $q_2$  آن را می‌ریاید. بنابراین،  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  در نقطه‌ی A هم جهت و به سوی بار  $q_2$  هستند (شکل ۲-۲۸ الف و ب).

با استفاده از رابطه‌ی ۲-۱۰ داریم:

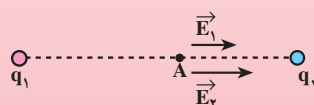
$$E = k \frac{q}{r^2}$$

$$E_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{16 \times 10^{-4}} \text{ N/C}$$

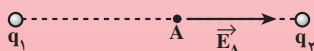
$$E_1 = 2/25 \times 10^7 \text{ N/C}$$

$$E_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6}}{16 \times 10^{-4}} \text{ N/C}$$

$$E_2 = 3/375 \times 10^7 \text{ N/C}$$



الف



ب

شکل ۲-۲۸

چون  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  هم جهت اند، اندازه‌ی برآیند آن‌ها برابر مجموع اندازه‌ی آن‌هاست.  
توجه داشته باشید که در نقطه‌ی A تنها میدان  $\vec{E}_A$  وجود دارد.

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

$$E_A = E_1 + E_2$$

$$E_A = 5/625 \times 10^7 \frac{N}{C}$$

ب- اگر بار الکتریکی مثبتی در نقطه‌ی B قرار گیرد، بار  $q_1$  آن را می‌راند و بار  $q_2$  آن را می‌رباید. در نتیجه،  $\vec{E}'_2$  به طرف بار  $q_2$  و  $\vec{E}'_1$  در خلاف جهت  $\vec{E}'_2$  است (شکل ۲۹-۲ الف و ب).

$$E'_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{10^{-2}}$$

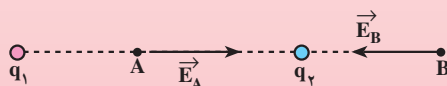
$$E'_1 = 3/6 \times 10^6 \frac{N}{C}$$

$$E'_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-4}}$$

$$E'_2 = 135 \times 10^6 \frac{N}{C}$$



الف



ب

شکل ۲۹-۲

چون  $\vec{E}'_1$  و  $\vec{E}'_2$  در خلاف جهت یکدیگرند، برآیند آن‌ها برابر تفاضل اندازه‌های  $E'_1$  و  $E'_2$  است.

$$\vec{E}_B = \vec{E}'_2 - \vec{E}'_1$$

$$E_B = E'_2 - E'_1$$

$$E_B = 131/4 \times 10^6 \frac{N}{C}$$

## مثال ۹-۲

دو بار الکتریکی ذره ای  $q_1 = -q_2 = +5\mu\text{C}$  در فاصله‌ی  $8\text{cm}$  از یک دیگر ثابت شده‌اند. میدان الکتریکی را روی عمود منصف خطی که دو ذره را به یک دیگر وصل می‌کند و به فاصله‌ی  $3\text{cm}$  از وسط خط واصل دو ذره، به دست آورید. به مجموعه‌ی این دو بار الکتریکی، دو قطبی الکتریکی گفته می‌شود.  
 حل: میدان الکتریکی حاصل از این دو بار، در نقطه‌ی مذکور هم اندازه‌اند (شکل ۲-۳).

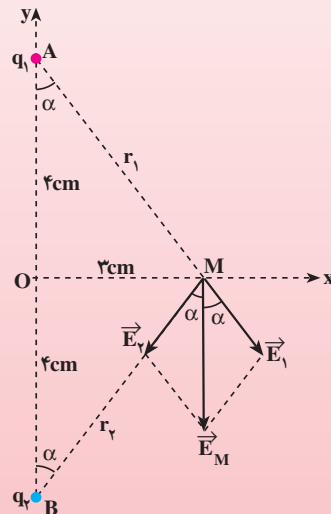
$$r_1 = r_2 = \sqrt{16 + 9} = 5\text{cm}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲-۱ داریم:

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

$$E_1 = E_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{5 \times 10^{-6}}{25 \times 10^{-4}} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_1 = 1/8 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$



شکل ۲-۳

چون  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  هم اندازه‌اند، با استفاده از رابطه‌ی ۲-۸ داریم:

$$E_1 = E_2$$

$$E_M = 2E_1 \cos \frac{\gamma}{2} = 2E_1 \cos \alpha$$

با استفاده از مثلث قائم الزاویه‌ی AOM اندازه‌ی  $\cos \alpha$  را حساب می‌کنیم:

$$\cos \alpha = \frac{OA}{AM} = \frac{3}{5} = 0.6$$

$$E_M = 2 \times 1 / 8 \times 10^9 \times 0 / 8$$

$$E_M = 2 / 88 \times 10^9 \frac{N}{C}$$

شکل ۳-۲ نشان می‌دهد که میدان الکتریکی روی عمود منصف دو قطبی، موازی محور دو قطبی (خط واصل دو ذره ی باردار) و در خلاف جهت محور  $y$  است؛ یعنی، مؤلفه‌های  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  در امتداد محور  $x$  یک‌دیگر را خنثی می‌کنند.

## تمرین ۴-۲

میدان الکتریکی حاصل از دو قطبی را در مثال ۲-۹ در نقطه‌ای روی محور دو قطبی و به فاصله‌ی ۵ cm از مرکز دو قطبی (نقطه‌ی O در شکل ۳-۲) به دست آورید.

## ۵-۲- تجسم میدان الکتریکی

میدان الکتریکی را در اطراف یک جسم باردار با خط‌هایی نشان می‌دهیم که به آن‌ها خط‌های میدان الکتریکی می‌گویند.

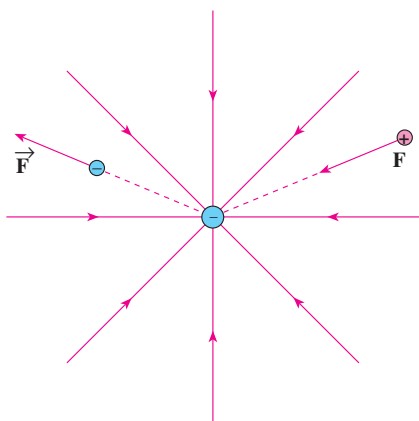
این خط‌ها دارای ویژگی‌های زیرند:

۱- خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار مثبت واقع در آن نقطه‌اند. در نتیجه، جهت این خط‌ها از بار مثبت رو به خارج و به سوی بار منفی است. (بر بار منفی، نیرو در خلاف جهت میدان وارد می‌شود.)

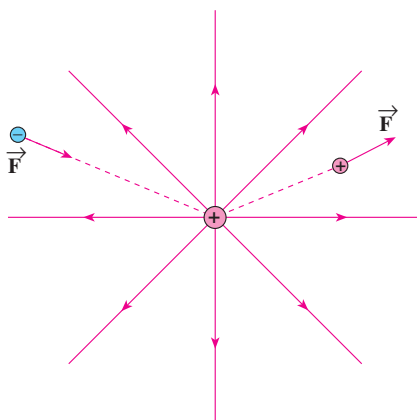
۲- خط میدان در هر نقطه، جهت میدان را در آن نقطه نشان می‌دهد و میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن هم جهت است.

۳- در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خط‌های میدان به یک‌دیگر نزدیک‌تر و فشرده‌ترند.

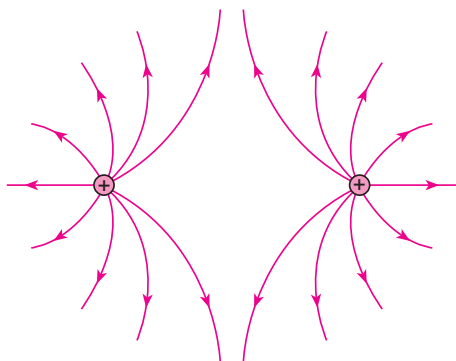
۴- خط‌های میدان یک‌دیگر را قطع نمی‌کنند، یعنی از هر نقطه فقط یک خط میدان می‌گذرد. به بیان دیگر، در هر نقطه‌ی فضا فقط یک میدان الکتریکی وجود دارد که همان میدان الکتریکی برایند است. در شکل ۳۱-۲ خط‌های میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



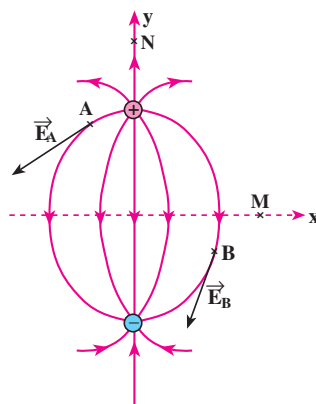
ب) بار منفی منفرد



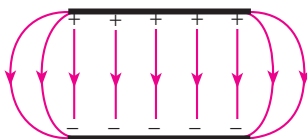
الف) بار مثبت منفرد



ت) دو بار الکتریکی مثبت و هم اندازه



پ) دو قطبی الکتریکی



ث) میدان بین دو صفحه‌ی رسانای موازی با بارهای هم اندازه (میدان یکنواخت)

شکل ۳۱-۲ - میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار

## تمرین ۲-۵

میدان الکتریکی حاصل از بارهای مثبت و منفی و برابند آن‌ها را در نقطه‌های M و N در شکل ۳۱-۲ پ رسم کرده و با نتیجه‌ی مثال ۲-۹ و تمرین ۲-۴ مقایسه کنید.

### فعالیت ۳-۲

- ۱- میدان الکتریکی را در اطراف دو بار الکتریکی منفی و هم اندازه رسم کنید.
- ۲- با توجه به ویژگی های خط های میدان الکتریکی، خط های میدان را در اطراف دو بار الکتریکی نقطه ای مثبت  $q_1$  و منفی  $q_2$  با فرض  $|q_2| > |q_1|$ ، رسم کنید.
- ۳- بردار میدان الکتریکی را در چند نقطه روی شکلی که در مرحله ی ۲ رسم کرده اید، نشان دهید.
- ۴- نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت  $q'$  و نیز بار منفی  $q''$  را که روی یک خط میدان واقع اند روی شکل مرحله ی ۲ رسم کنید.
- ۵- با توجه به تعریف میدان الکتریکی و ویژگی خط های میدان و با رجوع به شکل ۳۱-۲ ث برای میدان الکتریکی یکنواخت، تعریفی بیان کنید.

### ۶-۲- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی

اگر بار الکتریکی  $q$  در میدان الکتریکی  $\vec{E}$  قرار گیرد، از طرف میدان بر آن نیرو وارد می شود. این نیرو از رابطه ی ۹-۲ به دست می آید.

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

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (۱۱-۲)$$

اگر  $q$  مثبت باشد،  $\vec{F}$  و  $\vec{E}$  هم جهت اند اما اگر  $q$  منفی باشد،  $\vec{F}$  در خلاف جهت  $\vec{E}$  خواهد

بود.

### مثال ۱۰-۲

ذره ای به جرم  $2g$  و بار الکتریکی  $2\mu C$  را در میدان الکتریکی خارجی  $\frac{N}{C} \times 10^4$  قرار می دهیم. شتاب حاصل از نیروی الکتریکی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه ی ۱۱-۲ داریم:

$$F = qE$$

$$F = 2 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^4$$

$$F = 8 \times 10^{-2} \text{ N}$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$a = \frac{8 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-3}}$$

$$a = 40 \text{ m/s}^2$$

مثال‌های حل شده نشان می‌دهند که میدان الکتریکی در یک نقطه، به عامل‌های مختلفی بستگی دارد. اندازه‌ی بار الکتریکی، نحوه‌ی توزیع بار الکتریکی و فاصله‌ی نقطه‌ی مورد نظر از جسم باردار، از جمله‌ی این عامل‌ها هستند.

## ۷-۲- توزیع بار الکتریکی در یک جسم

**الف – جسم نارسانا:** وقتی به یک جسم نارسانا بار الکتریکی داده می‌شود، بار در محل داده شده به جسم باقی می‌ماند و در جسم جابه‌جا نمی‌شود.

**ب – جسم رسانا:** بر خلاف جسم نارسانا، وقتی به یک جسم رسانا بار الکتریکی داده می‌شود، آن بار الکتریکی در محل داده شده ساکن نمی‌ماند و در جسم رسانا توزیع می‌شود. برای پی‌بردن به چگونگی توزیع بار در جسم رسانا، آزمایش ۲-۳ را انجام دهید.

### آزمایش ۲-۳

**هدف:** نحوه‌ی توزیع بار در جسم رسانا

وسایله‌های آزمایش: ظرف فلزی دردار با پایه‌ی نارسانا (شکل ۲-۳۲ الف)، گوی فلزی، نخ، الکتروسکوپ، چسب نواری، واندوگراف و یا میله‌ی پلاستیکی و پارچه‌ی پشمی.

**شرح آزمایش:**

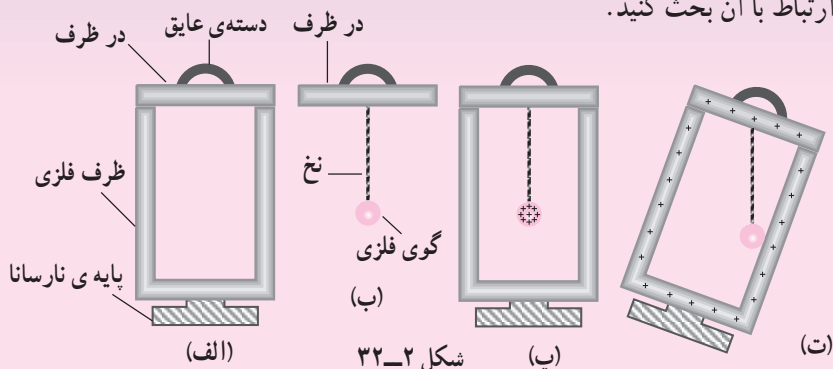
- ۱- به کمک چسب نواری یک سر نخ را به گوی فلزی و سر دیگر آن را به در ظرف وصل کنید به طوری که طول نخ باقیمانده از عمق ظرف کم‌تر باشد (شکل ۲-۳۲ ب).
- ۲- گوی فلزی را توسط واندوگراف یا روش القا و یا روش‌های دیگر باردار

کنید و از باردار شدن آن پس از نزدیک کردن به کلاهک یک الکتروسکوپ بدون بار مطمئن شوید. (در این جا بار گوی فلزی را مثبت فرض کرده ایم).

۳- بدون آن که گوی باردار با دست شما یا بدنه ی ظرف تماس یابد در ظرف را به آرامی بر روی ظرف قرار دهید (شکل ۲-۳۲ پ).

۴- پایه ی نارسانای ظرف را بگیرید و آن را به نحوی کج کنید تا گوی فلزی باردار برای لحظه ای کوتاه با درون ظرف تماس یابد (شکل ۲-۳۲ ت).

۵- در ظرف را برداشته و گلوله و همچنین ظرف را دوباره به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک کنید. نتیجه ی مشاهده ی خود را به کلاس گزارش کرده و در ارتباط با آن بحث کنید.



آزمایش هایی مانند آنچه شما انجام دادید، نشان می دهد که بار الکتریکی درون جسم رسانا باقی نمی ماند. تمام بار الکتریکی داده شده به جسم رسانا به سطح خارجی آن می رود و در آن جا توزیع می شود.

## فعالیت ۲-۴

در جسم رسانا، الکترون های آزاد می توانند جابه جا شوند. با بحث در گروه خود برای پرسش زیر، پاسخ مناسبی تهیه کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.  
 با توجه به این که در جسم جامد بارهای الکتریکی مثبت جابه جا نمی شوند، در این باره توضیح دهید: وقتی به یک جسم رسانا بار الکتریکی مثبت یا منفی داده می شود، این بارهای الکتریکی چگونه در جسم جابه جا شده و به سطح خارجی آن می روند؟

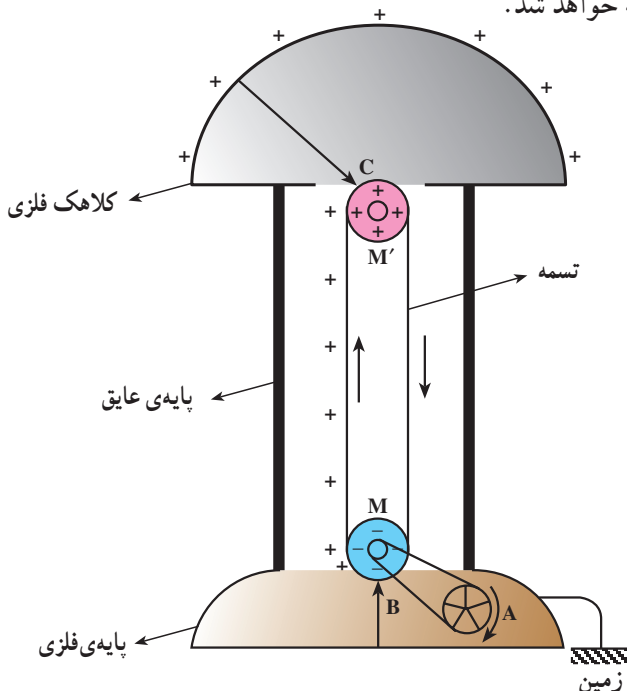


## مطالعه‌ی آزاد

### مولد وان دوگراف

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

در نمونه‌ی ساده‌ی مولد وان دوگراف، غلتک  $M$  توسط موتور  $A$  می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود. غلتک  $M$  از جنس پلی‌تن و  $M'$  از جنس پرسپکس است. شانه‌ی فلزی  $B$  به پایه‌ی فلزی متصل است. در اثر مالش تسمه با غلتک‌ها، غلتک  $M$  بار منفی و غلتک  $M'$  بار مثبت پیدا می‌کند. غلتک  $M$  که بار منفی دارد، در شانه‌ی فلزی  $B$  (که به زمین اتصال دارد)، بار مثبت القا می‌کند. بار مثبت توسط شانه‌ی  $B$  روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می‌شود. این بارهای مثبت، توسط تسمه که عایق است به کمک شانه‌ی فلزی  $C$  به کلاهک منتقل شده و به سطح خارجی کلاهک می‌روند. به این ترتیب، بار الکتریکی مثبت روی سطح خارجی کلاهک انباشته می‌شود. اگر جای غلتک‌های  $M$  و  $M'$  با هم عوض شود، بار منفی در سطح خارجی کلاهک انباشته خواهد شد.



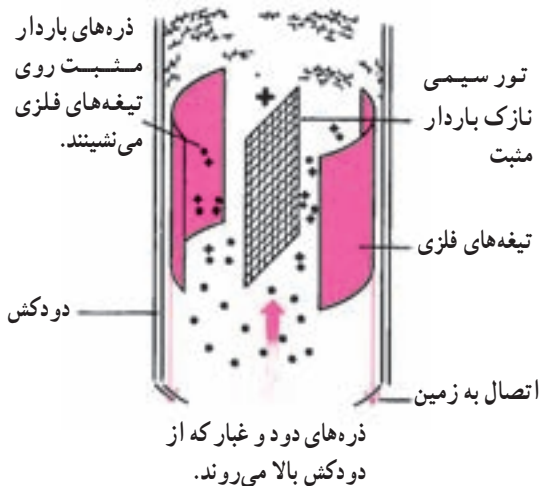
شکل ۲-۳۳

## رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی

رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی، دود و غبار را از گازهای زایدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌رود، جدا می‌سازد. شکل زیر چگونگی کار یک رسوب دهنده را نشان می‌دهد. توری سیمی را به مقدار زیاد باردار می‌کنند، به گونه‌ای که تخلیه‌ی الکتریکی پیوسته‌ای بین توری و تیغه‌های فلزی متصل به زمین روی دهد. این تخلیه، جریان پیوسته‌ای از یونها را به همراه دارد که خود را به ذره‌های غبار در گازی که از دودکش بالا می‌رود، متصل می‌کنند.

سپس ذره‌های باردار غبار از تور سیمی دفع شده و به سوی تیغه‌های متصل به زمین رانده می‌شوند و در آنجا رسوب می‌کنند. پس از مدتی این تیغه‌ها را با زدن ضربه می‌تکانند تا ذره‌های غبار و دود از دودکش پایین پریزد و در آنجا این ذره‌ها را جمع می‌کنند.

دودکش این کارخانه در هر دو عکس مورد بهره‌برداری است ولی در عکس پایین دستگاه رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی کار می‌کند.



شکل ۲-۳۴

چگالی سطحی بار الکتریکی: دیدیم که بار الکتریکی داده شده به یک جسم رسانا، در سطح خارجی آن توزیع می‌شود. بنا به تعریف، بار الکتریکی موجود در واحد سطح جسم را چگالی سطحی بار الکتریکی می‌نامند.

اگر بار الکتریکی جسم برابر  $q$  و مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده  $A$  باشد، چگالی سطحی بار - که با نماد  $\sigma$  (سیگما) نشان داده می‌شود - از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (۱۲-۲)$$

در S.I. بار الکتریکی بر حسب کولن و مساحت بر حسب مترمربع است. در نتیجه، یکای چگالی سطحی بار، کولن بر مترمربع خواهد بود.

## مثال ۱۲-۲

الف - به یک کره‌ی رسانا به قطر ۲ cm بار الکتریکی  $۱۲۵ \mu\text{C}$  داده شده است. چگالی سطحی بار کره را حساب کنید.

ب - اگر همین بار به کره‌ای به قطر ۲ m داده شود، چگالی سطحی بار آن چه قدر می‌شود؟

حل:

الف - مساحت سطح خارجی کره‌ای به شعاع  $R$  از رابطه‌ی  $A = 4\pi R^2$  به دست می‌آید.

$$A = 4\pi R^2$$

$$R = \frac{d}{2} = 1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$$

$$A = 4\pi \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 1/256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۲-۲ داریم:

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

$$\sigma = \frac{125 \times 10^{-6}}{1/256 \times 10^{-3}} \approx 10^{-1} \frac{\text{C}}{\text{m}^2} = 10^5 \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

ب -

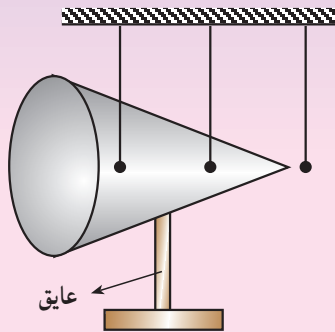
$$\frac{\sigma_2}{10^5} = \left(\frac{1}{100}\right)^2$$

$$\sigma = 10^{-5} \frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2}$$

## آزمایش ۴-۲

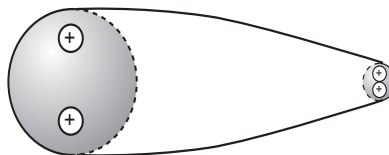
وسایله‌های آزمایش: مولد وان دوگراف یا دستگاه مشابه دیگر، مخروط فلزی روی پایه‌ی نارسانا، چند آونگ الکتریکی.

شرح آزمایش: مطابق شکل زیر، چند آونگ الکتریکی را در اطراف مخروط فلزی و در تماس با آن قرار دهید. با اتصال وان دوگراف به مخروط، به آن بار الکتریکی بدهید. انحراف آونگ‌ها را مشاهده کرده و با هم مقایسه کنید.



شکل ۳۵-۲

در جسمی مانند کره که سطح خارجی آن متقارن است، چگالی سطحی بار در همه‌جای آن یکسان است اما در جسم‌هایی که سطح خارجی متقارن ندارند، چگالی سطحی بار در همه‌جای سطح خارجی یکسان نیست. تجربه نشان می‌دهد که در مکان‌های برجسته و نوک‌تیز جسم رسانا، چگالی سطحی بار از سایر مکان‌های دیگر جسم بیش‌تر است. یعنی، فاصله‌ی بارهای داده شده به جسم، در مکان‌های نوک‌تیز کم‌تر از فاصله‌ی آن‌ها در مکان‌های پهن است. شکل ۳۶-۲ به گونه‌ای طرح‌وار نشان دهنده‌ی این مطلب است.



شکل ۳۶-۲

## ۲-۸- انرژی پتانسیل الکتریکی

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه با انرژی پتانسیل گرانشی آشنا شدید و دیدید که با صرف انرژی و انجام کار، می‌توان جسمی به جرم  $m$  را از سطح زمین تا ارتفاع  $h$  بالا برد. انرژی‌ای که صرف بالا بردن جسم (با سرعت ثابت) شده است، به صورت انرژی پتانسیل گرانشی ( $U = mgh$ ) در آن ذخیره می‌شود. با انرژی پتانسیل کشسانی نیز آشنا شدید و دیدید که وقتی فنری را به آرامی فشرده می‌کنیم یا می‌کشیم، کار انجام شده به صورت انرژی پتانسیل کشسانی در فنر ذخیره می‌شود. در این جا می‌خواهیم با انرژی پتانسیل الکتریکی بیش‌تر آشنا شویم.

در بخش ۲-۱ دیدید که دو ذره‌ی باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. همان‌طور که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم، وقتی دو ذره‌ی باردار را که بار هم‌نام دارند با سرعت ثابت به یک‌دیگر نزدیک می‌کنیم، برای غلبه بر نیروی رانشی آن‌ها باید کار انجام دهیم و یا اگر بخواهیم دو ذره‌ی باردار را که بار غیرهم‌نام دارند با سرعت ثابت از هم دور کنیم، باز هم باید کار انجام دهیم. کار انجام شده به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بارهای الکتریکی ذخیره می‌شود.

### مثال ۲-۱۲

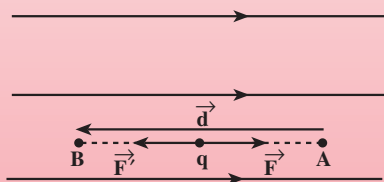
ذره‌ای با بار الکتریکی مثبت  $q$  را با سرعت ثابت در میدان الکتریکی یکنواخت (یعنی میدانی که بردار میدان در همه‌جای آن یکسان است)  $\vec{E}$ ، در خلاف جهت میدان و به موازات خط‌های میدان به اندازه‌ی  $d$  جابه‌جا می‌کنیم. برای این جابه‌جایی، چه مقدار کار باید انجام دهیم؟

**حل:** میدان الکتریکی بر بار مثبت  $q$ ، نیرویی برابر  $F = qE$  و در جهت میدان وارد می‌کند. برای آن‌که ذره‌ی  $q$  را با سرعت ثابت در خلاف جهت میدان جابه‌جا کنیم، باید به آن نیرویی برابر  $F' = qE$  و در خلاف جهت میدان - یعنی در جهت جابه‌جایی - وارد کنیم (شکل ۲-۳۷). بنابراین، زاویه‌ی بین نیرویی که ما وارد می‌کنیم (یعنی نیروی  $\vec{F}'$ ) و جابه‌جایی ( $\vec{d}$ ) برابر صفر است. کاری که ما انجام می‌دهیم، برابر است با:

$$W = F' \cdot d \cdot \cos \alpha$$

$$W = q \cdot E \cdot d \cdot \cos(0^\circ)$$

$$W = q \cdot E \cdot d$$



شکل ۲-۳۷

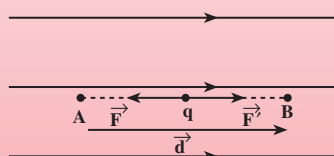
در این جا، کاری که ما انجام می دهیم مثبت است و انرژی مصرفی ما به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی، در بار الکتریکی  $q$  ذخیره می شود. هرچه اندازه ی جابه جایی بیش تر باشد، کار و انرژی مصرفی ما بیش تر می شود و در نتیجه، افزایش انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$ ، بیش تر می شود. درست مانند وقتی که یک جسم را روی زمین، از یک نقطه به نقطه ی بالاتری می بریم و انرژی پتانسیل گرانشی آن افزایش می یابد. اگر بار الکتریکی  $q$  را در نقطه ی  $B$  (شکل ۳۸-۲) رها کنیم، در جهت خط های میدان به حرکت در می آید و انرژی پتانسیل الکتریکی آن به انرژی جنبشی تبدیل می شود. مانند وقتی که یک جسم را از نقطه ی بالای زمین رها می کنیم و جسم به پایین حرکت می کند. در این حالت، انرژی پتانسیل گرانشی آن کاهش می یابد و به انرژی جنبشی تبدیل می شود.

### مثال ۳-۲

بار الکتریکی منفی  $q$  را در میدان الکتریکی یکنواختی به بزرگی  $E$  با سرعت ثابت و در جهت میدان به اندازه ی  $d$  جابه جا می کنیم. کاری را که در این جابه جایی انجام می شود، محاسبه کنید.

**حل:** میدان الکتریکی، نیرویی به اندازه ی  $F = q.E$  در خلاف جهت میدان به بار الکتریکی منفی وارد می کند. در نتیجه، برای جابه جایی بار  $q$  با سرعت ثابت باید نیروی  $F' = q.E$  در جهت میدان، یعنی در جهت جابه جایی، به آن وارد کنیم (شکل ۳۸-۲). کار انجام شده توسط ما در این جابه جایی برابر است با:

$$W = F'.d \cdot \cos \alpha \rightarrow W = q.E.d$$



شکل ۳۸-۲

در این مثال نیز کار انجام شده توسط ما مثبت است و انرژی مصرفی به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بار  $q$  ذخیره می شود. اگر بار  $q$  را رها کنیم، در خلاف جهت میدان شروع به حرکت می کند. در این حال، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می یابد و به انرژی جنبشی تبدیل می شود. از مثال های ۱۲-۲ و ۱۳-۲ چنین نتیجه می گیریم که تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک بار الکتریکی وقتی آن را در یک میدان الکتریکی جابه جا می کنیم، برابر انرژی ای است که برای جابه جایی

آن بار الکتریکی صرف می‌شود.

$$\Delta U = W$$

(۱۳-۲)

اگر کاری که ما برای جابه‌جایی بار الکتریکی (با سرعت ثابت) انجام می‌دهیم مثبت باشد ( $W > 0$ )، انرژی پتانسیل بار، افزایش می‌یابد؛ یعنی،  $\Delta U > 0$  و  $U_2 > U_1$  می‌شود. در صورتی که کار انجام شده توسط ما منفی باشد ( $W < 0$ )، انرژی پتانسیل بار الکتریکی کاهش می‌یابد؛ یعنی،  $\Delta U < 0$  و  $U_2 < U_1$  است.

## ۹-۲- اختلاف پتانسیل الکتریکی

در بخش ۲-۸ دیدید که بار الکتریکی در میدان الکتریکی، دارای انرژی پتانسیل الکتریکی است. در یک نقطه‌ی میدان، اندازه‌ی انرژی پتانسیل الکتریکی باری واقع در آن نقطه، به اندازه‌ی بار الکتریکی بستگی دارد. هرچه اندازه‌ی بار الکتریکی بیش‌تر باشد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز بیش‌تر می‌شود. در مبحث الکتریسته، معمولاً به‌غیر از انرژی پتانسیل، مفهوم دیگری نیز تعریف می‌شود که کاربرد عملی آن بیش‌تر است و به آن پتانسیل الکتریکی می‌گویند. با این کمیت در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه آشنا شدید و دیدید که اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه عامل شارش بار الکتریکی بین آن دو نقطه است. هم‌چنین، در همان کتاب دیدید که اگر دو ظرف آب به یک‌دیگر مربوط شوند، آب از ظرفی که انرژی پتانسیل گرانشی یکای جرم آن بیش‌تر است، به ظرف دیگر شارش می‌کند. در الکتریسته نیز عامل شارش بار الکتریکی به کمک اختلاف انرژی پتانسیل الکتریکی بار در دو نقطه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه، برابر تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یکای بار الکتریکی مثبت است، وقتی یکای بار از نقطه‌ی اول تا نقطه‌ی دوم جابه‌جا می‌شود. بنابراین، اگر انرژی پتانسیل الکتریکی بار مثبت  $q$  در یک نقطه‌ی میدان برابر  $U_1$  و در نقطه‌ی دیگر برابر  $U_2$  باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین این دو نقطه، که با نماد  $\Delta V$  نشان داده می‌شود، از رابطه‌ی ۱۴-۲ به‌دست می‌آید:

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad \text{و} \quad \Delta U = U_2 - U_1$$

با توجه به تعریف اختلاف پتانسیل الکتریکی، داریم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \quad (14-2)$$

در این رابطه،  $U$  بر حسب ژول (J)،  $q$  بر حسب کولن (C) و  $V$  بر حسب ولت (V) است.

در بخش ۲-۸ دیدید که اگر بار الکتریکی مثبت در جهت میدان الکتریکی حرکت کند، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می‌یابد. تغییر پتانسیل الکتریکی به تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بستگی دارد (رابطه ی ۲-۱۴)؛ بنابراین، نتیجه می‌گیریم که هرگاه بار الکتریکی مثبت در جهت میدان الکتریکی جابه‌جا شود، از پتانسیل الکتریکی بیش‌تر به پتانسیل الکتریکی کم‌تر رفته است. شما با انواع پیل (قوه) که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا رادیو از آن‌ها استفاده می‌شود و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. پیل‌ها معمولاً  $\frac{1}{5}$  ولتی،  $\frac{4}{5}$  ولتی یا ۹ ولتی‌اند. باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ ولتی یا بیش‌تراند. هر پیل یا 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 پایانه‌ی منفی را با  $V_-$  و پتانسیل پایانه‌ی مثبت را با  $V_+$  نشان دهیم، داریم:

$$\Delta V = V_+ - V_- = 12V$$

$$V_+ = 12 + V_-$$

بنابراین، پتانسیل پایانه‌ی مثبت به اندازه‌ی ۱۲ ولت از پتانسیل پایانه‌ی منفی آن بیش‌تر است. مثلاً اگر پتانسیل پایانه‌ی منفی را برابر  $4V -$  یا  $4V +$  فرض کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت به ترتیب برابر  $8V +$  یا  $16V +$  خواهد شد. ممکن است پتانسیل پایانه‌ی منفی را برابر صفر بگیریم، در این صورت، پتانسیل پایانه‌ی مثبت برابر  $12V +$  می‌شود. معمولاً (به‌خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین را برابر صفر می‌گیرند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به زمین می‌سنجند. در این صورت، پتانسیل هر جسم رسانا که به زمین وصل شود، برابر صفر می‌شود. مثلاً اگر پایانه‌ی منفی باتری را به زمین وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت آن برابر  $12V +$  ولت می‌شود. در هر حال، نکته‌ی مهم، اختلاف پتانسیل بین دو نقطه است که در محاسبه‌ها وارد می‌شود.

## تمرین ۲-۶

اگر پایانه‌ی مثبت یک باتری ۱۲ ولتی را به زمین وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی منفی آن چند ولت خواهد شد؟

## مثال ۲-۱۴

اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری یک خودرو برابر  $12V$  است. اگر



بار الکتریکی  $1/5 +$  کولن از پایانه‌ی مثبت تا منفی باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟  
 حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱۴-۲ داریم:

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

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

$$\Delta U = 1/5 \times (-12) = -18J$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه‌ی  $18J$  کاهش یافته است.

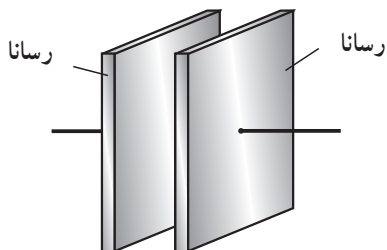
## تمرین ۷-۲

اگر بار الکتریکی جابه‌جا شده در مثال ۱۴-۲ منفی باشد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟

## ۲-۱-۰ خازن

خازن یک قطعه‌ی الکتریکی است که می‌تواند مقداری بار الکتریکی و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند و هر زمان که لازم باشد، آن را در مدار تخلیه کند. هر خازن از دو رسانا که به یک‌دیگر اتصال الکتریکی ندارند، تشکیل می‌شود.

خازن را به شکل‌های مختلف و برای مصرف‌های متفاوتی می‌سازند. در مدار لامپ‌های مهتابی (فلوئورسنت)، بلندگو، دلقوی ماشین، رادیو، تلویزیون، رایانه و ... از خازن استفاده می‌شود. برای آشنا شدن با چگونگی عمل خازن در مدار، ساده‌ترین شکل خازن را بررسی می‌کنیم. به این خازن، **خازن تخت** یا **مسطح** گفته می‌شود. رساناهای خازن



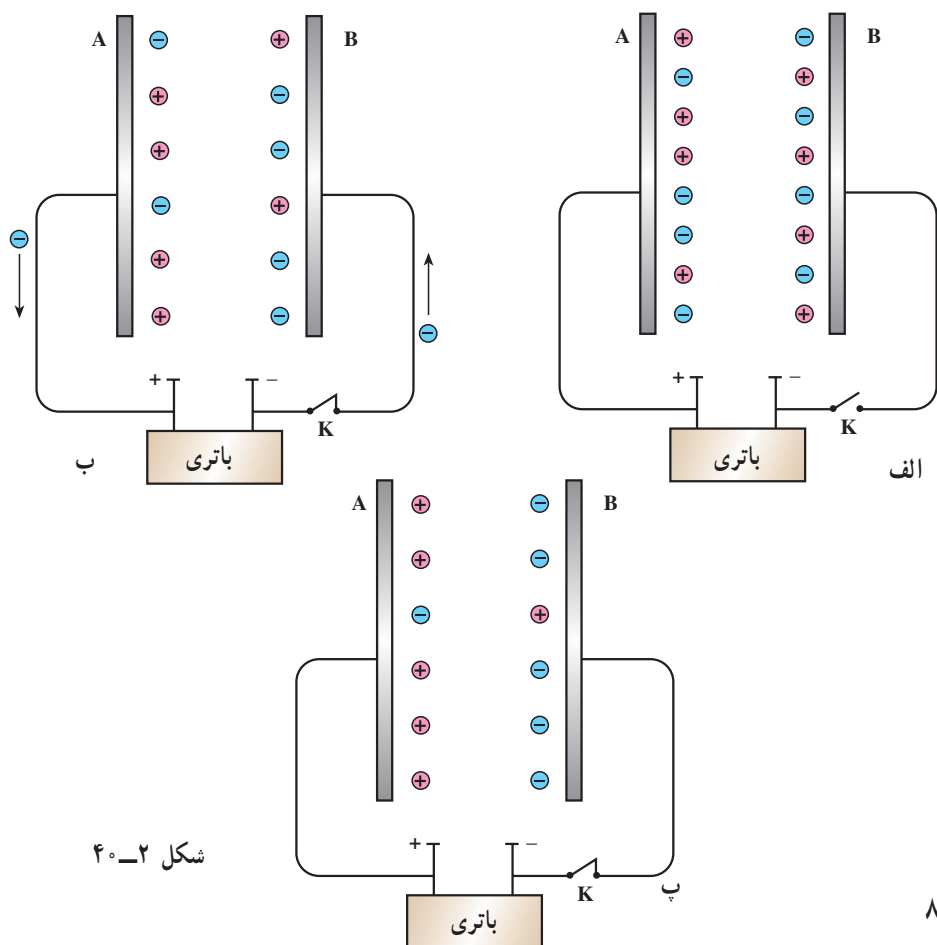
تخت، دو صفحه‌ی فلزی موازی یک‌دیگرند. به همین دلیل به این خازن، **خازن با صفحه‌های موازی** نیز گفته می‌شود. خازن تخت را در مدارها با نماد « $\text{—}| \text{—}$ » نشان می‌دهیم.

شکل ۲-۳۹- خازن تخت

**ذخیره‌ی بار الکتریکی در خازن :** وقتی به یک خازن مقداری بار الکتریکی داده شود، می‌گوییم

در خازن بار الکتریکی ذخیره شده است. برای ذخیره‌ی بار الکتریکی در خازن، به مولدی مانند یک باتری نیاز است. ابتدا دو صفحه‌ی خازن را مطابق شکل ۲-۴ الف با سیم‌های رابط و یک کلید به پایانه‌های مولد وصل می‌کنیم. با بستن کلید، باتری بار الکتریکی « $-q$ » را روی صفحه‌ی متصل به پایانه‌ی منفی انباشته می‌کند. بار « $-q$ »، بار الکتریکی « $+q$ » را روی صفحه‌ی مقابل القا می‌کند. بارهای منفی رانده شده از این صفحه، به مولد برمی‌گردند. برای روشن شدن موضوع به ساز و کار ذخیره‌ی بار در خازن می‌پردازیم.

همان‌گونه که در شکل ۲-۴ الف به صورت طرح وار نشان داده شده است، در هر یک از صفحه‌های خازن، بارهای مثبت و منفی وجود دارد. وقتی کلید (K) را وصل می‌کنیم، به علت وجود اختلاف پتانسیل الکتریکی بین هر پایانه، با صفحه‌ی رسانای متصل به آن، بارهای الکتریکی شروع به جابه‌جا شدن می‌کنند (شکل ۲-۴ ب). چون در رساناهای فلزی الکترون‌های آزاد می‌توانند جابه‌جا



شکل ۲-۴

شوند، باتری با مصرف کردن انرژی هر دو صفحه را باردار می‌کند. از پایانه‌ی منفی، تعدادی الکترون به صفحه‌ی B منتقل می‌شود؛ در حالی که پایانه‌ی مثبت باتری از صفحه‌ی A الکترون می‌گیرد. جابه‌جایی بارهای الکتریکی آن‌قدر ادامه می‌یابد تا پتانسیل الکتریکی هر یک از صفحه‌های خازن با پتانسیل پایانه‌ی متصل به آن برابر شود. به این ترتیب، اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی خازن (که به آن اختلاف پتانسیل دو سر خازن می‌گوییم) با اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های باتری برابر می‌شود (شکل ۲-۴۰ پ).

$$V_A = V_+ \quad \text{و} \quad V_B = V_-$$

$$V_A - V_B = V_+ - V_- \quad (۱۵-۲)$$

در نتیجه، هر یک از صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شود. روی صفحه‌ی A بار  $+q$  و روی صفحه‌ی B، بار  $-q$  انباشته می‌شود. در این حالت، می‌گوییم که بار الکتریکی  $q$  در خازن ذخیره شده است. در واقع، باتری با صرف انرژی، بار  $q$  را در خازن ذخیره کرده است. انرژی‌ای که باتری مصرف کرده، به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن ذخیره شده است. اکنون، خازن دارای بار الکتریکی و انرژی است.

## ۱۱-۲- ظرفیت خازن

آزمایش نشان می‌دهد که هرچه اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های مولد بیش‌تر باشد، بار ذخیره‌شده در خازن نیز بیش‌تر می‌شود. به عبارتی نسبت بار الکتریکی خازن ( $q$ ) به اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی آن ( $V$ )، یعنی نسبت  $\frac{q}{V}$ ، در آزمایش‌های مختلف ثابت می‌ماند. این نسبت را که به اندازه‌ی بار الکتریکی خازن و نیز به اختلاف پتانسیل دو سر آن بستگی ندارد، با نماد «C» نشان می‌دهیم و به آن ظرفیت خازن می‌گوییم. بنابراین، ظرفیت خازن برابر نسبت بار ذخیره‌شده در آن به اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی آن است.

$$C = \frac{q}{V} \quad (۱۶-۲)$$

به پاس خدمات مایکل فارادی، دانشمند انگلیسی، یکای ظرفیت فاراد نامیده شده است. در رابطه‌ی ۱۶-۲ بار الکتریکی بر حسب کولن، اختلاف پتانسیل بر حسب ولت و ظرفیت بر حسب فاراد (F) است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و ظرفیت خازن‌های تخت از حدود چند میکروفاراد تجاوز نمی‌کند.

## مثال ۱۵-۲

صفحه‌های خازن تختی را به پایانه‌های مولدی به اختلاف پتانسیل ۲۴۷ وصل می‌کنیم. اگر بار  $120 \mu C$  روی هر صفحه‌ی خازن ذخیره شود، ظرفیت خازن را محاسبه کنید. اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل ۳۶ ولت وصل کنیم، بار الکتریکی ذخیره شده در آن چه اندازه می‌شود؟  
حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱۶-۲ داریم:

$$C = \frac{q}{V}$$

$$C = \frac{1/2 \times 10^{-4}}{24} \quad \text{با استفاده از این رابطه، داریم:}$$

$$C = 5 \times 10^{-6} F = 5 \mu F$$

رابطه‌ی (۲-۱۶) را می‌توان به صورت  $q = C \cdot V$  نوشت. با استفاده از این

$$q = 5 \times 36 = 180 \mu C \quad \text{رابطه، داریم:}$$

## ۱۲-۲- عامل‌های مؤثر بر ظرفیت خازن تخت

ظرفیت خازن به بار الکتریکی خازن و اختلاف پتانسیل دو سر آن بستگی ندارد. ظرفیت خازن تخت از مشخصات ساختمانی خازن است و به عامل‌های زیر بستگی دارد.  
۱- با مساحت سطح مشترک صفحه‌های خازن که روبروی یک‌دیگر قرار دارند، نسبت مستقیم دارد.

$$C \propto A$$

۲- با فاصله‌ی دو صفحه از یک‌دیگر نسبت وارون دارد.

$$C \propto \frac{1}{d}$$

اگر بین دو صفحه‌ی خازن خلأ باشد، ظرفیت خازن تخت از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (17-2)$$

در رابطه‌ی ۱۷-۲،  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی الکتریکی خلأ است. در این رابطه،  $A$  بر حسب مترمربع،  $d$  بر حسب متر و  $C$  بر حسب فاراد ( $F$ ) است.

اگر یک دی‌الکتریک (نارسانا) مانند شیشه یا پارافین فضای بین دو صفحه‌ی خازن تختی را

پُر کند، ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. در این صورت، ظرفیت خازن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید :

$$C = k\varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (۱۸-۲)$$

در رابطه‌ی ۱۸-۲،  $k$  ضریبی بدون یکاست که به آن ثابت دی‌الکتریک گفته می‌شود. ثابت دی‌الکتریک به جنس دی‌الکتریک بستگی دارد. اگر بین دو صفحه خلأ باشد،  $k = ۱$  است.  $k$  برای سایر دی‌الکتریک‌ها بزرگ‌تر از یک است ( $k > ۱$ ). ثابت دی‌الکتریک برخی از ماده‌ها در جدول ۱-۲ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود ثابت دی‌الکتریک هوا تقریباً برابر ۱ است.

جدول ۱-۲- ثابت دی‌الکتریک دی‌الکتریک‌های متداول

ثابت دی‌الکتریک	دی‌الکتریک
	دی‌الکتریک‌های جامد
۱۰ - ۶	شیشه
۵/۶ - ۶/۶	میکا
۲/۱ - ۲/۳	کاغذ پارافینی
۲/۱ - ۲/۵	پارافین (در °C ۲۰)
	دی‌الکتریک‌های مایع
۲۵	الکل
۲ - ۲/۲	روغن
۸۰ - ۸۳	آب
	دی‌الکتریک‌های گازی
۱/۰۰۰۹۷	دی اکسید کربن
۱/۰۰۰۶۰	هوا
۱/۰۰۰۲۶	هیدروژن

## مثال ۱۷-۲

هر یک از صفحه‌های خازن تختی، به شکل مستطیلی به طول  $6\text{ cm}$  و عرض  $2\text{ cm}$  است که بین آن‌ها از دی الکتریکی به ضخامت  $1/5\text{ mm}$  و ثابت دی الکتریک

$$\epsilon_r = 9 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N.m}^2} \text{ پُر شده است. ظرفیت این خازن را محاسبه کنید.}$$

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱۸-۲ داریم:

$$C = k\epsilon_r \frac{A}{d}$$

$$C = 10 \times 9 \times 10^{-12} \times \frac{20 \times 60 \times 10^{-4}}{1/5 \times 10^{-3}}$$

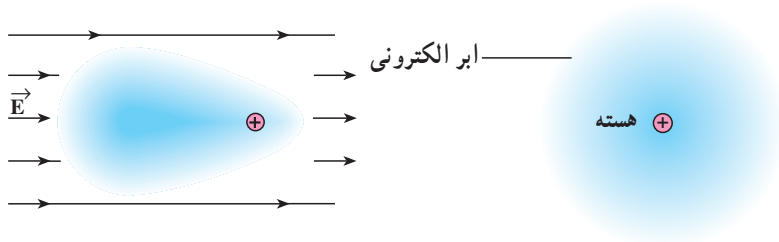
$$C = 7/2 \times 10^{-9} \text{ F} = 7/2 \text{ nF}$$

## فروشکست

دیدیم که اگر اختلاف پتانسیل دو سر خازن را افزایش دهیم، بار ذخیره‌شده در خازن نیز افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که اگر بار الکتریکی خازن از مقدار معینی بیش‌تر شود، یک میدان الکتریکی بسیار قوی بین دو صفحه ایجاد می‌شود. این میدان الکتریکی باعث می‌شود که دی الکتریک بین دو صفحه به‌طور موقت رسانا شود. در نتیجه، با ایجاد جرقه بین دو صفحه، خازن تخلیه می‌شود. این پدیده را **فروشکست دی الکتریک** می‌نامند. پدیده‌ی فروشکست باعث تغییر ماهیت یا سوراخ‌شدن دی الکتریک جامد و سوختن خازن می‌شود.

**بررسی میکروسکوپی نقش دی الکتریک:** در بخش ۱۲-۲ دیدیم که قراردادن دی الکتریک بین صفحه‌های یک خازن تخت، باعث افزایش ظرفیت آن می‌شود. اما دی الکتریک چگونه ظرفیت خازن را افزایش می‌دهد؟

وقتی یک دی الکتریک در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، تأثیر میدان الکتریکی بر اتم باعث می‌شود که ابر الکترونی در خلاف جهت میدان و هسته در جهت میدان جابه‌جا شوند (چرا؟). در نتیجه، مرکز مؤثر بار مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند. در این حالت، می‌گوییم که اتم در میدان الکتریکی قطبیده شده است.



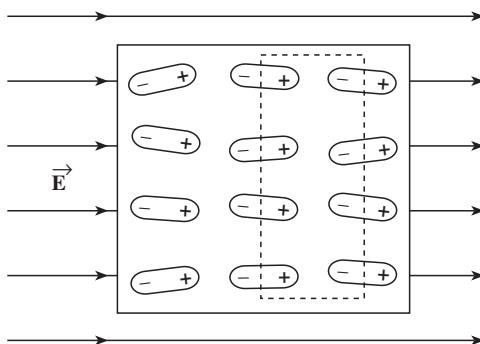
ب- در حضور میدان الکتریکی، مرکز مؤثر بارهای مثبت و منفی از هم جدا شده‌اند.

الف- در غیاب میدان الکتریکی، مرکز مؤثر بارهای مثبت و منفی بر هم منطبق‌اند.

شکل ۲-۴۱

در شکل ۲-۴۱ الف- یک اتم در غیاب میدان الکتریکی و ب- همان اتم در حضور میدان الکتریکی  $\vec{E}$  به‌طور طرح‌وار نشان داده شده است. مولکول‌های دی‌الکتریک‌ها در میدان الکتریکی قطبیده می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۲-۴۲ نشان داده شده است، درون دی‌الکتریک، بارهای الکتریکی یک‌دیگر را خنثی می‌کنند.



شکل ۲-۴۲ دی‌الکتریک در میدان الکتریکی