فیزیک ۳

سوم دبیرستان

الکتریسیته ساکن

Fadaifard.ir

حمید فدائی فرد

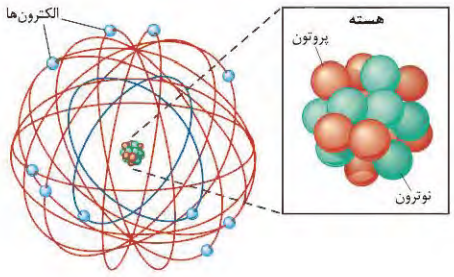
sarfsoraf.ir

۸ الکتریسیته‌ی ساکن

الکترواستاتیک یا الکتریسیته‌ی ساکن، شاخه‌ای از علم فیزیک است که به مطالعه‌ی پدیده‌های مرتبط با بارهای الکتریکی و نیروهای بین آنها می‌پردازد، در حالتی که بار چشمه بدون حرکت است یا به آرامی حرکت می‌کند. پدیده‌های الکترواستاتیکی از نیروهایی ناشی می‌شوند که بارهای الکتریکی بر هم وارد می‌کنند. این نیروها، نیروهای غالب در برهم کنش‌های بین ذرات در ابعاد متوسط بین اتمی هستند. برای مثال نیروی الکترواستاتیکی بین یک الکترون و یک پروتون که با یکدیگر یک اتم هیدروژن را تشکیل می‌دهند، در حدود $۱۰^{۴۰}$ مرتبه از نیروی گرانشی بین آنها بزرگتر است.

۸-۱. بار الکتریکی

با طرح ساده‌ی ساختمان اتم آشنا هستید. پروتون‌ها و نوترون‌ها که ذرات سنگینی هستند، در فضای بسیار کوچکی در هسته‌ی مرکزی اتم قرار دارند. الکترون‌ها که ذرات سبکی هستند، در فضای بزرگی (نسبت به ابعاد هسته) پیرامون هسته در چرخش‌اند. الکترون‌ها ـ بر طبق قرار داد ـ بار الکتریکی منفی دارند و بار الکتریکی پروتون‌ها مثبت است. نوترون ها نیز دارای بار الکتریکی نیستند.



Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

هر اتم در حالت عادی، خنثی است. یعنی تعداد بارهای مثبت و منفی آن با هم برابر است. اگر به جسم خنثی، تعدادی الکترون بدهیم، یا از آن تعدادی الکترون بگیریم، جسم مورد نظر اصطلاحاً باردار می‌شود. در تجربه‌های معمولی، هیچ گاه نمی‌توان پروتون‌های یک اتم را از آن جدا کرد. لذا تنها نحوه‌ی ایجاد بار الکتریکی در یک جسم، از طریق معادله‌ی الکترون صورت می‌گیرد.

میلیکان، با انجام آزمایشاتی توانست بار الکتریکی الکترون را $1/6\times10^{-19}\,C$ اندازه‌گیری کند و معلوم شد که هر بار الکتریکی دلخواه نیز مضربی از یک بار پایه است. مقدار بار پایه، همان مقدار بار الکترون است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$q=\pm ne \quad ; \quad n=1,2,3,... \qquad (1-8)$$

مثال ۱

بار خالص یک خط‌کش پلاستیکی $12\,nC$ است. چه تعداد الکترون از آنها بگیریم تا بار خط‌کش $4\,nC$ شود؟

مثال ۲

از هر سانتی‌متر مربع از یک ماده‌ی عایق به ابعاد $30\,cm\times2cm$، تعداد 2×10^{10} الکترون گرفته‌ایم. بار خالص این جسم چند نانو کولن است؟

۸-۲. اجسام رسانا و نا رسانا

در یک تقسیم‌بندی، اجسام را می‌توان به دو گروه اجسام رسانا و نارسانا تقسیم کرد. در اجسام رسانا هر اتم دارای یک یا چند الکترون است که این الکترون‌ها در قید هسته‌ی خاصی قرار ندارند و می‌توانند آزادانه درون اتم حرکت نمایند. این الکترون‌ها را، الکترون آزاد می‌نامند. اما در اجسام نارسانا، الکترون آزاد وجود ندارند و انتقال بار الکتریکی از محلی به محل دیگر در جسم، به سهولت امکان پذیر نیست.

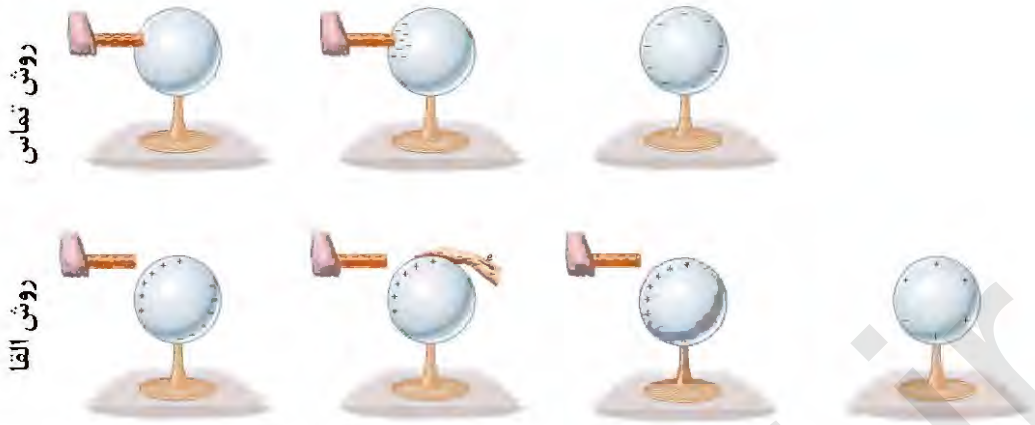
نکته: برای ایجاد بار الکتریکی در اجسام نارسانا، معمولاً از روش مالش بین دو جسم نارسانا استفاده می‌شود. مالش میان دو جسم سبب می‌شود که تعدادی الکترون از یکی از جسم‌ها به دیگری منتقل می‌شود.

تجربه نشان می‌دهد که در اثر مالش پلاستیک با پارچه‌ی پشمی، پلاستیک الکترون دریافت می‌کند و بار آن منفی می‌شود و پارچه‌ی پشمی به دلیل از دست دادن الکترون، بار مثبت پیدا می‌کند.

به همین ترتیب اگر میله‌ی شیشه‌ای به پارچه پشمی، مالش داده شود، میله دارای بار مثبت و پارچه دارای بار منفی می‌شود.

نکته: برای ایجاد بار الکتریکی در اجسام رسانا، معمولاً از روش تماس یا القای الکتریکی استفاده می‌شود. شکل‌های زیر این دو روش را نشان می‌دهد.

sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir



مشاهده می‌شود که در روش تماس، بار نهایی کره، مشابه بار الکتریکی میله است؛ اما در روش القای الکتریکی، بار نهایی، مخالف بار میله‌ی نزدیک شده است.

۸-۳. الکتروسکوپ

شکل مقابل، اجزای تشکیل دهنده‌ی یک الکتروسکوپ یا برق‌نما را نشان می‌دهد.

از این وسیله می‌توان برای تعیین بار دار بودن یا خنثی بودن یک جسم و همچنین تعیین نوع بار الکتریکی، استفاده کرد. علاوه بر آن، می‌توان به کمک الکتروسکوپ دارای بار الکتریکی، تعیین کرد که یک جسم، رسانا یا نارسانا است.

مثال ۳

چگونه می‌توان به کمک الکتروسکوپ تعیین کرد که یک جسم، دارای بار الکتریکی، یا خنثی است؟

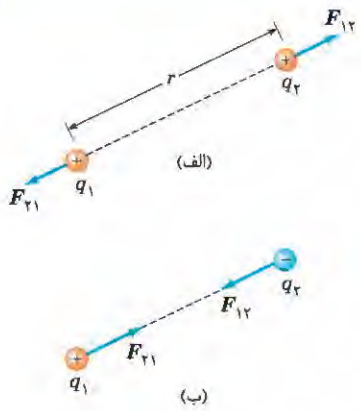
مثال ۴

چگونه به کمک الکتروسکوپ تعیین کرد که یک جسم، دارای بار الکتریکی، یا خنثی است؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

۸-۴. قانون کولن

بر طبق قانون کولن، نیروی ربایشی یا رانشی بین دو ذره‌ی باردار q_1 و q_2 که در فاصله‌ی r از یکدیگر قرار دارند، با حاصل ضرب اندازه‌ی بار دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصله‌ی آنها از یکدیگر، نسبت وارون دارند. این قانون را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد:



$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{r^2} \qquad (۲-۸)$$

در این رابطه، q_1 و q_2 بر حسب کولن (C)، r بر حسب متر (m) و نیرو بر حسب نیوتن (N) است و ε_0 یک ثابت جهانی است که ضریب گذردهی الکتریکی خلاء نام دارد و مقدار آن، $\varepsilon_0 = 8/85\times10^{-12}\ \frac{C^2}{N.m^2}$ است.

برای سادگی در نوشتار، می‌توان ضریب قانون کولن را با نماد k نشان داد. در این صورت:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \simeq 9/0\times10^{9}\ \frac{N.m^2}{C^2} \qquad (۲-۸)$$

مثال ۵

دو بار الکتریکی نقطه‌ای در فاصله‌ی d از یکدیگر قرار دارند. اندازه‌ی یکی از بارها را نصف کرده و فاصله‌ی دو بار الکتریکی را ۲۵٪ افزایش می‌دهیم. نیروی کولنی بین این دو بار، چند درصد و چگونه تغییر می‌کند؟

نکته: می‌دانیم بر طبق قانون پایستگی بار الکتریکی، بار الکتریکی هیچ گاه به وجود نمی‌آید و از بین هم نمی‌رود، به عبارت دیگر، مجموع بارهای الکتریکی ذرّات، در هر پدیده‌ی فیزیکی، قبل و بعد از وقوع آن پدیده با هم برابر است.

مثال ۶

دو کره‌ی کوچک فلزی مشابه، دارای بارهای الکتریکی $+3q$ و $-7q$ هستند و در فاصله‌ی r از یکدیگر قرار دارند. این دو کره را به هم تماس داده و در فاصله‌ی $2r$ از یکدیگر قرار می‌دهیم. نیروی بین دو بار، چند برابر شده است؟

sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۷

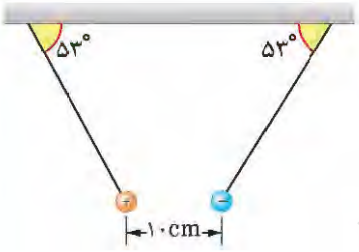
دو گلوله‌ی فلزی کوچک مشابه به جرم‌های m، به ترتیب دارای بارهای q_A و q_B هستند و مطابق شکل در حال تعادل‌اند.

الف) فاصله‌ی این دو بار را تعیین کنید.

ب) نیروی وارد بر کف ظرف را به دست آورید.

مثال ۸

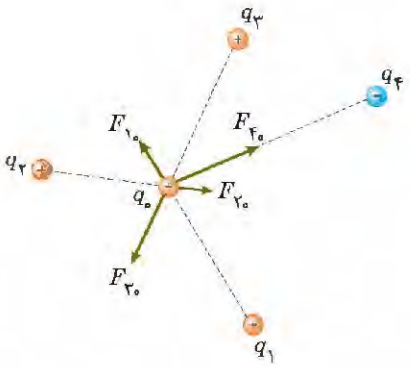
در شکل مقابل، دو گلوله‌ی کوچک به جرم‌های مساوی، دارای بارهای الکتریکی $q_1 = -0/3\mu C$ و $q_2 = 0/2\mu C$ و در حال تعادل هستند. جرم هر کدام از گلوله‌ها را بیابید. $\cos 53^\circ = 0/6$



مثال ۹

دو گلوله‌ی مشابه را از یک نقطه توسط دو ریسمان هم اندازه آویزان کرده‌ایم. اگر به هر کدام از گلوله ها بار q بدهیم، زاویه‌ی میان دو ریسمان، 74° و اگر به هر کدام از آن‌ها بار q' بدهیم، زاویه‌ی میان دو ریسمان 106° می‌شود. نسبت $\frac{q'}{q}$ را تعیین کنید.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

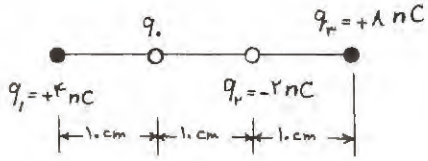


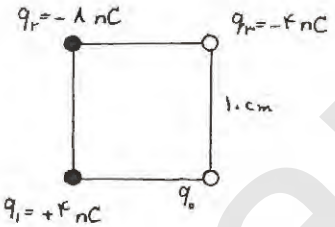
اصل بر هم نهی نیروها

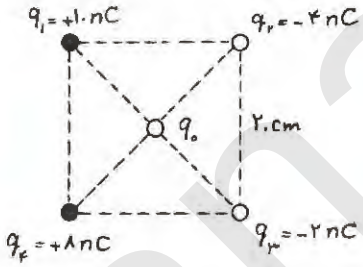
تجربه نشان می‌دهد اگر تعدادی بار نقطه‌ای در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برایند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر در غیاب سایر ذره‌ها، بر آن ذره وارد می‌کند. این موضوع که از آزمایش نتیجه شده است را اصل برهم‌نهی نیروهای کولنی می‌نامند.

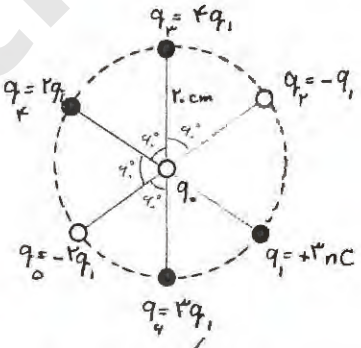
مثال ۱۰

در هر کدام از شکل‌های زیر، بر آیند نیروهای وارد بر بار $q_0 = -2\,nC$ را بیابید.









(q_0 در مرکز دایره است)

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

نکته: اگر دو بار نقطه‌ای q_1 و q_2 در فاصله‌ی d از یکدیگر قرار داشته باشند، هر بار دلخواهی را روی خط واصل این دو بار و در نقطه ای به فاصله‌ی x از بار q_1 قرار دهیم، آن بار در حال تعادل خواهد بود. اگر بارهای الکتریکی هم‌نام باشند، نقطه‌ی مورد نظر بین دو بار و اگر ناهم‌نام باشند، نقطه‌ی مورد نظر خارج از دو بار قرار دارد و در این‌صورت داریم:

$$x = \frac{d}{\sqrt{\left|\frac{q_2}{q_1}\right|} \pm 1} \qquad (۳-۸)$$

در این رابطه، علامت مثبت $(+)$ برای حالتی است که بارهای نقطه‌ای هم‌نام باشند و علامت منفی $(-)$ برای زمانی استفاده می‌شود که بارهای الکتریکی ناهم‌نام باشند.

مثال ۱۱

دو بار نقطه‌ای $q_1 = +3\text{nC}$ و $q_2 = 27\text{nC}$ در فاصله‌ی 60cm از یکدیگر قرار دارند. بار نقطه‌ای $q_0 = -2\text{nC}$ را در چه محلی قرار دهیم تا در حال تعادل باقی بماند؟ در این حالت برآیند نیروهای وارد بر بار q_1 چند نیوتون است؟

مثال ۱۲

مثال ۱۱ را برای حالتی که $q_2 = -27\text{nC}$ است، حل نمایید.

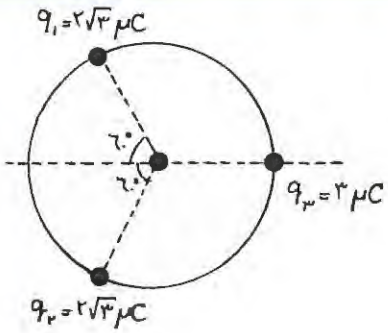
مثال ۱۳

دو بار نقطه‌ای $q_1 = 2\mu\text{C}$ و $q_2 = 8\mu\text{C}$ در فاصله‌ی 90cm از یکدیگر قرار دارند. محل و مقدار بار q_0 را به گونه‌ای تعیین کنید که هر سه بار در حال تعادل باشند.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

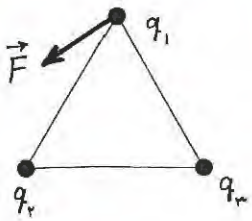
مثال ۱۴

مطابق شکل، سه بار نقطه‌ای روی محیط دایره‌ای به شعاع $10\,cm$ ثابت نگه داشته شده‌اند و بار چهارم (q_4) که باری مثبت است، در مرکز دایره قرار دارد. اگر برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر بار q_2 برابر $8/1\,N$ باشد، بار q_4 چند میکروکولن است؟



مثال ۱۵

در سه رأس مثلث متساوی الاضلاعی به شکل مقابل، بارهای نقطه‌ای q_1 و q_2 وجود دارند. اگر برآیند نیروهای وارد بر q_1 نیروی $\vec{F}$ باشد، کدام گزینه صحیح است؟



۱) q_1 و q_2 هم‌نام و $|q_2|>|q_3|$

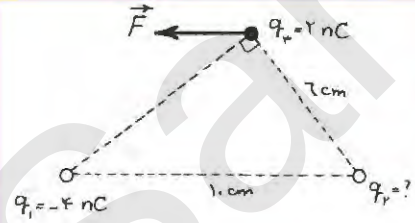
۲) q_1 و q_3 ناهم‌نام و $|q_2|>|q_1|$

۳) q_1 و q_2 هم‌نام و $|q_3|>|q_1|$

۴) q_1 و q_3 ناهم‌نام و $|q_1|>|q_3|$

مثال ۱۶

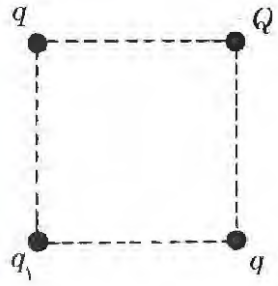
سه بار نقطه‌ای مطابق شکل در جای خود ثابت شده‌اند. برآیند نیروهایی که بارهای q_1 و q_2 بر بار q_3 وارد می‌کنند (نیروی $\vec{F}$) موازی با قاعده‌ی مثلث است. بار q_2 چند میکرو کولن است؟



Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۱۷

در شکل مقابل چهار بار نقطه‌ای در چهار رأس یک مربع قرار دارند. نوع و مقدار بار q_1 را به‌گونه‌ای تعیین کنید که بار Q در تعادل باشد.

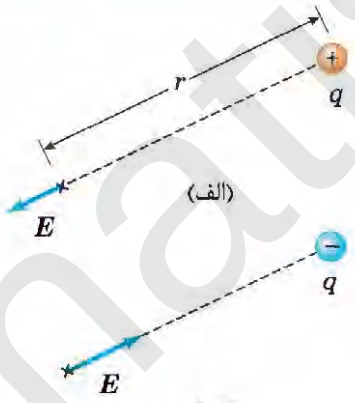


۸-۴. میدان الکتریکی

هر بار الکتریکی یا آرایشی از بار الکتریکی، در اطراف خود خاصیتی ایجاد می‌کنند که به آن میدان الکتریکی گفته می‌شود. برای تعیین میدان الکتریکی در هر نقطه، بار مثبت بسیار کوچک (موسوم به بار آزمون) را در آن نقطه قرار می‌دهیم و نیروی الکتریکی وارد بر آن ($\vec{F}$) را به‌دست می‌آوریم. میدان الکتریکی ($\vec{E}$) ناشی از آرایش بار در آن نقطه، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q_0} \qquad (۸-۴)$$

از این رابطه می‌توان نتیجه گرفت که میدان الکتریکی نیز یک کمیت برداری است که جهت آن، هم‌جهت با نیروی وارد بر بار آزمون است. یکای میدان الکتریکی در SI، نیوتون بر کولن ($\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$) است.



میدان الکتریکی یک بار نقطه‌ای:

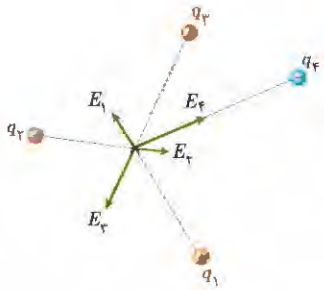
با توجه به قانون نیوتون و تعریف میدان الکتریکی، می‌توان میدان الکتریکی حاصل از یک بار نقطه‌ای مانند q، در فاصله‌ی r از آن را به کمک رابطه‌ی زیر تعیین کرد:

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{|q|}{r^2}=k\frac{|q|}{r^2} \qquad (۸-۵)$$

مثال ۱۸

اندازه‌ی میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۲ متری یک بار نقطه‌ای، $۲۵۰\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ بیش‌تر از اندازه‌ی میدان در فاصله‌ی ۳ متری آن بار است. میدان الکتریکی در فاصله‌ی ۳ متری چند نیوتون بر کولن است؟

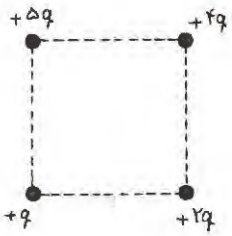
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir



نکته: در مورد میدان‌های الکتریکی نیز، اصل بر هم نهی بر قرار است. بنابراین میدان الکتریکی حاصل از یک مجموعه از بارهای الکتریکی را می‌توان از جمع برداری میدان هرکدام از بارها بدست آورد.

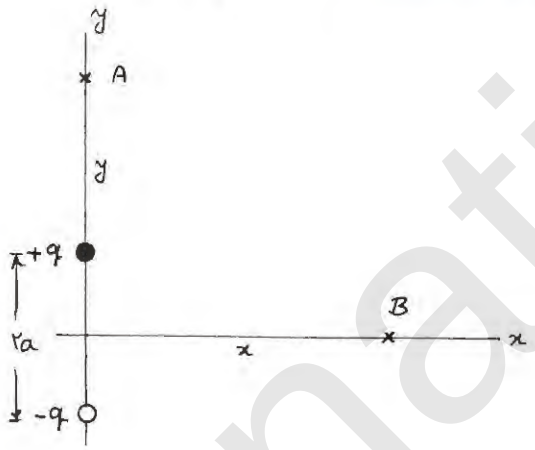
مثال ۱۹

اگر در رأس مربعی بار q قرار گیرد، میدان الکتریکی حاصل در مرکز مربع E است. اگر در چهار رأس همان مربع بارهای الکتریکی مطابق شکل قرار گیرند، اندازه‌ی میدان الکتریکی در مرکز آن چند E است؟



مثال ۲۰

در شکل مقابل، اندازه‌ی میدان الکتریکی حاصل از دو قطبی الکتریکی را در نقاط A و B تعیین کنید:



Sanatisharif.ir

مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۲۱

دو بار نقطه‌ای مشابه ($q_1 = q_2 = q$) در فاصله‌ی $2a$ از یکدیگر قرار دارند.

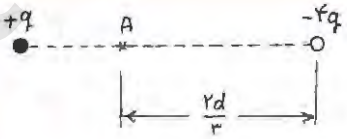
الف) میدان الکتریکی حاصل از آنها را روی عمود منصف خط واصل این دو بار و در فاصله‌ی x از آن به‌دست آورید.

ب) نمودار تغییرات میدان الکتریکی بر حسب فاصله (x) را رسم نمایید.

ج) در چه فاصله‌ای (برحسب a) میدان الکتریکی بیشینه است؟ اندازه‌ی میدان در این نقطه چه‌قدر است؟

مثال ۲۲

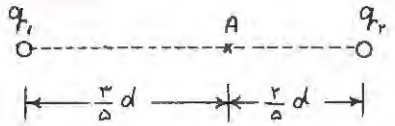
در شکل مقابل دو بار نقطه ای q و $-4q$ به فاصله‌ی d از یکدیگر قرار دارند و میدان الکتریکی در نقطه‌ی A برابر $\vec{E}$ است. اگر بار q را خنثی کنیم، میدان الکتریکی در نقطه‌ی A را تعیین کنید.



Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۲۳

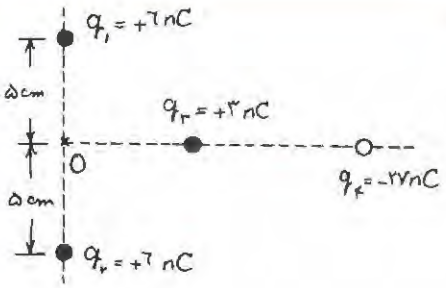
در شکل مقابل، میدان الکتریکی در نقطه‌ی A، $\vec{E}$ است.



هنگامی که بار q_1 را خنثی می‌کنیم، میدان در همان نقطه، $+\frac{\vec{E}}{3}$ می شود. نسبت $\frac{q_2}{q_1}$ را تعیین کنید.

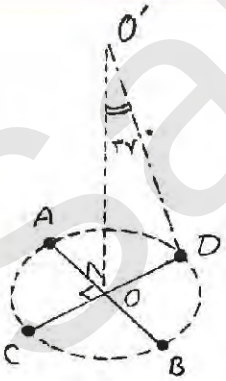
مثال ۲۴

بارهای الکتریکی q_1، q_2، q_3 و q_4 مطابق شکل مقابل قرار گرفته‌اند. بار q_4 را چند سانتی‌متر و در کدام جهت جابه‌جا کنیم تا میدان حاصل از بارها در نقطه‌ی O برابر صفر شود؟



مثال ۲۵

دو قطر عمود بر هم AB و CD از یک دایره‌ی افقی را در نظر گرفته و چهار بار نقطه‌ای مشابه در نقاط A، B، C و D قرار می‌دهیم. اگر میدان الکتریکی هر یک از بارها در نقطه‌ی O برابر $5\times10^{4}\,\frac{N}{C}$ باشد، برآیند میدان الکتریکی حاصل در نقطه‌ی O' چند نیوتون بر کولن است؟

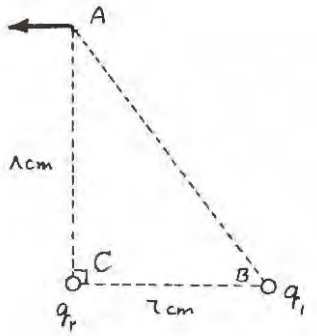


Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۲۶

در شکل مقابل، میدان الکتریکی بر آیند حاصل از دو بار نقطه‌ای q_1 و q_2 در رأس A، مثلث قائم الزاویه به موازات ضلع BC است.

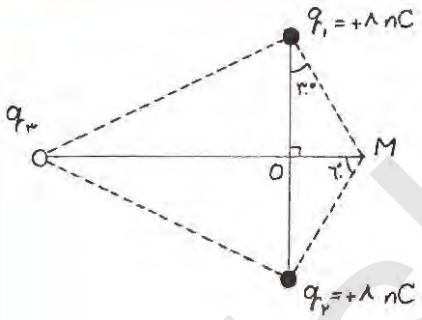
نسبت $\frac{q_1}{q_2}$ را بیابید.



مثال ۲۷

در شکل مقابل، میدان الکتریکی حاصل از بارها در نقطه‌ی M، صفر است. زاویه‌ی θ را بیابید.

$(OM = 4\text{cm} \ , \ q_3 = -12/5\text{nC})$

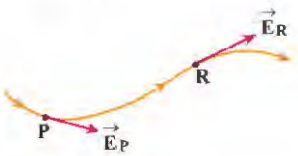


خطوط میدان الکتریکی

میدان الکتریکی در اطراف یک جسم با مجموعه‌ای از اجسام باردار را می‌توان به کمک خط‌هایی نمایش داد که به خطوط میدان معروف هستند. این خطوط دارای ویژگی‌های زیر هستند:

۱. خطوط میدان در هر نقطه، هم‌جهت با نیروی وارد بر بار مثبت در آن نقطه است. بنابراین جهت این خط‌ها برای بار مثبت، رو به خارج و برای بار منفی رو به داخل است.

۲. میدان الکتریکی در هر نقطه، برداری مماس بر خط میدان گذرنده از آن نقطه و هم جهت با هم است.



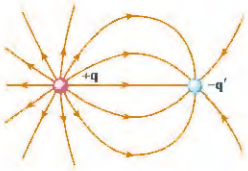
۳. در هر ناحیه از فضا که میدان قوی‌تر باشد، خطوط میدان به هم نزدیکتر هستند.

۴. خطوط میدان هیچگاه یکدیگر را قطع نمی‌کنند.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

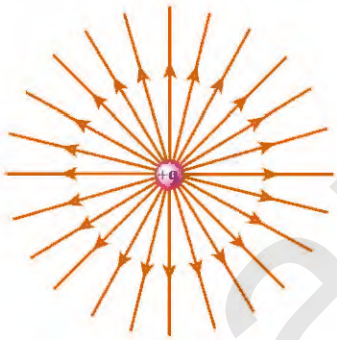
۵. خطوط میدان همواره بر سطح رسانا عمود هستند.

۶. خطوط میدان، در اطراف بارهای کوچک‌تر، دارای انحنای بیش‌تری هستند.

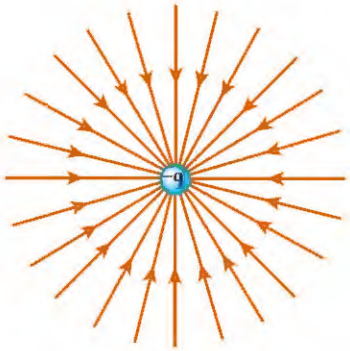


نکته: هرگاه در ناحیه‌ای از فضا، اندازه و جهت بردار میدان الکتریکی ثابت باشد، میدان در آن ناحیه را میدان یکنواخت می‌نامند. در این‌صورت خطوط میدان الکتریکی در آن ناحیه، خطوطی مستقیم و هم جهت هستند که موازی بوده و فاصله‌ی آنها نیز با هم برابر است.

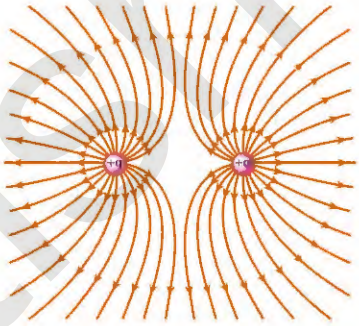
نکته: شکل‌های زیر، خطوط میدان الکتریکی در اطراف چند آرایش بار را نشان می‌دهد:



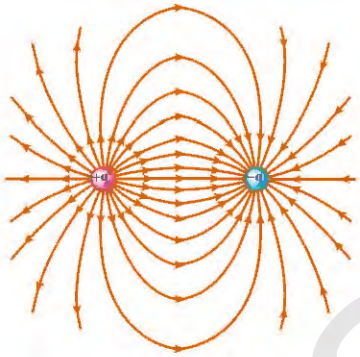
▲ خطوط میدان اطراف بار نقطه‌ای مثبت



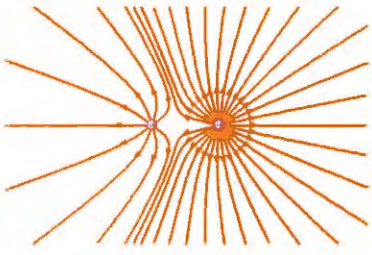
▲ خطوط میدان اطراف بار نقطه‌ای منفی



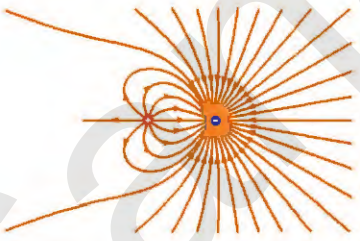
▲ خطوط میدان اطراف دو بار نقطه‌ای مثبت هم‌اندازه



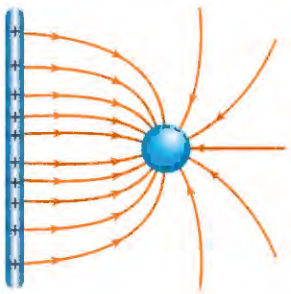
▲ خطوط میدان اطراف دو بار نقطه‌ای ناهم‌نام و هم‌اندازه



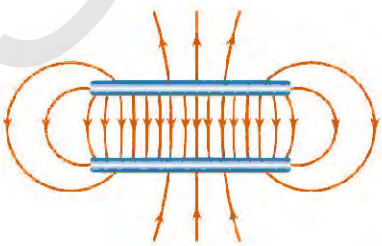
▲ خطوط میدان اطراف دو بار نقطه‌ای مثبت غیر هم‌اندازه



▲ خطوط میدان اطراف دو بار نقطه‌ای ناهم‌نام غیر هم‌اندازه



▲ خطوط میدان اطراف یک کره و یک صفحه‌ی تخت باردار



▲ خطوط میدان اطراف دو صفحه‌ی باردار ناهم‌نام

Sanatsharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatsharif.ir

نیروی وارد بر ذره‌ی باردار در میدان الکتریکی

با توجه به تعریفی که برای میدان الکتریکی بیان شد، می‌توان نتیجه گرفت اگر بار q در میدان الکتریکی $\vec{E}$ قرار گیرد، از طرف میدان به آن نیروی $\vec{F}$ وارد می‌شود و داریم:

$$\vec{F} = q\vec{E} \qquad (۶-۸)$$

بزرگی این نیرو از رابطه‌ی $F = |q|E$ به دست می‌آید و جهت آن اگر q مثبت باشد، در همان جهت $\vec{E}$ و اگر q منفی باشد در خلاف جهت $\vec{E}$ است.

مثال ۲۸

ذره‌ای به جرم $2\,g$ و بار الکتریکی $-2\,\mu C$ در میدان الکتریکی یکنواخت $4\times10^{4}\,\frac{N}{C}$ قرار دارد.

الف) شتاب حاصل از نیروی الکتریکی وارد بر این ذرّه را بیابید.

ب) اگر ذره با سرعت $4\,\frac{m}{s}$ درجهت میدان پرتاب شده باشد، پس از طی چه مسافتی متوقف می‌شود؟

مثال ۲۹

چند نانوکولن بار الکتریکی روی بادکنکی به جرم $10\,g$ باشد تا وقتی درون یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $5\times10^{5}\,\frac{N}{C}$ قرار می‌گیرد که جهت آن در راستای قائم و رو به پایین است، در جای خود ثابت بماند؟

مثال ۳۰

یک میدان الکتریکی یکنواخت در ناحیه‌ای از فضا، میان دو صفحه برقرار شده است. الکترونی از حالت سکون از صفحه‌ی با بار منفی رها می شود و پس از $15\,ns$ به صفحه‌ی مقابل که در فاصله‌ی ۲ سانتی متری آن است، می‌رسد.

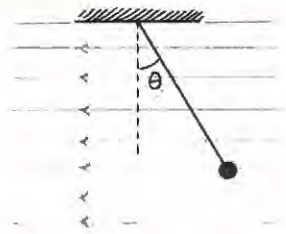
الف) سرعت الکترون هنگام برخورد به صفحه‌ی دوّم چه‌قدر است؟

ب) بزرگی میدان الکتریکی را تعیین کنید.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۳۱

یک کره پلاستیکی کوچک بار دار به جرم $2g$ به انتهای ریسمان عایقی متصل است و نخ، درون میدان الکتریکی یکنواخت افقی به بزرگی $E = 3\times10^{5}\ \frac{N}{C}$ قرار دارد.



الف) اگر راستای نخ با امتداد قائم زاویه‌ی 37° بسازد، بار کره را تعیین کنید.

ب) اگر بخواهیم زاویه نخ با امتداد قائم، 16° افزایش یابد، بار کره باید چند برابر شود؟

$\tan 37^\circ = 0.75$

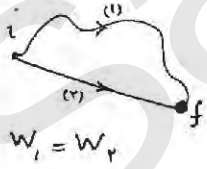
۸-۵. انرژی پتانسیل الکتریکی

همانگونه که در مبحث کار و انرژی بیان شد، می‌دانیم در یک تقسیم‌بندی نیروها را به دو گروه نیروهای پایستار و نیروهای ناپایستار تقسیم می‌کنند. ویژگی اصلی نیروهای پایستار آن است که:

- کار انجام شده توسط این نیروها به مسیر بستگی ندارد (و کار انجام شده در مسیر بسته صفر است.)
- این نیروها، پتانسیل‌پذیر هستند. یعنی می‌توان برای آنها یک پتانسیل (مانند U) تعریف کرد، به گونه‌ای که داشته باشیم:

$$W = -\Delta U = U_i - U_f$$

قبلاً با دو نیروی پایستار وزن و نیروی کشسانی فنر، آشنا شده اید. یکی دیگر از این نیروها، نیروی الکتریکی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت:



- کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی، به مسیر بستگی ندارد.

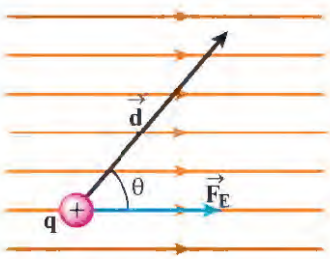
$$W_1 = W_2 = \cdots$$

- کار انجام شده توسط این نیرو، در مسیر بسته صفر است.
- می‌توان برای آن انرژی پتانسیل الکتریکی تعریف کرد، به‌گونه‌ای که:

$$W_{elec} = -\Delta U \qquad (۶-۸)$$

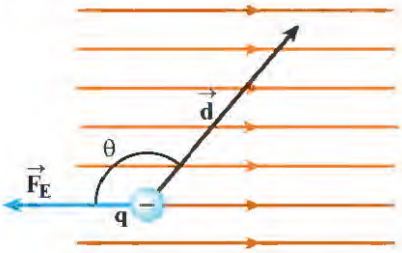
یعنی تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یه ذره‌ی باردار میدان الکتریکی E و در یک جابه‌جایی مشخص، برابر منفیِ کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی در همان جابه‌جایی است.

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir



نکته: با استفاده از تعریفی که برای کار می‌شناسیم، می‌توان کار نیروی الکتریکی هنگام جابه‌جایی ذره‌ای با بار الکتریکی q در میدان یکنواخت E را به صورت زیر تعیین کرد:

$$W_{elec} = F\,d\cos\theta = |q|\,E\,d\cos\theta \qquad (۷-۸)$$



دقت داریم که در این رابطه، θ زاویه‌ی بین نیروی الکتریکی ($\vec{F}$) و جابه‌جایی ($\vec{d}$) است.

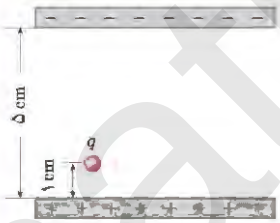
همچنین باید توجه داشت که جهت نیروی وارد بر ذره گاهی اوقات در جهت میدان (برای بارهای مثبت) و گاهی اوقات در خلاف جهت میدان الکتریکی (برای بارهای منفی) است.

نکته: با در نظر گرفتن علامت بار الکتریکی جابه‌جا شده، می‌توان رابطه‌ی دیگری برای کار انجام شده و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی به دست آورد:

$$W_{elec} = qE\,d\cos\alpha \qquad (۸-۸)$$

دقت داریم که در این رابطه، α زاویه‌ی بین میدان الکتریکی ($\vec{E}$) و جابه‌جایی ($\vec{d}$) است و باید علامت بار الکتریکی در نظر گرفته شود.

مثال ۳۲

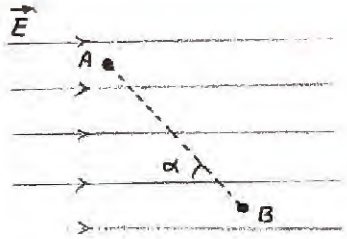


مطابق شکل، یک غبار که دارای بار الکتریکی $q = ۱\times۱۰^{-۱۵}\,C$ و جرم $m = ۱۰\,ng$ است، در میدان الکتریکی یکنواخت $۱/۲\times۱۰^{۵}\,\frac{N}{C}$ بین دو صفحه‌ی افقی قرار گرفته است. اگر غبار در ابتدا ساکن و به فاصله‌ی $۱\,cm$ از صفحه‌ی پایینی قرار داشته باشد، در چه مدتی به صفحه‌ی بالایی می‌رسد؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۳۳

مطابق شکل، در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $۱/۲\times۱۰^{۶}\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ بار الکتریکی $q=-۴\mu\mathrm{C}$ را از نقطه‌ی A به نقطه‌ی B منتقل می‌کنیم.



$AB=۲۰\mathrm{cm}\ ,\ \alpha=۳۷^{\circ}$

الف) کار انجام شده توسط میدان الکتریکی را بیابید.

ب) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی چه‌قدر است؟

مثال ۳۴

بار الکتریکی $q=-۲\mu\mathrm{C}$ را داخل یک میدان الکتریکی یکنواخت با بزرگی $۴\times۱۰^{۶}\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ رها می‌کنیم. در مدّتی که این بار $۱۰\mathrm{cm}$ داخل میدان جابه‌جا می‌شود، انرژی پتانسیل آن چند ژول تغییر می‌کند؟ این انرژی کاهش یافته است یا افزایش؟

نکته: تمامی دستگاه‌ها و سیستم‌های طبیعی، خودبه‌خود در جهتی حرکت می‌کنند که انرژی پتانسیل آن‌ها کاهش یابد. به مثال‌های زیر توجّه نمایید:

- آب رودخانه، خودبه‌خود سرازیر می‌شود، اجسام «خودبه‌خود» سقوط می‌کنند.
- فنر کشیده یا فشرده شده، «خودبه‌خود» به حالت عادی باز می‌گردد.

این مطلب در مورد بارهای الکتریکی نیز صادق است. یعنی:

- بار الکتریکی مثبت (+)، «خودبه‌خود» در جهت میدان الکتریکی حرکت می‌نماید.
- بار الکتریکی منفی (−) «خودبه‌خود» در خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت می‌کند.

بنابراین: هرگاه یک بار الکتریکی در جهتی حرکت نماید که خودش تمایل دارد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می‌یابد ($\Delta U<۰$). در این‌صورت کارِ میدان الکتریکی مثبت خواهد بود. ($W_{elec}>۰$)

نکته: برای تعیین کار انجام شده توسط *عامل خارجی*، می‌توان از قضیه‌ی کار − انرژی استفاده کرد:

$$W_{\Sigma F}=\Delta K\ \Rightarrow\ W_{elec}+W_{\text{عامل خارجی}}+W_{mg}+\cdots=\frac{۱}{۲}m\left(v_f^{۲}-v_i^{۲}\right)\qquad (۹-۸)$$

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

بنابراین اگر تنها نیروی وارد بر جسم، نیروی میدان الکتریکی و نیروی عامل خارجی باشد و همچنین بار الکتریکی مورد نظر با سرعت ثابت در میدان جابه‌جا شده باشد یا قبل و بعد از جابه‌جایی، ساکن باشد، می‌توان نوشت:

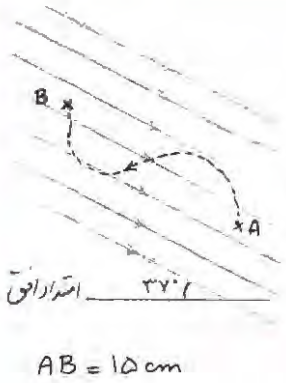
$$W_{elec} + W_{\text{عامل خارجی}} = 0 \Rightarrow W_{elec} = -W_{\text{خارجی}}$$

از سوی دیگر دیدیم $W_{elec} = -\Delta U$. بنابراین:

$$W_{\text{عامل خارجی}} = \Delta U$$

مثال ۳۵

ذره ی بارداری به جرم $6g$ و بار الکتریکی $-2\mu C$ را درون میدان الکتریکی یکنواختی به بزرگی $2\times10^{4}\ \frac{N}{C}$، روی مسیر نشان داده شده، از نقطه‌ی A به نقطه‌ی B منتقل می‌نماییم. اگر سرعت ذره در نقاط A و B به‌ترتیب $1\ \frac{m}{s}$ و $2\ \frac{m}{s}$ باشد، کار انجام شده توسط میدان الکتریکی و عامل خارجی را بدست آورید (از کار انجام شده توسط نیروی وزن صرف‌نظر نمایید.)



۸-۶. پتانسیل الکتریکی

در مثال‌های قبل، اگر بار الکتریکی دیگری را در نظر می‌گرفتیم، کار انجام شده توسط میدان الکتریکی و همچنین تغییر انرژی پتانسیل، مقداری متفاوت به‌دست می‌آمد. اما می توان مشاهده کرد که نسبت‌های $\frac{W}{q}$ و $\frac{\Delta U}{q}$ مستقل از بار جابجا شده در میدان الکتریکی هستند. به همین دلیل، این دو کمیّت را مورد توجّه قرار می‌دهیم و برای آنها کمیت جدیدی نام‌گذاری می‌نماییم.

بر طبق تعریف، اختلاف پتانسیل الکتریکی میان دو نقطه‌ی A و B عبارت‌است از تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یکای بار الکتریکی مثبت، وقتی یکای بار از نقطه‌ی اوّل تا نقطه‌ی دوّم جابه‌جا می‌شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \qquad (۸-۱۰)$$

یکای اختلاف پتانسیل - که کمیّتی اسکالر است - در SI، ژول بر کولن است که آن را بر طبق قرارداد، ولت (Volt) می‌نامند.

با توجه به روابط ۸-۸ و ۸-۱۰ می‌توان نتیجه گرفت برای میدان الکتریکی یکنواخت داریم:

$$\Delta V = -Ed\cos\alpha \qquad (۸-۱۱)$$

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

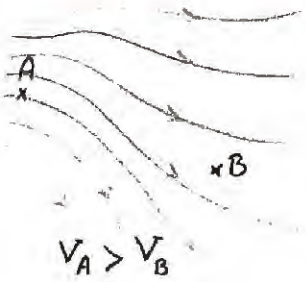
نکته: از رابطه‌ی بالا معلوم می‌شود که یکای میدان الکتریکی را می‌توان ولت بر متر ($\frac{\text{Volt}}{\text{m}}$) نیز در نظر گرفت و به راحتی می‌توان نشان داد یکای نیوتون بر کولن و ولت بر متر با یکدیگر معادل هستند. (چرا؟)

نکته: با دقت در رابطه‌ی ۸-۱۱ می‌توان نتیجه گرفت:

- عبارت $d\cos\alpha$ به معنی جابه‌جایی در راستای خطوط میدان الکتریکی است. اگر بزرگی این جابه‌جایی را با $d_{\parallel}$ نشان دهیم، می‌توان نوشت:

$$|\Delta V| = E\, d_{\parallel} \qquad (۸-۱۲)$$

- بدون توجه به علامت بار الکتریکی جابه‌جا شده، هرگاه در جهت خطوط میدان الکتریکی حرکت کنیم، پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد و $\Delta V < ۰$ است و هرگاه در خلاف جهت خطوط میدان الکتریکی حرکت کنیم، پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد و $\Delta V > ۰$ است.



- هرگاه عمود بر خطوط میدان الکتریکی حرکت نماییم، پتانسیل الکتریکی تغییر نمی‌کند و $\Delta V = ۰$ است.

مثال ۳۶

بار الکتریکی -۸pC را در یک میدان الکتریکی یکنواخت، با سرعت ثابت از نقطه‌ی A با پتانسیل ۱۰kV به نقطه‌ی B منتقل می‌کنیم. اگر کار نیروی ما (نیروی خارجی) در این جابه‌جایی ۱۲۰nJ باشد، مطلوب است،

الف) کار میدان الکتریکی در این جابه‌جایی.

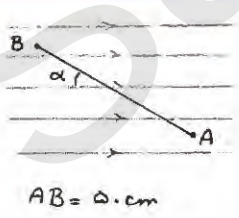
ب) اختلاف پتانسیل نقاط A و B ($V_B - V_A$)

ج) پتانسیل الکتریکی نقطه‌ی B.

مثال ۳۷

در میدان یکنواخت نشان داده شده در شکل، $V_A - V_B$ را تعیین نمایید.

$E = ۲\times۱۰^{۵}\ \frac{\text{Volt}}{\text{m}}$ و $\cos\alpha = ۰/۷$



sanatsharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatsharif.ir

مثال ۳۸

انرژی پتانسیل الکتریکی ذرّه‌ی بارداری در نقطه‌ی A از یک میدان الکتریکی $۲۰\mu C$ و بار ذرّه $-۲۰nC$ است. ذرّه را از نقطه‌ی A به نقطه‌ی B می‌رسانیم و در این‌جابه‌جایی $۸۰\mu J$ کار انجام می‌دهیم و در این مدّت انرژی جنبشی ذرّه $۱۲۰\mu J$ افزایش می‌یابد.

الف) انرژی پتانسیل ذره در نقطه‌ی B چند میکروژول است؟

ب) $V_B - V_A$ را بیابید.

مثال ۳۹

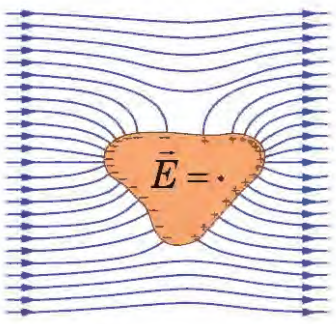
ذرّه‌ای با بار $۹nC$ و جرم $۲۰g$ در یک میدان الکتریکی، از نقطه‌ی A با پتانسیل $۲kV$، از حال سکون به نقطه‌ی B با پتانسیل $-۳۴kV$ می‌رسد. سرعت در نقطه‌ی B چه‌قدر است؟

۸-۷. توزیع و القای بار الکتریکی در اجسام رسانا

برخلاف اجسام نارسانا، هنگامی که به یک جسم رسانا، بار الکتریکی داده می‌شود، آن بار در محل داده شده به آن باقی نمی‌ماند و در سطح خارجی جسم رسانا توزیع می‌گردد.

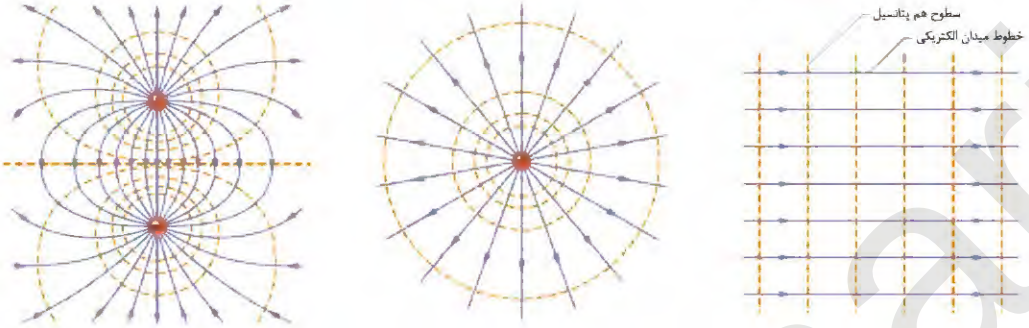
علاوه بر آن برا یرسانایی که در تعادل الکترواستاتیک قرار دارد، می‌توان نشان داد:

- میدان الکتریکی در داخل رسانا، همواره صفر است و این مطلب مستقل از آن است که جسم رسانا، دارای بار الکتریکی باشد، یا نباشد. همچنین توزیع بار و نحوه‌ی آن نیز تاثیری روی آن ندارد.
- اگر یک جسم رسانای بدون بار در میدان خارجی قرار گیرد، الکترون‌های آزاد رسانا طوری روی سطح خارجی آن توزیع می‌شوند که اثر خارجی را درون رسانا خنثی می‌کنند و میدان خالص درون رسانا صفر می‌شود. بنابراین درون یک رسانا، خطوی میدان الکتریکی وجود ندارد.



Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

- اگر روی سطح چنین رسانایی (رسانایی که در تعادل الکترواستاتیک قرار دارد) میدان الکتریکی وجود داشته باشد، این میدان باید بر سطح رسانا عمود باشد. یعنی خطوط میدان الکتریکی همواره بر سطح رسانا عمود است.
- تمام نقاط داخل و روی سطح رسانا، پتانسیل یکسانی دارند. بنابراین با جابه‌جا شدن روی این نقاط، کاری توسط میدان الکتریکی انجام نمی‌شود و انرژی پتانسیل الکتریکی ذره تغییر نمی‌کند. می‌توان سطوح هم‌پتانسیل را به صورت سطح‌های عمود بر خطوط میدان الکتریکی تعریف کرد. تمام نقاط روی این سطوح، پتانسیل یکسانی دارند.



نکته: از آنجا که بار الکتریکی اضافی داده شده به یک جسم رسانا، در سطح خارجی آن توزیع می‌گردد، می‌توان برای آن، چگالی سطحی بار الکتریکی را به‌صورت بار الکتریکی موجود در سطح جسم رسانا بخش بر مساحت سطح آن جسم تعریف کرد. اگر بار الکتریکی جسم برابر q و مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده است، برابر A باشد، چگالی سطحی را با نماد σ نشان می‌دهیم و در این‌صورت داریم:

$$\sigma = \frac{q}{A} \qquad (۱۳-۸)$$

اگر سطح مورد مطالعه، کره باشد، توزیع بار روی سطح آن یکنواخت است و در این‌صورت داریم:

$$\sigma = \frac{q}{۴\pi r^۲} \Rightarrow \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{q'}{q} \times \left(\frac{r}{r'}\right)^۲ \qquad (۱۴-۸)$$

مثال ۴۰

به یک کره‌ی رسانا با شعاع $۱۰\,cm$، بار الکتریکی $۲۵۱/۲\,nC$ داده شده است. $(\pi = ۳/۱۴)$

الف) چگالی سطحی بار روی کره چند نانو کولن بر سانتی‌متر مربع است؟

ب) هر سانتی‌متر مربع از این کره، چند الکترون کم دارد؟

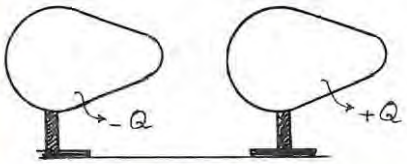
ج) چه تعداد الکترون به این جسم بدهیم تا چگالی سطحی آن، نصف شود؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

نکته: در جسم هایی که سطح خارجی متقارن ندارند، چگالی سطحی در همه جای سطح خارجی یکسان نیست. تجربه نشان می‌دهد که در مکان‌های برجسته و نوک تیز جسم رسانا، چگالی سطحی بار، از سایر مکان‌ها بیشتر است.

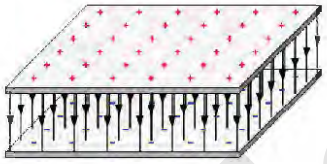
مثال ۴۱

در شکل مقابل، بار الکتریکی هر دو جسم رسانا با هم برابر است. خطوط میدان الکتریکی را در فضای بین دو بار، رسم نمایید.



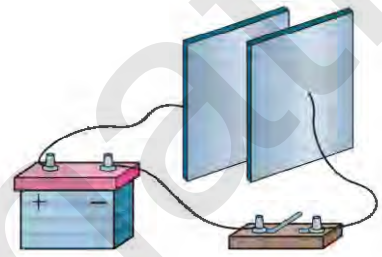
۸-۸. خازن

خازن، وسیله‌ای الکتریکی است که می‌تواند بار و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند. اگر دو صفحه‌ی رسانا دارای بارهای $+q$ و $-q$ باشند و به موازات هم قرار گیرند، میدان الکتریکی بین صفحات آن، یک میدان یکنواخت است. این مجموعه را یک خازن مسطح می‌نامند و معمولاً آن را با نماد ⊣‖⊢ نشان می‌دهند.



شارژ (باردار کردن) و دشارژ (تخلیه) خازن

برای باردار کردن خازن، صفحه‌های آن را با دو قطب یک باتری وصل می‌کنیم. باتری مانند یک پمپ، الکترون را از صفحه‌ی مثبت باتری می‌کَند و روی صفحه‌ای که به قطب منفی‌اش وصل است منتقل می‌نماید. این فرآیند، به آسانی و با سرعت زیاد شروع شده و به‌تدریج دشوارتر شده و کندتر صورت می‌پذیرد و نهایتاً متوقف می‌شود.

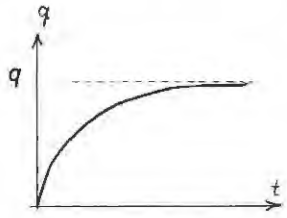


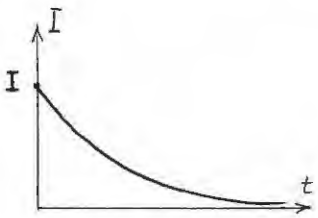
با توجه به اینکه صفحه‌های خازن رساناست، تمام نقاط هر صفحه پتانسیل یکسانی دارد و خطوط میدان الکتریکی، عمود بر این صفحه‌ها و جهت آن، از صفحه‌ی مثبت به سمت صفحه‌ی منفی است. وقتی یک خازن، بادار می‌شود، صفحه‌های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان و با علامت مخالف می‌شود: $+q$ و $-q$. ولی بار یک خازن را به صورت q نشان داده می‌دهند که همان بار صفحه‌ی مثبت است.

هرچه فرآیند پُرکردن خازن جلو می‌رود، بار صفحه‌های خازن بیش‌تر می‌شود. بنابراین کَندن الکترون از صفحه‌ی مثبت دشوارتر می‌گردد؛ زیرا این صفحه با جاذبه‌ی بیش‌تری الکترون را به طرف خودش می‌کشد. بنابراین باتری برای شارژ کردن خازن، انرژی مصرف می‌کند. بخشی از این انرژی در سیم‌های رابط و باتری به گرما تبدیل می‌شود و بقیه‌ی آن در خازن ذخیره می‌گردد.

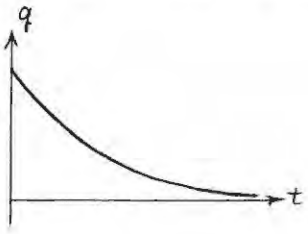
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

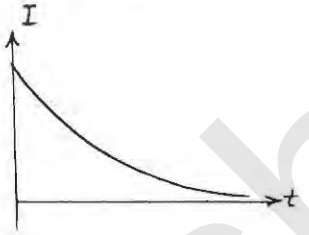
نکته: با توجّه به توضیح بالا می‌توان نتیجه گرفت نمودار تغییرات جریان الکتریکی عبوری از مدار، مطابق شکل مقابل است. این نمودار نشان می‌دهد که در زمان بسیار کوتاهی، قبل از شارژ خازن (زمانی در حدود ns، که از آن به لحظه‌ی شارژ تعبیر می‌شود) جریان از خازن عبور می‌کند. اما پس از آن که این زمان سپری شد، جریانی نخواهیم داشت. بنابراین، پس از شارژ خازن، جریانی از خازن نمی‌گذرد.





شرایط و شارژ یا تخلیه‌ی خازن نیز کاملا مشابه به حالت شارژ است در لحظات اولیه و شارژ، بارهای الکتریکی با سرعت زیادی در مدار جریان می‌یابند و به تدریج که باروری صفحات کاهش می‌یابد، جریان الکتریکی نیز ضعیف‌تر می‌شود و در نهایت وقتی تمام باروری صفحات خنثی شود، جریان کاملا قطع می‌گردد.





ظرفیت خازن

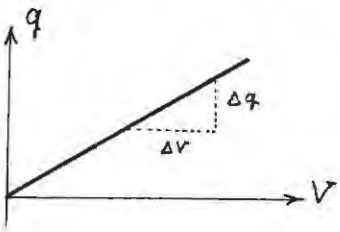
هرچه اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های باتری (ΔV) بیشتر باشد، بار ذخیره شده در خازن بیشتر (q) می‌شود. اما تجربه نشان می‌دهد که نسبت $\frac{q}{\Delta V}$، برای یک خازن، در آزمایش‌های مختلف، ثابت می‌ماند. این نسبت را ظرفیت خازن می‌نامیم و آن را با C نمایش می‌دهیم. به دلایل تاریخی، قدر مطلق اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی خازن را با V نمایش می‌دهند! بنابراین می‌توان نوشت:

$$C=\frac{q}{V} \qquad (۱۵-۸)$$

در این رابطه، V اختلاف پتانسیل دو سر خازن و q بار روی صفحه‌ی مثبت است. یکای ظرفیت خازن نیز در SI، فاراد (F) است. بنابراین یک فاراد، معادل یک کولن بر ولت است.

نکته: ظرفیت خازن، به بار روی صفحات (q) و اختلاف پتانسیل دو سر خازن (V) بستگی ندارد. بنابراین اگر مثلاً اختلاف پتانسیل دو سر خازن را دو برابر کنیم، ظرفیت خازن تغییر نمی‌کند و فقط بار الکتریکی صفحات دو برابر می‌شود.

نکته: نمودار تغییرات q بر حسب V برای یک خازن، مطابق شکل مقابل است. شیب این خط نیز بیان کننده‌ی ظرفیت خازن خواهد بود.



$$C=\frac{\Delta q}{\Delta V} \qquad (۱۶-۸)$$

sanatsharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی

مثال ۴۲

اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی دو خازن را از ۲۸ ولت به ۴۰ ولت افزایش می‌دهیم. اگر با این کار، $15\mu C$ بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

عوامل موثر بر ظرفیت خازن

ظرفیت یک خازن تخت، از مشخصات ساختمانی خازن است و به عوامل زیر بستگی دارد:

- مساحت سطح مشترک صفحه‌های خازن (A).
- فاصله‌ی میان صفحات (d)
- جنس ماده‌ی دی الکتریک (عایق) میان صفحات (κ)

بنابراین می‌توان نوشت:

$$C = \kappa\varepsilon_{\circ}\frac{A}{d} \qquad (\kappa \geq 1) \qquad (۱۷-۸)$$

مثال ۴۳

ظرفیت یک خازن با صفحات موازی دی الکتریک هوا، $2\mu F$ است. اگر فاصله‌ی صفحات را ۳ برابر و میان دو صفحه کائوچو قرار دهیم، ظرفیت خازن $8\mu F$ می‌شود. ثابت دی‌الکتریک کائوچو را بیابید.

نکته: هنگامی که یک خازن به باطری به اختلاف پتانسیل ثابت متّصل است، هر تغییری در ساختمان فیزیکی خازن ایجاد نماییم، ولتاژ دو سر خازن تغییر نخواهد کرد و این تغییرات صرفاً باعث ایجاد تغییر در بار الکتریکی خازن می‌شود.

نکته: هنگامی‌که یک خازن شارژ شده، به اختلاف پتانسیل ثابتی متّصل نباشد و از باتری جدا باشد، هر تغییری در ساختمان آن ایجاد نماییم، بار روی صفحات آن تغییر نمی‌کند و این تغییرات باعث ایجاد تغییر در ولتاژ خازن می‌شود.

مثال ۴۴

خازن مسطحی که دی‌الکتریک آن هوا است را توسط باتری شارژ می‌نماییم و در همین حالت، فاصله‌ی میان صفحات را نصف کرده و بین آنها دی الکتریکی با ثابت $\kappa = 4$ قرار می‌دهیم. هرکدام از کمیت‌های ظرفیت، بار الکتریکی و اختلاف پتانسیل دو سر خازن، چند برابر شده‌اند؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۴۵

مثال قبل را بر فرض آن‌که خازن را پس از شارژ شدن، از باتری جدا کرده باشیم، مجدداً حل نمایید.

مثال ۴۶

در مثال‌های ۴۵ و ۴۴، میدان الکتریکی بین صفحات چند برابر می‌شود؟

نکته: حضور دی‌الکتریک بین صفحات خازن دو تاثیر در خازن ایجاد می‌کند:

- **افزایش ظرفیت خازن:** در این حالت، دوقطبی‌های الکتریکی با ایجاد یک میدان الکتریکی در خلاف جهت میدان الکتریکی اولیه‌ی خازن باعث تضعیف میدان بین صفحات خازن می‌شوند ($E < E_0$). این کاهش میدان سبب کاهش اختلاف پتانسیل میان صفحات و در نتیجه افزایش ظرفیت خازن خواهد شد.

- **افزایش حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن:** برای هر دی‌الکتریک، بیشینه‌ی میدان و در نتیجه اختلاف پتانسیلی وجود دارد که از آن به بعد، دی الکتریک اصطلاحاً دستخوش فروریزش الکتریکی می‌شود. مقدار بیشینه‌ی میدان الکتریکی‌ای که دی‌الکتریک می‌تواند بدون فروریزش تحمل کند را قدرت (استقامت) دی-الکتریک می‌نامند. معمولاً قدرت دی‌الکتریک مواد بر حسب ($\frac{kV}{mm}$) بیان می‌شود.

به لحاظ میکروسکوپی، فروریزش الکتریکی ناشی از کنده شدن الکترون‌های اتم‌های ماده‌ی

برخی از ویژگی‌های دی‌الکتریک‌ها در دمای ۲۰°C

ماده‌ی دی‌الکتریک	ثابت دی‌الکتریک	قدرت دی‌الکتریک (kV/mm)
هوای 1atm	۱/۰۰۰۶	۳
تفلون	۲/۱	۶۰
پارافین	۲/۲	۱۰
پلی‌استیرن	۲/۶	۲۴
میلار	۳/۱	۲۸۰
PVC(پلی وینیل کلراید)	۳/۴	۲۹
کاغذ	۳/۵	۱۶
کوارتز	۴/۳	۸
شیشه پیرکس	۵	۱۴
میکا	۷	۱۵۰
آب	۸۰	۶۵
تیتانیم استرانسیوم	۳۱۰	۸

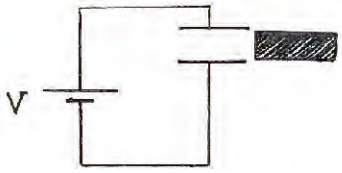
Sanatsharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatsharif.ir

مثال ۴۹

ظرفیت خازنی $۱۲\mu F$ و بار آن $q_۱$ است. بار خازن را $۳mC$ زیاد می‌کنیم. انرژی خازن $۸J$ زیاد می‌شود. $q_۱$ را بیابید.

مثال ۵۰

مطابق شکل، یک خازن ۴ میکرو فارادی به اختلاف پتانسیل ثابت $۱۰۰۰Volt$ متّصل است. برای آن که دی‌الکتریکی با ثابت $\kappa = ۴$ را وارد این خازن نماییم، چند ژول باید کار انجام دهیم؟



مثال ۵۱

برای خارج کردن دی‌الکتریکی از درون خازنی به ظرفیت $۷/۵\mu F$ که توسط یک باتری ۲۰۰ ولتی شارژ و از آن جدا شده است، $۲۲۵mJ$ کار انجام شده است، ثابت دی‌الکتریک را تعیین کنید.

نکته: انرژی پتانسیلی که باتری فراهم می‌آورد، از رابطه‌ی $U_{\text{باتری}} = qV$ به دست می‌آید اما انرژی پتانسیل ذخیره شده در خازن $U_{\text{خازن}} = \frac{۱}{۲}qV$ است. به عبارت دیگر، نصف انرژی فراهم شده توسط باتری، در خازن ذخیره می‌شود و نیمی دیگر از آن در سیم‌های رابط و ... تلف می‌شود.

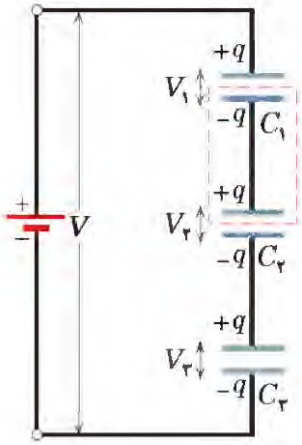
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

به هم بستن خازن‌ها در مدار

در مدارهای الکتریکی، گاهی اوقات لازم است یک خازن جایگزین چند خازن شود. به این خازن، **خازن معادل** و به ظرفیت آن **ظرفیت معادل** (C_{eq}) می‌گویند. ظرفیت معادل چند خازن، ظرفیت خازنی است که اگر به جای آن خازن ها در مدار قرار گیرد و به همان ولتاژی که به دو سر مجموعه‌ی خازن ها وصل است، متّصل شود، انرژی الکتریکی ذخیره شده در آن، برابر انرژی باشد که در مجموعه‌ی خازن‌ها ذخیره شده است. به عبارت دیگر، انرژی ذخیره شده در خازن معادل، برابر مجموع انرژی تک‌تک خازن‌ها است:

$$U_T = U_1 + U_2 + U_3 + \cdots \qquad (۲۰-۸)$$

۱. اتصال متوالی (سری)



در شکل مقابل، خازن‌ها به صورت متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. توجه شود که در اتصال متوالی، خازن‌ها یکی پس از دیگری بسته شده‌اند و هیچ انشعابی (اعم از اتصال خازنی، سیم رابط یا نقاط ورودی و خروجی مدار) بین آنها وجود ندارد.

باتری سبب می‌شود که تعدادی الکترون به صفحه‌ی پایینی خازن C_3 منتقل شود و در این‌صورت همین مقدار بار منفی از صفحه‌ی بالایی خازن C_1 به باتری منتقل می‌گردد. اندازه‌ی این دو بار هم با هم برابر است.

بقیه‌ی صفحه‌های میانی نیز به روش القاء، دارای بار الکتریکی می‌شوند. یعنی در به هم بستن متوالی خازن‌ها، **بار ذخیره شده روی تمامی خازن با هم برابر** خواهد شد:

$$q_T = q_1 = q_2 = q_3 \qquad (۲۱-۸)$$

از سوی دیگر با توجّه به تعریف اختلاف پتانسیل میان دو نقطه می‌توان نتیجه گرفت:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 \qquad (۲۲-۸)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 = q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)$$

و در نتیجه ظرفیت معادل خازن‌ها چنین می‌شود:

$$C_{eq} = \frac{q_T}{V_T} = \frac{q}{q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \qquad (۲۳-۸)$$

با استدلال مشابه می‌توان آن‌چه گفته شد را به بیش از سه خازن نیز تعمیم داد.

نکته: در اتصال متوالی خازن‌ها، ظرفیّت معادل از ظرفیّت تک‌تک خازن‌ها کوچک‌تر است.

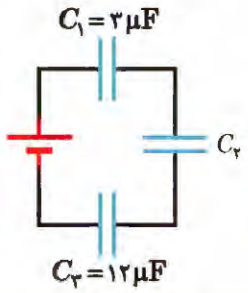
نکته: در حالتی که چند خازن به یکدیگر به‌صورت متوالی متّصل شده باشند، می‌توان رابطه‌ی زیر را بین انرژی ذخیره شده در خازن‌ها به کاربرد:

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

$$C_{eq}U_T = C_1U_1 = C_2U_2 = C_3U_3 = \cdots \qquad (۲۴-۸)$$

مثال ۵۲

در مدار شکل مقابل، اگر انرژی ذخیره شده در خازن شماره‌ی ۱، $8\,\mu J$ و انرژی ذخیره شده در کل خازن‌ها برابر $14\,\mu J$ باشد، ظرفیت خازن شماره ۲ (C_2) را تعیین کنید.



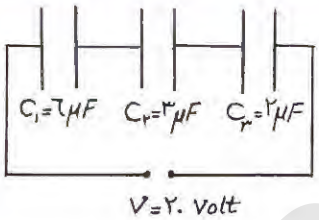
نکته: برای حالتی که دو خازن به یکدیگر به‌صورت متوالی متّصل شده باشند، رابطه‌های طلایی زیر را به خاطر بسپارید:

$$C_T = \frac{C_1.C_2}{C_1 + C_2} \quad ; \quad V_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2}V_T \qquad (۲۵-۸)$$

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2}U_T \qquad (۲۶-۸)$$

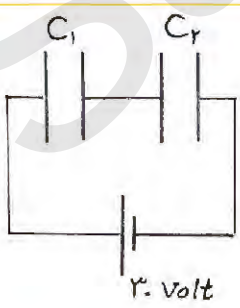
مثال ۵۳

در مدار شکل مقابل، ظرفیّت معادل و اختلاف پتانسیل دو سر هر کدام از خازن‌ها و انرژی ذخیره شده در هر خازن را به‌دست آورید.



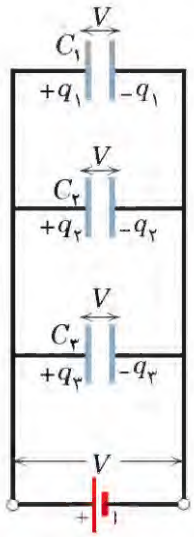
مثال ۵۴

در مدار نشان داده شده در شکل $q_1 = 60\,pC$ و $U_2 = 300\,pJ$ است. ظرفیّت هر خازن را تعیین کنید.



Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

۲. اتصال موازی



در شکل مقابل، خازن‌ها به‌صورت موازی به یکدیگر متّصل شده‌اند. شرط اتصال موازی خازن‌ها این است که صفحات خازن‌ها از هر دو سمت به یک نقطه متصل شده باشد. در این حالت هر کدام از خازن‌ها به اختلاف پتانسیل V_T متّصل شده‌اند و لذا ولتاژ تمامی آن‌ها با یکدیگر برابر است و داریم:

$$V_T = V_۱ = V_۲ = V_۳ \qquad (۲۷\text{-}۸)$$

بار ذخیره شده در مجموع خازن ها نیز برابر بار ذخیره شده در خازن معادل خواهد بود و می‌توانیم بنویسیم:

$$q_T = q_۱ + q_۲ + q_۳ \qquad (۲۸\text{-}۸)$$

و با توجّه به رابطه‌ی $q = CV$ برای هر کدام از خازن‌ها خواهیم داشت:

$$q_T = q_۱ + q_۲ + q_۳ = C_۱V_۱ + C_۲V_۲ + C_۳V_۳ = (C_۱ + C_۲ + C_۳)V$$

و در نتیجه ظرفیت معادل چنین تعیین می‌شود:

$$C_{eq} = \frac{q_T}{V_T} = \frac{(C_۱ + C_۲ + C_۳)V}{V}$$

$$C_{eq} = C_۱ + C_۲ + C_۳ \qquad (۲۸\text{-}۸)$$

با استدلال مشابه می‌توان آن‌چه گفته شد را به بیش از سه خازن نیز تعمیم داد.

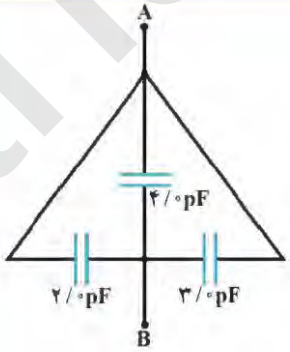
نکته: در اتصال متوالی خازن‌ها، ظرفیّت معادل از ظرفیّت تک‌تک خازن‌ها بزرگ‌تر است.

نکته: در حالتی که چند خازن به یکدیگر به‌صورت متوالی متّصل شده باشند، می‌توان رابطه‌ی زیر را بین انرژی ذخیره شده در خازن‌ها به کاربرد:

$$\frac{U_T}{C_{eq}} = \frac{U_۱}{C_۱} = \frac{U_۲}{C_۲} = \frac{U_۳}{C_۳} = \cdots \qquad (۲۹\text{-}۸)$$

مثال ۵۵

در مدار نشان داده شده در شکل مقابل، اگر انرژی ذخیره شده در خازن با ظرفیت $C_۱ = ۴/۰\,\text{pF}$ برابر $U_۲ = ۲۰۰\,\text{pJ}$ است. انرژی ذخیره شده در کل مجموعه و اختلاف پتانسیل میان نقاط A و B را تعیین کنید.



نکته: برای حالتی که دو خازن به صورت موازی به یکدیگر متّصل شده‌اند، رابطه‌های زیر برقرار است:

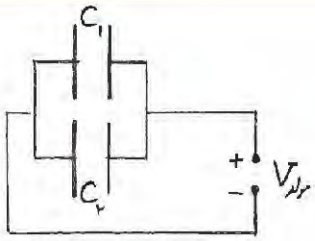
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

$$q_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} q_T \qquad (۳۰-۸)$$

$$U_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_T \qquad (۳۱-۸)$$

مثال ۵۶

در مدار نشان داده شده در شکل، $U_T = ۴۰\text{pJ}$، $U_2 = ۸\text{pJ}$ و $q_1 = ۱۶\text{pC}$ است. C_1، C_2 و V را بیابید.



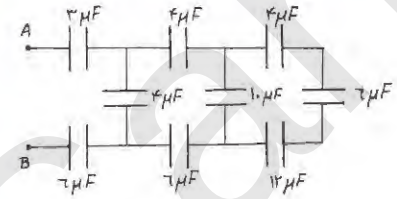
۳. اتصال سری ـ موازی:

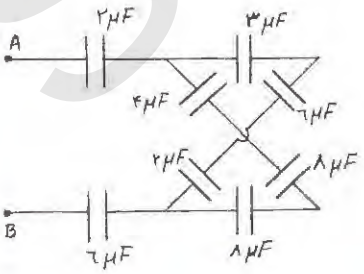
روابطی که در حل مدارهای خازنی سری ـ موازی استفاده می‌شوند، همان روابطی است که در بستن خازن‌ها به صورت سری یا موازی به آن‌ها اشاره شد. در این‌جا فقط به تاکید بر دو نکته بسنده می‌نماییم:

- زمانی می‌توان چند خازن را بایکدیگر متوالی دانست که خازن‌ها پشت سر هم متّصل شده باشند و بین آنها هیچ اتصال دیگری وجود نداشته باشد.
- زمانی می‌توان دو یا چند خازن را موازی دانست که دو سر آنها مستقیماً یا از طریق سیم‌های رسانا به یکدیگر متّصل شده باشد.

مثال ۵۷

در هر کدام از حالت‌های زیر، ظرفیت معادل مجموعه را به‌دست آورید.

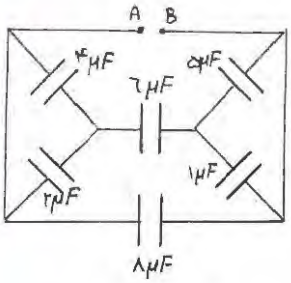


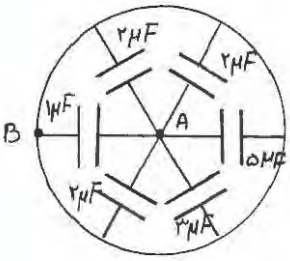


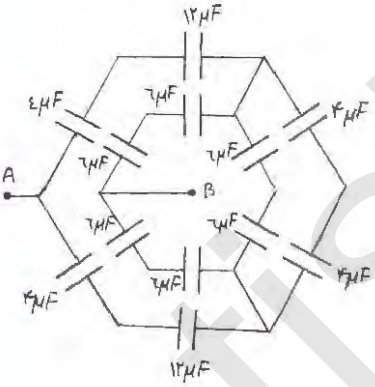
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۵۸

در هر کدام از حالت‌های زیر، ظرفیت معادل مجموعه را به‌دست آورید.



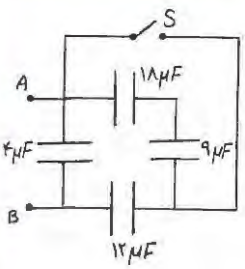




نکته: هرگاه دو سر یک خازن یا مجموعه‌ای از خازن‌ها به کمک یک سیم رسانا به هم متّصل شده باشند، می‌گوییم خازن مورد نظر اصطلاحاً اتصال کوتاه شده است. در اینصورت خازن یا خازن‌های مورد نظر از مدار حذف می‌شوند؛ زیرا هیچ باری روی آنها ذخیره نخواهد شد.

مثال ۵۹

در مدار نشان داده شده در شکل، اگر کلید S بسته شود، ظرفیت معادل مدار چند برابر می‌شود؟

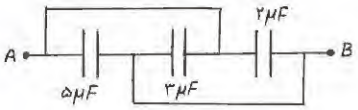


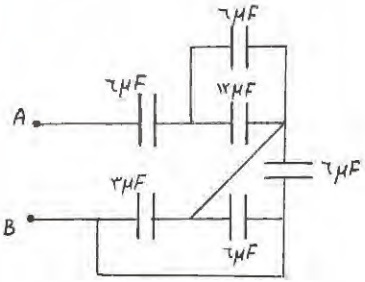
Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

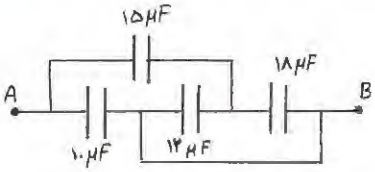
نکته: اگر نقاطی از مدار به کمک سیم‌های رسانا به یکدیگر متّصل شده باشند، ممکن است در ابتدا نتوان نحوه‌ی اتصال خازن‌ها را به سادگی تشخیص داد. در اینصورت بهتر است مداری معادل مدار رسم شده رسم کنیم و سپس مدار جدید را ساده سازی کنیم! در این روش نقاط هم‌پتانسیل را یک نقطه در نظر می‌گیریم!

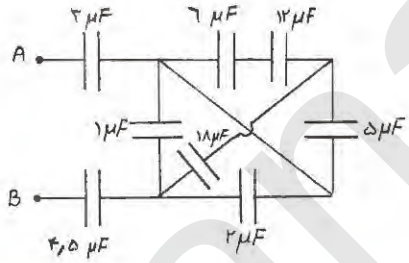
مثال ۶۰

در هر کدام از حالت‌های زیر، ظرفیت معادل مدار را تعیین کنید.

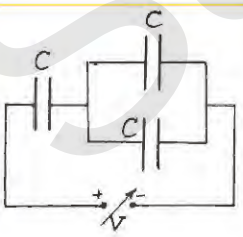








مثال ۶۱

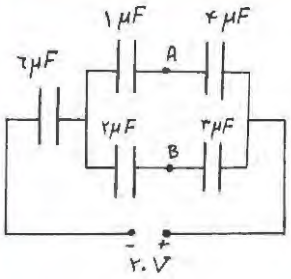


در مدار مقابل هر یک از خازن‌ها حداکثر $12\mu J$ انرژی می‌توانند در خود انباشته کنند تا فرو شکسته نشوند. حداکثر انرژی که می‌توان در مجموعه‌ی سه خازن ذخیره کرد تا همگی سالم بمانند چند میکروژول است؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

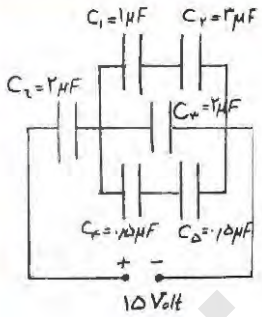
مثال ۶۲

در شکل مقابل، اختلاف پتانسیل نقاط A و B چند ولت است؟



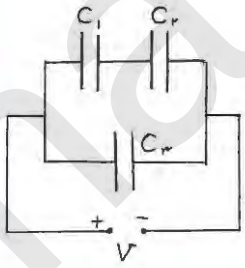
مثال ۶۳

در مدار شکل مقابل، انرژی ذخیره شده در خازن C_3 چند میکروژول است؟



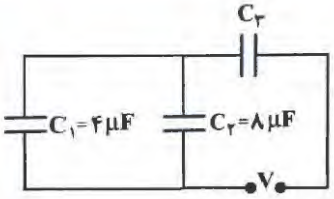
مثال ۶۴

در شکل مقابل، یک دی‌الکتریک بین صفحات خازن C_1 وارد می‌کنیم. بار الکتریکی هر کدام از خازن‌ها چگونه تغییر می‌کند؟



مثال ۶۵

در مدار شکل مقابل، اگر انرژی ذخیره شده در خازن C_1، $\frac{2}{3}$ انرژی ذخیره شده در خازن C_3 باشد، ظرفیت خازن چند میکروفاراد است؟



Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

نکته: فرض کنید خازن C_1 را با اختلاف پتانسیل وخازن V_1 و خازن C_2 را با اختلاف پتانسیل V_2 شارژ کرده و آن‌ها را از باتری‌ها جدا کرده‌ایم. در این صورت بار این خازن‌ها به ترتیب $q_1 = C_1V_1$ و $q_2 = C_2V_2$ خواهد شد. اکنون...

- اگر صفحات هم نام این دو خازن را به هم متّصل کنیم. بار الکتریکی بین صفحات مبادله خواهد شد، به گونه‌ای که در نهایت اختلاف پتانسیل دو خازن با هم برابر شود و داریم:

$$V_T = \frac{C_1V_1 + C_2V_2}{C_1 + C_2} \quad ; \quad q'_1 = C_1V_T \quad ; \quad q'_2 = C_2V_T \qquad (۳۲-۸)$$

- اگر صفحات نا هم نام این دو خازن را به هم متّصل کنیم، بار الکتریکی بین صفحات مبادله خواهد شد و پس از آن‌که اختلاف پتانسیل دو خازن با هم برابر شود و داریم:

$$V_T = \frac{|C_1V_1 - C_2V_2|}{C_1 + C_2} \quad ; \quad q'_1 = C_1V_T \quad ; \quad q'_2 = C_2V_T \qquad (۳۲-۸)$$

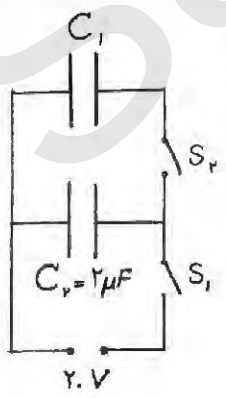
مثال ۶۶

خازنی به ظرفیت $C_1 = 5\mu F$ با اختلاف پتانسیل $1200 Volt$ و خازنی به ظرفیت $C_2 = 10\mu F$ با اختلاف پتانسیل ۷۵۰ ولت پر شده اند. اگر این خازن‌های پر را از مدار اصلی آنها جدا کرده و صفحات هم نام آن‌ها را به هم وصل کنیم، اختلاف پتانسیل بین دو صفحه و بار ذخیره شده در هر خازن را تعیین کنید.

مثال ۶۷

در مثال قبل، انرژی خازن‌ها را قبل و بید از اتصال به هم تعیین کنید و آنها را با هم مقایسه کنید.

مثال ۶۸

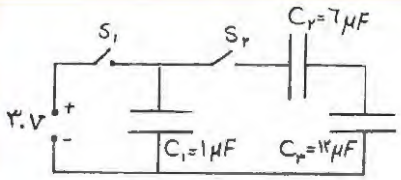


در شکل مقابل ابتدا کلید S_1 را می‌بندیم و سپس آن را باز نموده و کلید S_2 را می‌بندیم. در این حالت خازن C_2، $24\mu C$ بار از دست می‌دهد و به تعادل می‌رسد. C_1 چند میکرو فاراد است؟

Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

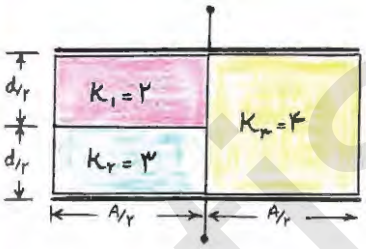
مثال ۶۹

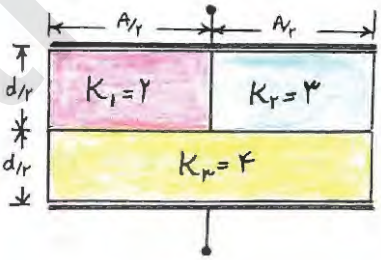
در مدار نشان داده شده در شکل، خازن‌ها خالی و کلیدها باز هستند. کلید S_1 را می‌بندیم و سپس آن را باز می‌کنیم و کلید S_2 را می‌بندیم. پس از برقراری تعادل، بار و انرژی هر خازن را بیابید.



مثال ۷۰

فضای میان صفحه‌های خازن تخت در هر یک از شکل‌های زیر با بیش از یک دی‌الکتریک پر شده است. در هر حالت، ظرفیت خازن را بر حسب A و d و ε_0 به‌دست آورید.

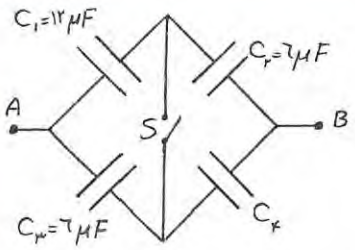




Sanatisharif.ir
مجری طرح توسعه عدالت آموزشی
www.sanatisharif.ir

مثال ۷۱

در مدار نشان داده شده در شکل، باز و بسته کردن کلید S، ظرفیت معادل بین نقاط A و B را تغییر نمی‌دهد. C_4 را بیابید.



Sanatisharif.ir

مجری طرح توسعه عدالت آموزشی