

زمین است، بار مثبت القا می‌کند. بار مثبت توسط این شانه روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می‌شود. این بارهای مثبت، توسط تسمه که عایق است به کمک شانه فلزی دیگری که به کلاهک متصل است به سطح خارجی کلاهک منتقل می‌شود. 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.

۲-۹- خازن

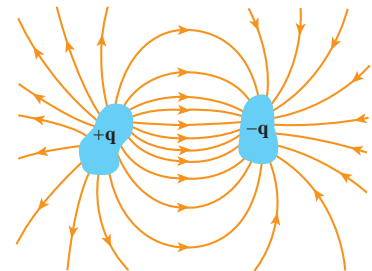
خازن وسیله‌ای الکتریکی است که می‌تواند بار الکتریکی و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند. مثلاً باتری‌های یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در خازن فلاش دوربین ذخیره می‌کنند (شکل ۲-۲). توجه کنید باتری‌ها می‌توانند انرژی را فقط با آهنگ نسبتاً کمی به مدار بدهند که این برای گسیل جرقه نور از فلاش دوربین بسیار کم است، اما وقتی خازن باردار می‌شود، می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار بیشتری برای فلاش زدن آماده کند. شکل ۲-۲۱ چند خازن را در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۲-۲۲ اجزای اصلی هر خازن را نشان می‌دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. بی‌توجه به شکل آنها و اینکه آیا تخت هستند یا نه، این رساناها را **صفحه خازن** می‌نامیم. شکل ۲-۲۳ آرایش خازنی موسوم به **خازن تخت**^۱ را نشان می‌دهد که شامل دو صفحه رسانای موازی با مساحت A است که به فاصله d (که در برابر ابعاد صفحه‌ها ناچیز است) از هم قرار گرفته‌اند. گرچه نمادی که برای نشان دادن یک خازن به کار می‌بریم $\left(\begin{smallmatrix} | & | \\ + & - \end{smallmatrix} \right)$ مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن‌ها با هر شکلی استفاده می‌شود. خازن‌ها به‌طور گسترده‌ای در مدارهای الکترونیکی و سابلای مانند رادیو، تلویزیون، رایانه و... به کار می‌روند؛ مثلاً شکل ۲-۲۴ مدار یک تقویت‌کننده (آمپلی‌فایر) را نشان می‌دهد که در آن چندین خازن به کار رفته است. برخی از این خازن‌ها با پیکان‌هایی مشخص شده‌اند.



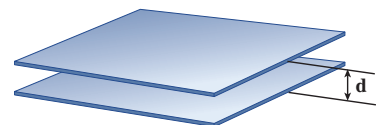
شکل ۲-۲۰ انرژی فلاش دوربین در یک خازن ذخیره شده است.



شکل ۲-۲۱ تصویری از چند خازن مختلف



شکل ۲-۲۲ دو رسانا که به‌طور الکتریکی از یکدیگر و محیط اطراف خود منزوی شده‌اند، تشکیل یک خازن را می‌دهند.

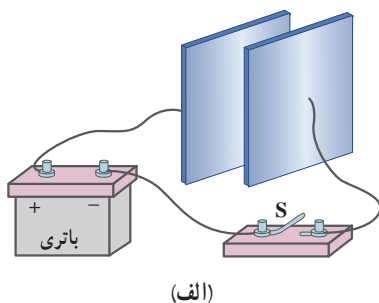


شکل ۲-۲۳ یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت A ساخته شده است که به فاصله d از هم قرار گرفته‌اند.

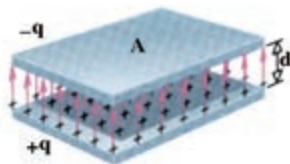


شکل ۲-۲۴ مدار یک تقویت‌کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن‌ها با پیکان مشخص شده‌اند.

۱- parallel - plate capacitor



(الف)



(ب)

شکل ۲-۲۵ الف برای باردار کردن خازن، آن را به باتری وصل کرده ایم. (ب) هر صفحه این خازن بارهایی با علامت مخالف قرار دارد و میدان الکتریکی عمود بر صفحه‌ها و از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است.

باردار (شارژ) کردن خازن: روش ساده و مرسوم برای باردار کردن خازن قرار دادن آن در مدار الکتریکی ساده‌ای است که دارای یک باتری است (شکل ۲-۲۵ الف). وقتی کلید S بسته شود بار از طریق سیم رسانا جریان می‌یابد. این بار همان الکترون‌هایی هستند که توسط میدان الکتریکی ای که باتری در سیم‌ها ایجاد می‌کند در طول سیم‌ها به حرکت واداشته می‌شوند. میدان الکتریکی، الکترون‌ها را از صفحه متصل به پایانه مثبت باتری به حرکت در می‌آورد. در نتیجه، این صفحه با از دست دادن الکترون دارای بار مثبت می‌شود. این میدان، درست همین تعداد الکترون را از پایانه منفی باتری به صفحه‌ای می‌راند که از طریق کلید به پایانه منفی باتری متصل است. در نتیجه، این صفحه با به دست آوردن الکترون دارای بار منفی می‌شود که درست به همان اندازه‌ای است که صفحه دیگر با از دست دادن الکترون دارای بار مثبت شده است. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحه خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانه باتری یکسان شود. با توجه به اینکه صفحه‌های خازن رساناست تمام نقاط هر صفحه پتانسیل یکسانی دارد و خطوط میدان الکتریکی عمود بر این صفحه‌ها و از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است (شکل ۲-۲۵ ب). وقتی یک خازن باردار می‌شود، صفحه‌های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی علامت مخالف می‌شود: $+q$ و $-q$. ولی بار یک خازن را به صورت q نشان می‌دهند که همان بار صفحه مثبت است.

۱۰-۲ ظرفیت خازن

اگر اختلاف پتانسیل بین صفحه‌های خازن (ΔV) را زیاد کنیم، بار خازن (q) نیز به همان نسبت زیاد می‌شود. به عبارتی نسبت $\frac{q}{\Delta V}$ همواره مقداری ثابت است. به این نسبت که به اندازه بار خازن و نیز اختلاف پتانسیل دو صفحه آن بستگی ندارد **ظرفیت خازن** می‌گویند و آن را با C نشان می‌دهند. بنا به دلایل تاریخی قدرمطلق اختلاف پتانسیل ΔV بین دو صفحه خازن را با V نمایش می‌دهند. بنابراین:

$$C = \frac{q}{V} \quad (۱۴-۲)$$

در رابطه ۱۴-۲ یکای بار الکتریکی، کولن (C)، یکای اختلاف پتانسیل، ولت (V) و بنابراین یکای ظرفیت، کولن بر ولت (C/V) است که به پاس خدمات مایکل فارادی، **فاراد** (F) نامیده شده است. **فاراد** یکای بسیار بزرگی است و عملاً ظرفیت اکثر خازن‌های متداول در محدوده پیکوفاراد ($10^{-12}F$) تا میلی‌فاراد ($10^{-3}F$) است. گرچه امروزه فناوری ساخت خازن‌ها، دستیابی به ظرفیت‌هایی بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

مثال ۲-۱۵

صفحه‌های خازنی را به پایانه‌های مولدی با اختلاف پتانسیل $240V$ وصل می‌کنیم. اگر بار خازن $120\mu C$ شود (الف) ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

(ب) اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل $360V$ وصل کنیم، بار الکتریکی آن چقدر می‌شود؟

پاسخ:

الف) با استفاده از رابطه ۱۴-۲ داریم:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{1/2 \times 10^{-4} \text{ C}}{24/10 \text{ V}} = 5/10 \times 10^{-6} \text{ F} = 5/10 \mu\text{F}$$

ب) با توجه به اینکه ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است از ظرفیت به دست آمده در قسمت الف استفاده می کنیم.

آنگاه با استفاده از رابطه ۱۴-۲ می توان نوشت:

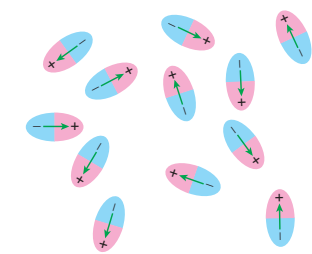
$$q = CV = (5/10 \times 10^{-6} \text{ F})(24/10 \text{ V}) = 18/10 \times 10^{-6} \text{ C} = 18/10 \mu\text{C}$$

۱۱-۲- خازن با دی الکتریک

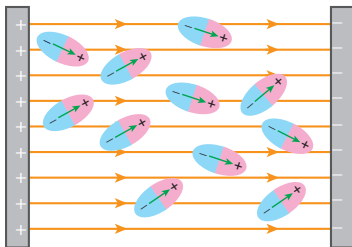
اگر فضای میان صفحه های یک خازن را با ماده ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن **دی الکتریک** گفته می شود پُر کنیم برای ظرفیت خازن چه پیش می آید؟ **مایکل فارادی** نخستین بار در سال ۱۸۳۷ میلادی، با استفاده از وسایل ساده ای دریافت که ظرفیت خازن با ضریبی موسوم به ثابت دی الکتریک ماده عایق (که آن را با κ نشان می دهند) افزایش می یابد؛ یعنی اگر ظرفیت خازن بدون دی الکتریک را با C_0 نمایش دهیم آنگاه ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر با $C = \kappa C_0$ می شود. جدول ۱-۲ ثابت دی الکتریک چند ماده عایق را نشان می دهد.

جدول ۱-۲- برخی از ویژگی های دی الکتریک ها در دمای 20°C

ماده دی الکتریک	ثابت دی الکتریک	قدرت دی الکتریک (kV/mm)
هوای ۱ atm	۱/۰۰۰۶	۳
تفلون	۲/۱	۶۰
پارافین	۲/۲	۱۰
پلی استیرن	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
تیتانید استرانسیوم	۳۱۰	۸



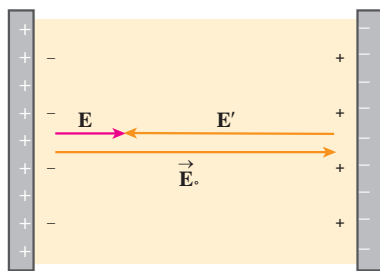
الف) در نبود میدان الکتریکی، سمتگیری مولکول‌های دوقطبی نامنظم است.



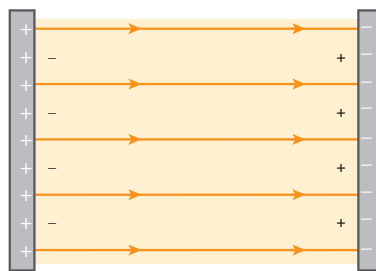
ب) در حضور میدان الکتریکی، مولکول‌های دوقطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی خارجی هم‌دیف کنند.

شکل ۲-۲۷

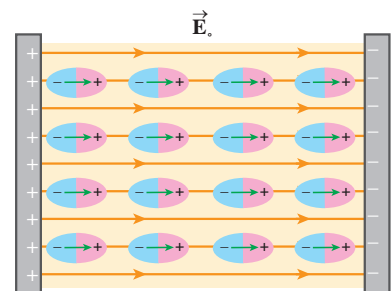
حال پرسش این است که دی‌الکتریک چگونه ظرفیت خازن را افزایش می‌دهد؟ به این منظور فرض کنید خازنی را نخست توسط یک باتری باردار و سپس از باتری جدا کرده‌ایم. اکنون فضای داخل این خازن را با یک دی‌الکتریک پر می‌کنیم. توجه کنید که دی‌الکتریک‌ها بر دو نوع‌اند: قطبی و غیرقطبی. وقتی یک دی‌الکتریک قطبی (مانند آب، HCl ، NH_3) در میدان الکتریکی بین دو صفحه خازن قرار می‌گیرد، سر منفی مولکول‌های دوقطبی به طرف صفحه مثبت و سر مثبت آنها به طرف صفحه منفی کشیده می‌شود و در نتیجه این مولکول‌های دوقطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی بین دو صفحه خازن هم‌دیف کنند (شکل ۲-۲۶). هم‌دیفی این مولکول‌های دوقطبی، میدانی الکتریکی مانند \vec{E}' ایجاد می‌کند که جهت آن در خلاف جهت میدان الکتریکی \vec{E}_0 اولیه صفحه‌های خازن است. به این ترتیب، میدان الکتریکی برآیند \vec{E} در داخل دی‌الکتریک جمع برداری میدان‌های \vec{E}_0 و \vec{E}' می‌شود که جهت آن در همان جهت \vec{E}_0 ولی بزرگی آن از بزرگی \vec{E}_0 کوچک‌تر است (شکل ۲-۲۷).



پ) میدان الکتریکی \vec{E} حاصل از بارهای سطحی در خلاف جهت میدان الکتریکی \vec{E}_0 است. میدان الکتریکی برآیند \vec{E} در جهت \vec{E}_0 و کوچک‌تر از آن شده است.

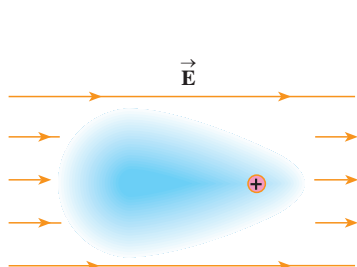


ب) این هم‌دیفی، بارهایی سطحی را روی دو وجه دی‌الکتریک ایجاد می‌کند که موجب تضعیف میدان الکتریکی خارجی می‌شود.

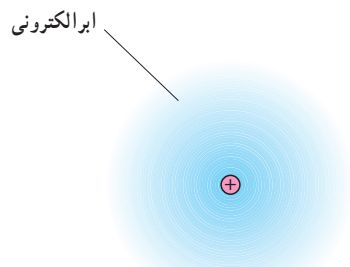


الف) مولکول‌های دوقطبی در حضور میدان الکتریکی خارجی \vec{E}_0 هم‌دیف شده‌اند.

شکل ۲-۲۷



ب) در حضور میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا شده‌اند و ابر الکترونی در خلاف جهت میدان جابه‌جا شده است.



الف) در نبود میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی بر هم منطبق‌اند.

شکل ۲-۲۸

آنچه گفته شد برای دی‌الکتریک‌های غیرقطبی (مانند متان، بنزن و...) نیز برقرار است. وقتی مولکول‌های چنین دی‌الکتریکی در میدان بین دو صفحه خازن قرار می‌گیرند بر اثر القاء قطبیده می‌شوند؛ یعنی میدان الکتریکی باعث می‌شود که ابر الکترونی این مولکول‌ها در خلاف جهت میدان جابه‌جا شود (شکل ۲-۲۸) و به این ترتیب، مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند و اصطلاحاً مولکول‌ها **قطبیده** می‌شوند.

پس از آن مانند مولکول‌های دی‌الکتریک قطبی، میدان بین دو صفحه خازن را تضعیف می‌کنند. دیدیم که در هر دو حالت با توجه به اینکه خازن متصل به باتری نیست، با قرار دادن دی‌الکتریک (چه قطبی و چه غیرقطبی) بین صفحه‌های خازن، میدان اولیه بین این صفحه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف پتانسیل بین دو صفحه نیز کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲۹). بنابراین، طبق رابطه ۲-۱۴ و با توجه به اینکه بار ثابت مانده است، ظرفیت خازن افزایش می‌یابد:

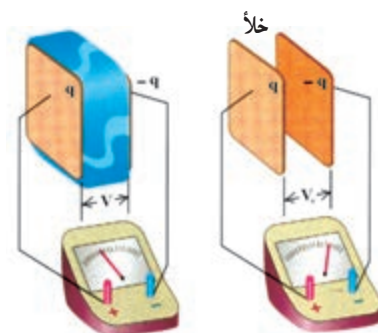
$$C = \kappa C_0 \quad (2-15)$$

اثر دیگر حضور دی‌الکتریک‌ها در خازن، افزایش حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن است. اما در هر حال برای هر دی‌الکتریکی، بیشینه میدان و در نتیجه اختلاف پتانسیلی وجود دارد که از آن به بعد دی‌الکتریک اصطلاحاً دستخوش **فروریزش الکتریکی**^۱ می‌شود و به آن اختلاف پتانسیل بیشینه، **پتانسیل فروریزش** می‌گویند. مقدار بیشینه میدان الکتریکی ای که دی‌الکتریک می‌تواند بدون فروریزش تحمل کند را **قدرت (استقامت) دی‌الکتریک**^۲ می‌نامند. برخی از قدرت‌های دی‌الکتریک برحسب kV/mm در ستون دوم در جدول ۲-۱ داده شده است. به لحاظ میکروسکوپی، فروریزش الکتریکی ناشی از کنده شدن الکترون‌های اتم‌های ماده دی‌الکتریک توسط میدان الکتریکی و سپس رانده شدن این الکترون‌ها توسط میدان الکتریکی و ایجاد یک مسیر رسانایی بین دو صفحه خازن است که با ایجاد یک جرقه همراه است و معمولاً خازن را می‌سوزاند. خازن‌ها معمولاً با مقدار ظرفیت آنها و اختلاف پتانسیل بیشینه ای که می‌توانند تحمل کنند مشخص می‌شوند (شکل ۲-۳۱). به عنوان مثالی از کاربرد دی‌الکتریک، خازن تختی را در نظر بگیرید. آزمایش و محاسبه نشان می‌دهد که ظرفیت یک خازن تخت با مساحت صفحه‌های A و فاصله جدایی صفحه‌های d، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2-16)$$

که در آن ϵ_0 همان ضریب گذردهی الکتریکی خالص ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) است. حال اگر فضای بین صفحه‌های این خازن را با یک دی‌الکتریک با ثابت دی‌الکتریک κ کاملاً پر کنیم، رابطه (۲-۱۶) همان C رابطه (۲-۱۵) می‌شود و در نتیجه برای ظرفیت خازن جدید داریم:

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



شکل ۲-۲۹ با وارد شدن دی‌الکتریک در بین صفحه‌های خازن، اختلاف پتانسیل اولیه V_0 به مقدار کوچک‌تر V کاهش یافته است.



شکل ۲-۳۰ فروریزش الکتریکی باعث تشکیل مسیرهای رسانایی سرخس‌شکلی در دی‌الکتریک شده‌اند.



شکل ۲-۳۱ تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل قابل تحمل بیشینه نوشته شده است.

^۱ Electrical breakdown

^۲ Dielectric strength

مساحت هریک از صفحه‌های خازن تختی $4/0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ و فاصله جدایی صفحه‌های آن $1/0 \times 10^{-1} \text{ mm}$ است. فضای بین صفحه‌ها را با صفحه کاغذی پر می‌کنیم. با استفاده از جدول ۱-۲ کتاب، الف) ظرفیت خازن و ب) پتانسیل فروریش الکتریکی آن را محاسبه کنید.

پاسخ:

الف) ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر است با

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

ثابت دی الکتریک کاغذ با استفاده از جدول ۱-۲ برابر با $3/5$ است و از آنجا برای ظرفیت خازن داریم:

$$C = (3/5) (8/85 \times 10^{-12} \text{ F/m}) \frac{(4/0 \times 10^{-2} \text{ m}^2)}{(1/0 \times 10^{-4} \text{ m})} = 1/2 \times 10^{-8} \text{ F} = 12 \text{ nF}$$

ب) با استفاده از رابطه 10^{-2} به ازای $\alpha = 0$ پتانسیل فروریش را به دست می‌آوریم. همان طور که گفتیم در نمادگذاری این کتاب از نماد V برای نشان دادن قدر مطلق اختلاف پتانسیل صفحه‌های خازن استفاده می‌کنیم. بنابراین، منظور از پتانسیل فروریش همان اختلاف پتانسیل بیشینه‌ای است که به فروریش دی الکتریک خازن می‌انجامد. آنگاه با استفاده از جدول ۱-۲ داریم:

$$V_{\text{فروریش}} = E_{\text{فروریش}} d = (16 \times 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}) (1/0 \times 10^{-4} \text{ m}) = 1/6 \times 10^3 \text{ V} = 1/6 \text{ kV}$$

توجه کنید در محاسبه بالا از قدرت دی الکتریک به جای $E_{\text{فروریش}}$ استفاده کردیم.



(الف)



(ب)

برخی از صفحه کلیدهای رایانه (شکل الف) بر مبنای تغییر ظرفیت خازن عمل می‌کند. هر کلید این صفحه به یک سر پایه‌ای نصب شده است که سر دیگر آن به یک صفحه فلزی متحرک متصل است. این صفحه فلزی خود توسط یک دی الکتریک انعطاف پذیر از صفحه فلزی ثابتی جدا شده است و در واقع این دو صفحه یک خازن تخت را تشکیل می‌دهند (شکل ب). با فشار دادن کلید، صفحه متحرک به صفحه ثابت نزدیک می‌شود و ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. این تغییر ظرفیت به صورت سیگنالی الکتریکی توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود و بدین ترتیب مشخص می‌شود که کدام کلید فشار داده شده است.

فاصله بین صفحه‌ها عموماً $5/0 \times 10^{-2} \text{ m}$ است که این فاصله با فشار دادن کلید به $1/5 \times 10^{-3} \text{ m}$ می‌رسد. مساحت صفحه‌ها $9/5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ است و خازن از ماده‌ای با ثابت دی الکتریک $3/5$ پر شده است. تغییر ظرفیتی که با فشار دادن کلید، توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود چقدر است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه ۲-۱۷ ظرفیت خازن پیش از فشار دادن کلید برابر است با

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} = 3 / 50 (8 / 85 \times 10^{-12} \text{ F/m}) \frac{(9 / 50 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}{(5 / 00 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

$$= 0 / 589 \times 10^{-12} \text{ F} = 0 / 589 \text{ PF}$$

پس از فشردن کلید، فاصله بین صفحه‌ها به $10^{-3} \text{ m} \times 150$ می‌رسد و با محاسبه‌ای مشابه به $C = 19 / 6 \times 10^{-12} \text{ F} = 19 / 6 \text{ PF}$ می‌رسیم. بنابراین، تغییر ظرفیت خازن که به صورت سیگنالی آشکار می‌شود از تفاضل دو مقدار بالا به دست می‌آید:

$$\Delta C = 19 / 6 \text{ PF} - 0 / 589 \text{ PF} = 19 / 0 \text{ PF}$$

فعالیت ۷-۲



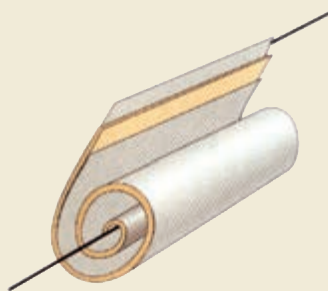
کیسه هوای خودرو

در حسگر کیسه هوای برخی از خودروها از یک خازن استفاده می‌شود. درباره چگونگی عملکرد این حسگرها تحقیق کنید و نتیجه آن را به کلاس گزارش دهید.

مطالعه آزاد

انواع خازن‌ها

غالباً خازن‌ها را براساس دی الکتریک آنها دسته‌بندی می‌کنند؛ مثلاً خازن کاغذی، الکترولیتی، سرامیکی، میکا و... خازن‌ها بسیار متنوع‌اند؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی ساخته می‌شوند. در اینجا با چند نمونه خازن آشنا می‌شوید.



طرحی از یک خازن کاغذی

خازن‌های کاغذی: این خازن‌ها از دو ورقه قلع یا آلومینیوم تشکیل شده‌اند که بین آنها دو ورقه کاغذ ظریف و نازک آغشته به روغن جا داده می‌شود. این ورق‌ها را لوله می‌کنند و به صورت یک استوانه درمی‌آورند و در محفظه‌ای پلاستیکی یا پوشش مومی قرار می‌دهند (شکل روبه‌رو). ظرفیت این نوع خازن‌ها از 1 nF تا $1 \mu\text{F}$ است.

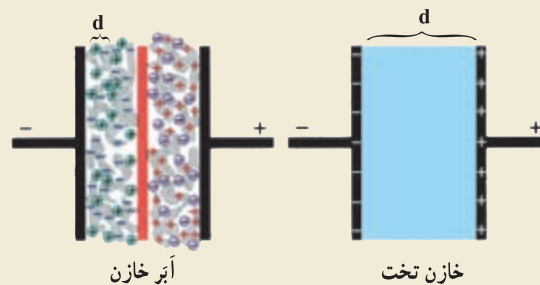
خازن‌های میکا: بین ورقه‌های فلزی نازک قلعی، ورقه‌های نازک میکا قرار می‌دهند و ورقه‌های قلع را یک در میان به یکدیگر وصل می‌کنند. ظرفیت این خازن‌ها حدود 50 تا 500 پیکوفاراد است.

خازن‌های سرامیکی: دی الکتریک این خازن‌ها سرامیک است که با استفاده از انواع سیلیکات‌ها در دمای بالا تهیه می‌شود. ثابت دی الکتریک این خازن‌ها زیاد و در حدود 1000 است. خازن‌های سرامیکی به شکل عدس تهیه می‌شوند و

حجم آنها کم است. صفحه‌های رسانای آنها نیز با ذوب نقره در دو طرف سرامیک تهیه می‌شود. ظرفیت این خازن‌ها حدود ده‌ها نانوفاراد (nF) است.

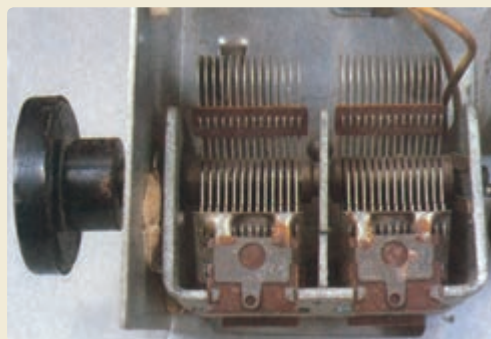
خازن‌های الکتrolیتی: این نوع خازن‌ها از صفحه‌های آلومینیومی تشکیل شده‌اند که در میان آنها الکتrolیت‌هایی از انواع مختلف فسفات یا کربنات قرار می‌دهند. در بین صفحه‌ها ماده‌ای اسفنجی است که الکتrolیت را به خود جذب می‌کند. ظرفیت این خازن‌ها بالاست و تا حدود 10^5 F می‌رسد.

آبر خازن^۱: این نوع خازن‌ها می‌توانند با حجمی حدود $16/4 \text{ cm}^3$ ظرفیتی تا چند کیلوفاراد داشته باشند. صفحه‌های این نوع خازن‌ها که از نوعی الکتrolیت پر شده‌اند با استفاده از موادی ساخته شده‌اند که در مقیاس نانو مساحت سطح بسیار بزرگی دارند. فناوری نانو به کار گرفته شده در این خازن‌ها به ظرفیت‌های بسیار بزرگی (از مرتبه کیلوفاراد) می‌انجامد. یکی از ویژگی‌های این خازن‌ها آن است که خیلی سریع‌تر از باتری‌های شارژ شدنی شارژ می‌شوند و می‌توان آنها را به دفعاتی تا هزاران بار بیشتر از این باتری‌ها شارژ کرد. همین ویژگی است که باعث استفاده از این خازن‌ها در وسایل نقلیه الکتریکی می‌شود.



طرحی از ساختار یک آبر خازن در مقایسه با یک خازن تخت معمولی. به تفاوت d ها توجه کنید. در عمل این تفاوت به مراتب بیشتر است. d در یک آبر خازن از مرتبه نانومتر است.

خازن‌های متغیر: دی‌الکتریک این خازن‌ها معمولاً هواست. در ساختمان آنها دو نوع صفحه فلزی، یک دسته ثابت و دسته دیگر متحرک به کار رفته است که هر دو دسته، روی یک محور قرار گرفته‌اند؛ ولی صفحه‌های متحرک روی این محور می‌چرخند. صفحه‌ها به شکل نیم دایره‌اند و با چرخیدن صفحه‌های متحرک، مساحت خازن کم و زیاد می‌شود. این نوع خازن‌ها در گیرنده‌های رادیویی به کار می‌رفته است.



تصویری از یک خازن متغیر

^۱ Supercapacitor (ultra capacitor)

۲-۱۲- انرژی خازن

وقتی صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شوند در خازن انرژی نیز ذخیره می‌شود؛ مثلاً در هنگام شارژ شدن خازن توسط باتری، دائماً باری جزئی از یک صفحه خازن جدا و به همان اندازه به صفحه دیگر منتقل می‌شود. در این فرایند طبق رابطه ۲-۱۲ باتری روی این بار کار انجام می‌دهد. هنگام انتقال بار، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن نیز به آهستگی افزایش می‌یابد. بنابراین، برای انتقال بارهای بعدی به کار بیشتری نیاز است. بنا به رابطه ۲-۱۴ ($V = q/C$) و با توجه به اینکه در این فرایند ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است، می‌توانیم اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن را تابعی خطی از بار ذخیره شده در آن بدانیم که به طور یکنواخت از صفر تا V افزایش می‌یابد. بنابراین، در هنگام باردار شدن خازن می‌توان اختلاف پتانسیل متوسطی را به صورت $\bar{V} = \frac{V+0}{2} = \frac{V}{2}$ برای دو صفحه خازن در نظر گرفت. آنگاه با استفاده از رابطه ۲-۱۲، کار انجام شده برای باردار شدن کامل خازن برابر با حاصل ضرب کل بارهای جزئی منتقل شده (q) در اختلاف پتانسیل متوسط است:

$$W = q\bar{V} = q\left(\frac{V}{2}\right) = \frac{1}{2}qV$$

این کار به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی فضای بین صفحه‌های خازن ذخیره می‌شود. بنابراین:

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2}qV \quad (2-18)$$

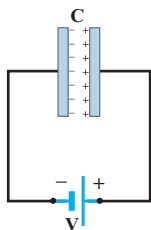
که در آن انرژی پتانسیل الکتریکی خازن ($U_{\text{خازن}}$) برحسب ژول (J)، بار خازن (q) برحسب کولن (C) و اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن (V) برحسب ولت (V) است. از طرفی با استفاده از رابطه ۲-۱۴ می‌توان نوشت:

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2}CV^2 \quad (2-19)$$

و

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} \quad (2-20)$$

مثال ۲-۱۸



دو سرب یک خازن $50 \mu F$ را به ولتاژ $12V$ وصل می‌کنیم. بار و انرژی ذخیره در آن را محاسبه کنید.

پاسخ: با توجه به رابطه $q = CV$ بار ذخیره شده برابر است با

$$q = CV = (50 \times 10^{-6} F)(12V) = 60 \times 10^{-6} C = 60 \mu C$$

با استفاده از رابطه $U = \frac{1}{2}qV$ انرژی خازن را محاسبه می‌کنیم:

$$U = \frac{1}{2}qV = \frac{1}{2}(60 \times 10^{-6} C)(12V) = 360 \times 10^{-6} J = 360 \mu J$$

دستگاه رفع لرزش نامنظم قلب (دیفبریلاتور^۱)

توانایی خازن برای ذخیره انرژی پتانسیل الکتریکی، اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها مانند دستگاه‌های رفع لرزشی است که توسط گروه‌های فوریت‌های پزشکی برای توقف لرزش بطنی افرادی که دچار حمله قلبی شده‌اند به کار می‌رود. در این بیماری انقباض و انقباض ناهماهنگ و آشفته قلب باعث می‌شود خون به درستی به مغز فرستاده نشود. در دستگاه‌های رفع لرزشی قابل حمل، یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود ۶kV باردار می‌کند و خازن در زمانی کمتر از یک دقیقه مقدار زیادی انرژی ذخیره می‌کند. صفحه‌های رابط

(کفشک‌ها)^۲ روی قفسه سینه بیمار قرار داده می‌شوند و خازن بخشی از انرژی ذخیره شده خود را از طریق بدن بیمار از یک کفشک به کفشک دیگر منتقل می‌کند. هدف از این کار این است که یک پالس (تپ) جریان قوی به قلب بدهند تا قلب به طور موقت از کار بیفتد و پس از آن با آهنگ منظم طبیعی خود به کار افتد.

اگر خازن این دستگاه به ظرفیت $11 \mu\text{F}$ با ولتاژ 6 kV شارژ شود و سپس تمام انرژی آن از طریق کفشک‌ها به درون بدن بیمار تخلیه شود،

(الف) چقدر انرژی در بدن بیمار تخلیه شده است؟

(ب) چه مقدار بار الکتریکی از بدن بیمار عبور کرده است؟

(پ) اگر تخلیه انرژی تقریباً در مدت 2 ms صورت پذیرفته باشد توان پالس جریان چقدر بوده است؟

پاسخ: (الف) انرژی ذخیره شده در خازن با استفاده از رابطه (۱۹-۲) به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (11 \times 10^{-6} \text{ F}) (6 \times 10^3 \text{ V})^2 = 198 \text{ J}$$

که با توجه به فرض مسئله این همان انرژی تخلیه شده در بدن بیمار است.

(ب) بار اولیه روی صفحات خازن برابر است با

$$q = CV \Rightarrow q = (11 \times 10^{-6} \text{ F}) (6 \times 10^3 \text{ V}) = 66 \times 10^{-3} \text{ C}$$

با توجه به فرض مسئله، این همان باری است که از بدن بیمار عبور کرده است.

(پ) توان پالس (تپ) برابر است با

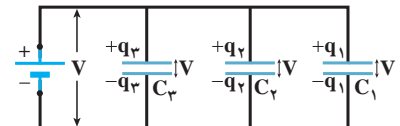
$$P = \frac{U}{t} = \frac{198}{2 \times 10^{-3}} = 99 \text{ kW}$$

فعالیت ۸-۲

انرژی پتانسیلی که باتری فراهم می‌آورد از رابطه $qV = U_{\text{باتری}}$ به دست می‌آید. از طرفی طبق رابطه ۱۸-۲ انرژی پتانسیل خازن $U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2} qV$ است. آیا به نظر شما پایستگی انرژی نقض شده است؟ در این مورد تحقیق کنید.

۲-۱۳- به هم بستن خازن‌ها در مدار

در گذشته‌های دور برای به دست آوردن ظرفیت مورد نیاز، تعداد معینی خازن را طوری به هم می‌بستند که ظرفیت مورد نظر را به دست آورند، ولی امروزه همان‌طور که پیش‌تر دیدیم مدارهای الکتریکی پُر از خازن‌هایی است که هریک بنا به ویژگی‌های خود در مدار استفاده شده است. خازن‌ها می‌توانند به روش‌های مختلفی به یکدیگر متصل شوند که در اینجا دو نوع رایج این اتصال‌ها را بررسی می‌کنیم که **موازی** و **متوالی** نامیده می‌شوند. مجموعه خازن‌هایی که به این روش‌ها به هم متصل شده‌اند را می‌توان با یک خازن جایگزین کرد که به این خازن، **خازن معادل** و به ظرفیت آن، **ظرفیت معادل**^۱ (C_{eq}) می‌گویند. انرژی الکتریکی ذخیره شده در این خازن معادل برابر مجموع انرژی تک تک خازن‌هاست.



شکل ۲-۳ سه خازن که به‌طور موازی بسته شده‌اند.

الف) بستن خازن‌ها به صورت موازی: شکل ۲-۳ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که در آن سه خازن به صورت موازی به باتری متصل شده‌اند. توجه کنید واژه «موازی» ارتباط چندانی به چگونگی ترسیم صفحه‌های خازن‌ها ندارد، بلکه «به صورت موازی» به این معناست که صفحه بالایی خازن‌ها به یکدیگر و صفحه پایینی آنها نیز به یکدیگر متصل شده است و اختلاف پتانسیل یکسان V به دو سر این دسته صفحه‌ها اعمال شده است. بنابراین، هریک از خازن‌ها در اختلاف پتانسیل یکسان V قرار دارد:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V$$

بار هر خازن طبق رابطه $q = CV$ به صورت زیر درمی‌آید:

$$q_1 = C_1 V, \quad q_2 = C_2 V, \quad q_3 = C_3 V$$

بنابراین، بار کل ذخیره شده در مجموعه خازن‌ها برابر است با:

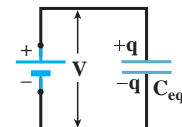
$$q = q_1 + q_2 + q_3 = C_1 V + C_2 V + C_3 V = (C_1 + C_2 + C_3) V$$

در نتیجه ظرفیت معادل ترکیب خازن‌های موازی چنین می‌شود:

$$C_{eq} = \frac{q}{V} = \frac{(C_1 + C_2 + C_3) V}{V} = C_1 + C_2 + C_3$$

و بنابراین، ترکیب این سه خازن موازی را می‌توان با خازن معادل شکل ۲-۳ جایگزین کرد. در حالت کلی برای n خازن موازی رابطه بالا به صورت زیر تعمیم می‌یابد:

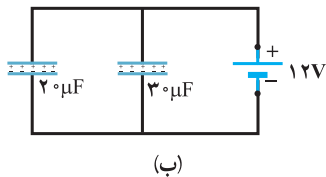
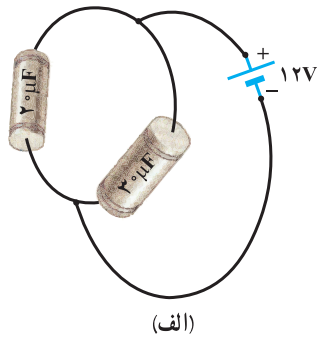
$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2-21)$$



شکل ۲-۳ خازن معادل با ظرفیت C_{eq}

بنابراین، ظرفیت خازن معادل خازن‌هایی که به صورت موازی به یکدیگر بسته شده‌اند از ظرفیت هریک از خازن‌ها بیشتر است.

۱- مخفف واژه equivalent به معنای معادل است.



شکل الف، دو خازن را نشان می‌دهد که به یک باتری ۱۲V بسته شده‌اند.
الف) ظرفیت، بار و انرژی خازن معادل را محاسبه کنید.
ب) بار و انرژی هر خازن را بیابید.

پاسخ:

الف) شکل الف را می‌توان به صورت آرایش شکل ب نشان داد. با توجه به شکل ب، خازن‌ها موازی‌اند و ظرفیت معادل آنها از مجموع ظرفیت تک‌تک آنها حاصل می‌شود:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 2 \mu F + 3 \mu F = 5 \mu F$$

با توجه به اینکه ولتاژ خازن معادل برابر اختلاف پتانسیل باتری است، بار خازن معادل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q = C_{eq} V = (5 \mu F)(12V) = 60 \times 10^{-6} C$$

و انرژی خازن معادل را می‌توانیم با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه کنیم؛ مثلاً با استفاده از رابطه $U = \frac{1}{2} CV^2$ داریم:

$$U = \frac{1}{2} C_{eq} V^2 = \frac{1}{2} (5 \mu F)(12V)^2 = 360 \times 10^{-6} J$$

ب) با توجه به اینکه خازن‌ها به صورت موازی بسته شده‌اند، ولتاژ هر خازن برابر با اختلاف پتانسیل دو سر باتری است. اکنون با استفاده از رابطه $q = CV$ بار هر خازن را به دست می‌آوریم:

$$q_1 = C_1 V = (2 \mu F)(12V) = 24 \times 10^{-6} C$$

$$q_2 = C_2 V = (3 \mu F)(12V) = 36 \times 10^{-6} C$$

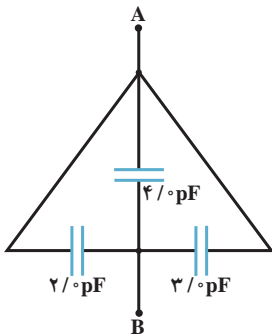
و انرژی هر خازن نیز با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه می‌شود. این دفعه از رابطه $U = \frac{1}{2} qV$ استفاده می‌کنیم:

$$U_1 = \frac{1}{2} q_1 V = \frac{1}{2} (24 \times 10^{-6} C)(12V) = 144 \times 10^{-6} J$$

$$U_2 = \frac{1}{2} q_2 V = \frac{1}{2} (36 \times 10^{-6} C)(12V) = 216 \times 10^{-6} J$$

خوب است بررسی کنید که مجموع بار خازن‌ها برابر با بار خازن معادل، و مجموع انرژی خازن‌ها برابر با انرژی خازن معادل است.

مثال ۲-۲۱

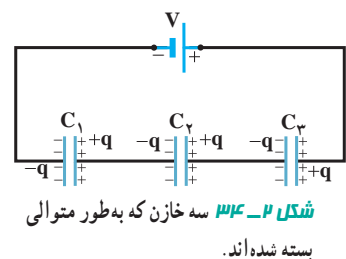


ظرفیت معادل بین پایانه‌های A و B را در شکل روبه‌رو به‌دست آورید.
پاسخ: همان‌طور که در شکل می‌بینیم دو صفحه‌خازن ۴/۰ pF به دو صفحه‌خازن‌های ۲/۰ pF و ۳/۰ pF بسته شده است. بنابراین، خازن ۴/۰ pF با دو خازن دیگر موازی است.
 در نتیجه داریم:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 = 4/0 \text{ pF} + 3/0 \text{ pF} + 2/0 \text{ pF} = 9/0 \text{ pF}$$

ب) بستن خازن‌ها به صورت متوالی: شکل ۲-۳۴ سه خازن را نشان می‌دهد که به صورت

متوالی به یک باتری متصل شده‌اند. توجه کنید واژه «متوالی» ارتباط چندانی به چگونگی ترسیم صفحه‌های خازن‌ها ندارد؛ بلکه «به صورت متوالی» به این معناست که خازن‌ها یکی پس از دیگری یکدیگر بسته شده‌اند، هیچ انشعابی بین آنها وجود ندارد و یک اختلاف پتانسیل V به دو سر این ترکیب متوالی اعمال شده است. در بستن متوالی خازن‌ها، همه خازن‌ها دارای بار یکسان q می‌شوند. برای توضیح این موضوع، فرایند زیر را که پس از اعمال اختلاف پتانسیل V در خازن‌ها رخ می‌دهد در نظر می‌گیریم.



از خازن ۱ شروع می‌کنیم و رو به سمت راست به سوی خازن ۳ می‌رویم. وقتی باتری به خازن‌های متوالی وصل می‌شود بار -q را روی صفحه سمت چپ خازن ۱ ایجاد می‌کند. آنگاه این بار، بار منفی را از صفحه سمت راست خازن ۱ می‌راند (آن را با بار +q بر جای می‌گذارد). این بار منفی رانده شده به سوی صفحه سمت چپ خازن ۲ حرکت می‌کند (به آن بار -q می‌دهد). سپس بار روی صفحه سمت چپ خازن ۲ بار منفی را از صفحه سمت راست خازن ۲ می‌راند (آن را با بار +q بر جای می‌گذارد) و به صفحه سمت چپ خازن ۳ می‌برد (به آن بار -q می‌دهد). سرانجام بار روی صفحه سمت چپ خازن ۳ کمک می‌کند تا بار منفی از صفحه سمت راست خازن ۳ به سمت باتری حرکت کند و به این ترتیب، صفحه سمت راست را با بار +q بر جای می‌گذارد.

برای به‌دست‌آوردن ظرفیت خازن معادل C_{eq} ، نخست اختلاف پتانسیل هریک از خازن‌ها را به‌طور جداگانه به‌دست می‌آوریم:

$$V_1 = \frac{q}{C_1}, V_2 = \frac{q}{C_2}, V_3 = \frac{q}{C_3}$$

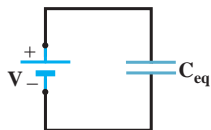
اختلاف پتانسیل کل، برابر با مجموع این سه اختلاف پتانسیل است:

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

پس ظرفیت خازن معادل چنین می‌شود:

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

و در نتیجه :



$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

شکل ۲-۳۵ خازن معادل با ظرفیت C_{eq}

و بنابراین، ترکیب این سه خازن متوالی را می‌توان با خازن معادل شکل ۲-۳۵ جایگزین کرد. در حالت کلی برای n خازن متوالی رابطه بالا به صورت زیر تعمیم می‌یابد.

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2-22)$$

بنابراین، ظرفیت خازن معادل خازن‌هایی که به صورت متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند از کوچک‌ترین ظرفیت خازن این مجموعه نیز کوچک‌تر است.

مثال ۲-۲۲



(الف)

شکل الف دو خازن را نشان می‌دهد که به یک باتری ۱۲V بسته شده‌اند. الف) ظرفیت، بار و انرژی خازن معادل را محاسبه کنید. ب) بار، ولتاژ و انرژی هر خازن را بیابید.

پاسخ :

الف) شکل الف را می‌توان به صورت آرایش شکل ب نشان داد. با توجه به شکل ب، خازن‌ها متوالی‌اند و ظرفیت معادل آنها از رابطه ۲-۲۲ به دست

می‌آید :

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{6 \mu F} + \frac{1}{12 \mu F} = \frac{1}{4 \mu F}$$

در نتیجه $C_{eq} = 4 \mu F$ است.

اکنون با استفاده از رابطه $q = C_{eq} V$ بار خازن معادل را به دست می‌آوریم :

$$q = C_{eq} V = (4 \mu F)(3 V) = 12 \mu C$$

و انرژی خازن معادل را می‌توانیم با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه

کنیم؛ مثلاً با استفاده از $U = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$ داریم :

$$U = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C_{eq}} = \frac{1}{2} \frac{(12 \mu C)^2}{4 \mu F} = 18 \mu J$$

ب) با توجه به اینکه خازن‌ها به صورت متوالی بسته شده‌اند، بار هر دو خازن با هم برابر و مساوی بار خازن معادل است :

$$q_1 = q_2 = q = 12 \mu C$$

اکنون با استفاده از رابطه $V = q / C$ ولتاژ هر خازن را می‌یابیم :

$$V_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{12 \mu C}{6 \mu F} = 2 V$$

$$V_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{12 \mu C}{12 \mu F} = 1 V$$

و انرژی هر خازن نیز با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه می‌شود. این بار از رابطه $U = \frac{1}{2} qV$ استفاده می‌کنیم:

$$U_1 = \frac{1}{2} q_1 V_1 = \frac{1}{2} (1.2 \mu C)(2.0 V) = 1.2 \mu J$$

$$U_2 = \frac{1}{2} q_2 V_2 = \frac{1}{2} (1.2 \mu C)(1.0 V) = 0.6 \mu J$$

خوب است بررسی کنید که مجموع ولتاژ خازن‌ها برابر با ولتاژ کل (ولتاژ باتری) است و نیز مجموع انرژی خازن‌ها برابر با انرژی خازن معادل است.

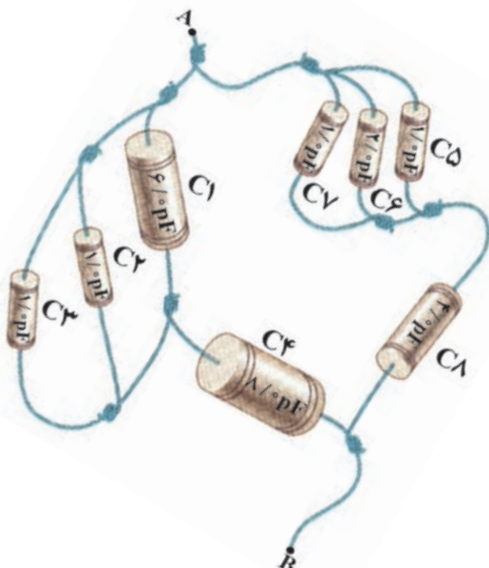
فعالیت ۲-۹



صفحه‌های لمسی از قبیل آنچه که در شکل روبه‌رو نشان داده شده است امروزه کاربردی گسترده در زندگی روزمره پیدا کرده است و آنها را می‌توان در همه جا از صفحه‌های رایانه گرفته تا گوشی‌های تلفن‌های همراه و حتی در ابزارهای پزشکی یافت. آنها به روش‌های مختلفی عمل می‌کنند که یکی از متداول‌ترین این روش‌ها مبتنی بر استفاده از ظرفیت خازن‌هاست. با تماس انگشت با یک صفحه لمسی، تغییری در ظرفیت خازن ایجاد می‌شود که مدارهای الکترونیکی دستگاه می‌توانند آن تغییر را آشکار کنند. در مورد انواع این صفحه‌های لمسی خازنی^۱ و چگونگی عملکرد آنها تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

خازن‌ها را می‌توان به صورت موازی، متوالی یا ترکیبی از خازن‌های موازی و متوالی بست و دستگاهی از خازن‌ها درست کرد. در ادامه مثال‌هایی از این دست را بررسی می‌کنیم.

مثال ۲-۳



شکل روبه‌رو، هشت خازن را نشان می‌دهد که به صورت مجموعه‌ای از اتصال‌های متوالی و موازی به هم بسته شده‌اند. الف) ظرفیت خازن معادل بین پایانه‌های A و B را در شکل محاسبه کنید.

ب) اگر پایانه‌های A و B را به یک باتری با ولتاژ ۱۲V وصل کنیم چه مقدار انرژی در دستگاه خازن‌ها ذخیره می‌شود؟

۱- capacitive touch screen

پاسخ:

الف) با توجه به شکل، سه خازن خوشه سمت چپ با هم موازی اند و ظرفیت معادل آنها برابر است با

$$C_{۱۲۳} = C_۱ + C_۲ + C_۳ = ۶/\circ\text{pF} + ۱/\circ\text{pF} + ۱/\circ\text{pF} = ۸/\circ\text{pF}$$

خازن $C_{۱۲۳}$ خود با خازن $C_۴$ متوالی است. بنابراین ظرفیت معادل خازن های سمت چپ از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{C_{\text{چپ}}} = \frac{1}{C_{۱۲۳}} + \frac{1}{C_۴} = \frac{1}{۸/\circ\text{pF}} + \frac{1}{۸/\circ\text{pF}} = \frac{1}{۴/\circ\text{pF}} \Rightarrow C_{\text{چپ}} = ۴/\circ\text{pF}$$

به همین ترتیب سه خازن خوشه سمت راست با هم موازی اند و ظرفیت معادل آنها برابر است با

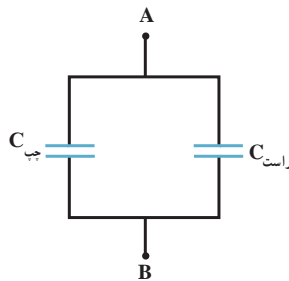
$$C_{۵۶۷} = C_۵ + C_۶ + C_۷ = ۱/\circ + ۲/\circ + ۱/\circ = ۴/\circ\text{pF}$$

خازن $C_{۵۶۷}$ خود با خازن $C_۸$ متوالی است. بنابراین، ظرفیت معادل خازن های سمت راست از رابطه زیر به دست

می آید:

$$\frac{1}{C_{\text{راست}}} = \frac{1}{C_{۵۶۷}} + \frac{1}{C_۸} = \frac{1}{۴/\circ\text{pF}} + \frac{1}{۴/\circ\text{pF}} = \frac{1}{۲/\circ\text{pF}} \Rightarrow C_{\text{راست}} = ۲/\circ\text{pF}$$

بنابراین، شکل این دستگاه خازن ها به صورت شکل زیر در می آید.



در نتیجه ظرفیت خازن معادل این دستگاه خازن ها برابر است با

$$C_{\text{eq}} = C_{\text{چپ}} + C_{\text{راست}} = ۴/\circ\text{pF} + ۲/\circ\text{pF} = ۶/\circ\text{pF}$$

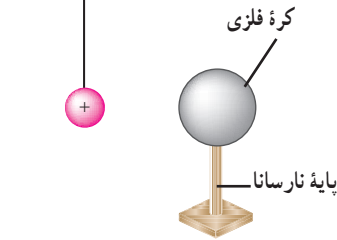
ب) با استفاده از یکی از سه رابطه انرژی خازن ها می توانیم ذخیره شده در این دستگاه را بیابیم. در اینجا ساده تر

آن است که از رابطه $U = \frac{1}{2} CV^2$ استفاده کنیم:

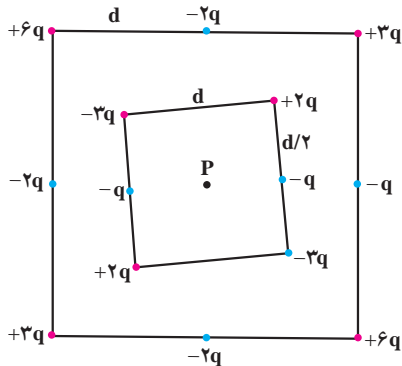
$$U = \frac{1}{2} C_{\text{eq}} V^2 = \frac{1}{2} (۶/\circ\text{pF}) (۱۲\text{V})^2 = ۴/۳ \times ۱۰^{-۲} \text{pJ}$$

پرسش‌ها

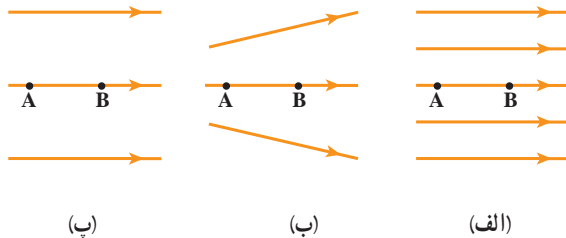
- ۱ یک کره فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه نارسانی قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می‌کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می‌افتد.



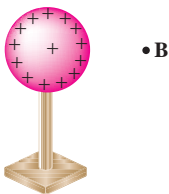
- ۲ شکل روبه‌رو دو آرایه مربعی از ذرات باردار را نشان می‌دهد. مربع‌ها که در نقطه P هم‌مرکزند، هم‌ردیف نیستند. ذره‌ها روی محیط مربع به فاصله $d/2$ یا d از هم قرار گرفته‌اند. بزرگی و جهت میدان الکتریکی برآیند در نقطه P چیست؟



- ۳ شکل روبه‌رو سه آرایش خطوط میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. در هر آرایش، یک پروتون از حالت سکون در نقطه A رها می‌شود و سپس توسط میدان الکتریکی تا نقطه B شتاب می‌گیرد. نقطه‌های A و B در هر سه آرایش در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. در کدام شکل سرعت پروتون در نقطه B بیشتر است؟ توضیح دهید.



- ۴ در شکل روبه‌رو ذره باردار کوچک را از حالت سکون، از نقطه A به سمت کره باردار که روی پایه عایقی قرار دارد، نزدیک می‌کنیم و در نقطه B قرار می‌دهیم. (الف) در این جابه‌جایی، کار نیروی الکتریکی مثبت است یا منفی؟ (ب) کاری که ما در این جابه‌جایی انجام می‌دهیم مثبت است یا منفی؟ (پ) انرژی پتانسیل ذره باردار در این جابه‌جایی چگونه تغییر می‌کند؟ (ت) پتانسیل نقطه‌های A و B را با هم مقایسه کنید.



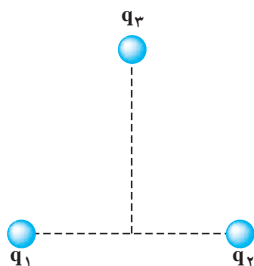
- ۵ اگر ساختمان یک خازن را تغییر ندهیم، در هریک از شرایط زیر ظرفیت خازن چگونه تغییر می‌کند؟ (الف) بار آن دو برابر شود؟ (ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌های آن سه برابر شود؟



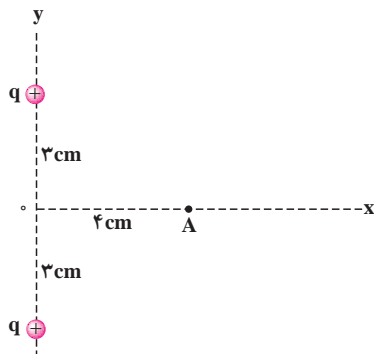
- ۶ شکل روبه‌رو، دوزره باردار را نشان می‌دهد که در جای خود روی محور x ثابت شده‌اند. (الف) در کجای این محور (غیر از بینهایت) نقطه‌ای وجود دارد که در آنجا میدان الکتریکی برآیند برابر با صفر است؟ (ب) آیا نقطه‌ای در جایی بیرون از محور (غیر از بینهایت) وجود دارد که میدان الکتریکی در آنجا صفر باشد؟

مسئله‌ها

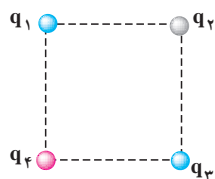
- ۱ بارهای الکتریکی نقطه‌ای $q_1 = -4 \text{ nC}$ و $q_2 = -4 \text{ nC}$ مطابق شکل در فاصله 8 cm از یکدیگر ثابت شده‌اند. بار نقطه‌ای $q_3 = -5 \text{ nC}$ را در نقطه‌ای که فاصله آن از هر یک از دو بار الکتریکی قبلی برابر 8 cm است، قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی وارد بر بار q_3 را محاسبه کنید.



- ۲ دو بار الکتریکی نقطه‌ای همنام $q = +1 \text{ nC}$ مطابق شکل روبه‌رو فاصله 6 cm از یکدیگر قرار دارند. جهت و اندازه میدان الکتریکی را در نقطه A واقع بر عمود منصف خط واصل دو بار، در فاصله 4 cm از نقطه O (وسط خط واصل دو بار) مشخص کنید.



- ۳ سه ذره باردار q_1, q_2, q_3 مطابق شکل در سه رأس مربعی ثابت شده‌اند. اگر $q_1 = q_2 = q_3 = -5 \mu\text{C}$ باشد، نوع و اندازه بار q_4 را طوری تعیین کنید که بار q_4 در حال تعادل باشد.

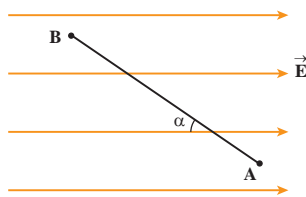


- ۴ هسته آهن شعاعی در حدود $4 \times 10^{-15} \text{ m}$ دارد و شامل ۲۶ پروتون است. (الف) بزرگی نیروی دافعه بین دو پروتون که به فاصله $4 \times 10^{-15} \text{ m}$ از هم قرار دارند چقدر است؟ (ب) بزرگی نیروی گرانشی بین این دو پروتون چقدر است؟ (پ) از این مسئله به چه نتیجه‌ای می‌رسید؟

- ۵ در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $5 \times 10^5 \text{ N/C}$ که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره بارداری به جرم $2 \times 10^{-3} \text{ kg}$ معلق و به حال سکون قرار دارد. اگر $g = 10 \text{ N/kg}$ باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.



- ۶ غلظت الکترون‌ها در ارتفاعات مختلف جو زمین متفاوت است. وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای اطراف زمین باردار می‌شود. این بارها ممکن است موجب آسیب رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شود. فرض کنید ماهواره امید در اثر عبور از یکی از لایه‌های جو دارای بار الکتریکی $q = 2 \times 10^{-9} \text{ C}$ شود. این ماهواره، مکعبی به ضلع 4 cm است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود.)



- ۷ مطابق شکل، بار $q = +5 \text{ nC}$ را در میدان الکتریکی یکنواخت $E = 10^5 \text{ N/C}$ از نقطه A تا نقطه B جابه‌جا می‌کنیم. اگر $AB = 2 \text{ m}$ و $\alpha = 3^\circ$ باشد، مطلوب است
- الف) نیروی الکتریکی وارد بر بار q ،
- ب) کاری که نیروی الکتریکی در این جابه‌جایی انجام می‌دهد،
- پ) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار q

- ۸ دو صفحه رسانا با فاصله 2 cm را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را به اختلاف پتانسیل 100 V وصل می‌کنیم. در نتیجه، یکی از صفحه‌ها به طور منفی و دیگری به طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی به وجود می‌آید. اندازه این میدان الکتریکی را حساب کنید و توضیح دهید که کدام یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیشتری دارند.

- ۹ در یک میدان الکتریکی، بار $q = 2 \text{ nC}$ از نقطه A تا B جابه‌جا می‌شود. اگر انرژی پتانسیل آن در نقطه‌های A و B به ترتیب $4 \times 10^{-5} \text{ J}$ و $5 \times 10^{-5} \text{ J}$ باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی میان دو نقطه $(V_B - V_A)$ را محاسبه کنید.

- ۱۰ بار الکتریکی $q = -4 \text{ nC}$ از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی $V_1 = -40 \text{ V}$ تا نقطه‌ای با پتانسیل $V_2 = -10 \text{ V}$ آزادانه جابه‌جا می‌شود. الف) انرژی پتانسیل الکتریکی بار q چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟ ب) توضیح دهید که تغییر انرژی پتانسیل بار q (با توجه به قانون پایستگی انرژی) به چه انرژی‌ای تبدیل می‌شود؟

- ۱۱ مساحت صفحه‌های یک خازن تخت به ظرفیت 1 F که فاصله صفحات آن 1 mm و بین صفحات آن هواست، باید چقدر باشد؟ از این مسئله چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

- ۱۲ اختلاف پتانسیل بین دو صفحه یک خازن را از 28 V به 40 V ولت افزایش می‌دهیم. اگر با این کار 15 microCoulomb بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

- ۱۳ خازنی به ظرفیت $C_1 = 50 \mu\text{F}$ با اختلاف پتانسیل 10^2 V و خازنی به ظرفیت $C_2 = 10 \mu\text{F}$ با اختلاف پتانسیل $7 \times 10^2 \text{ V}$ پر شده‌اند. اگر این خازن‌های پر را از مدار اصلی آنها جدا و صفحه‌های همنام آنها را به هم وصل کنیم، الف) اختلاف پتانسیل بین دو صفحه و بار ذخیره شده در هر خازن چقدر می‌شود؟

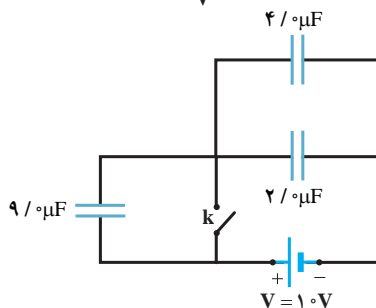
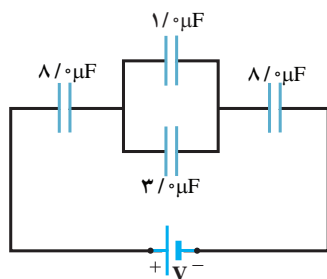
ب) مجموع انرژی ذخیره شده در دو خازن را قبل و بعد از اتصال به یکدیگر محاسبه و با هم مقایسه کنید.

- ۱۴ ظرفیت خازنی 12 microFarad و بار الکتریکی آن q است. اگر 3 mC بار الکتریکی را از صفحه منفی جدا کرده و به صفحه مثبت منتقل کنیم، انرژی ذخیره شده در خازن به اندازه 8 J زیاد می‌شود. q را محاسبه کنید.

- ۱۵ در مدار شکل روبه‌رو اختلاف پتانسیل دو سر مدار برابر 10 V است.

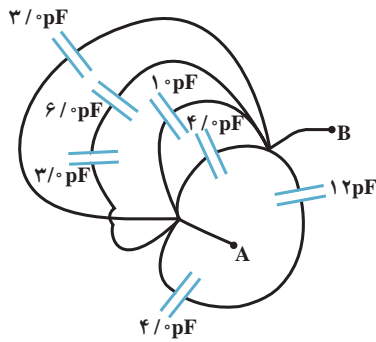
الف) ظرفیت معادل مدار و

ب) بار الکتریکی و اختلاف پتانسیل دو سر هر یک از خازن‌ها را حساب کنید.

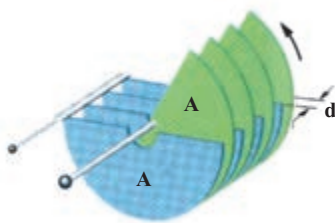


- ۱۶ در شکل روبه‌رو، انرژی ذخیره شده در مجموعه خازن‌ها را در حالتی حساب کنید که الف) کلید k باز و ب) کلید k بسته است.

۱۷ یک باتری ۱۲V به پایانه‌های A و B مدار نشان داده شده در شکل روبه‌رو بسته شده است. چقدر انرژی در شبکه خازنی ذخیره می‌شود؟



* ۱۸ شکل روبه‌رو خازنی متغیر را نشان می‌دهد که فضای بین صفحات آن هواست. صفحه‌ها یک در میان به هم متصل شده‌اند. یک دسته از صفحه‌ها در جای خود ثابت شده‌اند و دسته‌ای دیگر می‌توانند به‌طور دستی بچرخند. خازنی با ۳ صفحه را در نظر بگیرید که مساحت هریک از صفحه‌های آن $A = 1/5 \text{ cm}^2$ و فاصله هر دو صفحه مجاور $d = 3/4 \text{ mm}$ است. ظرفیت بیشینه این خازن چقدر است؟ (راهنمایی: خازن‌ها به‌طور موازی متصل شده‌اند.)



* ۱۹ فرض کنید زنبور عسل کره‌ای به قطر $1/0 \text{ cm}$ است که بار $+45/0 \text{ pC}$ به‌طور یکنواختی روی آن پخش شده است. همچنین فرض کنید قطر گرده کروی‌ای که به سمت زنبور کشیده می‌شود $40/0 \mu\text{m}$ و بزرگی باری که روی هر طرف گرده القا می‌شود $1/0 \text{ pC}$ باشد و نیز فرض کنید گرده کاملاً به زنبور می‌چسبد. الف) با فرض آنکه کل بار روی زنبور در مرکز آن قرار گرفته باشد و بارهای القاشده روی گرده به‌صورت دو بار نقطه‌ای مجزا از هم در دو سمت مقابل قطر گرده باشد، نیروی الکتریکی خالص وارد بر گرده از سوی زنبور را محاسبه کنید. ب) سپس فرض کنید این زنبور، گرده را به فاصله $1/0 \text{ mm}$ از نوک کلاله گل دیگری بیاورد و نیز فرض کنید نوک کلاله مانند ذره‌ای با بار $-45/0 \text{ pC}$ است. نیروی الکتریکی خالص وارد بر گرده از سوی کلاله را محاسبه کنید. پ) با مقایسه قسمت‌های الف و ب نتیجه بگیرید آیا گرده روی زنبور باقی می‌ماند یا به سمت کلاله حرکت می‌کند؟

