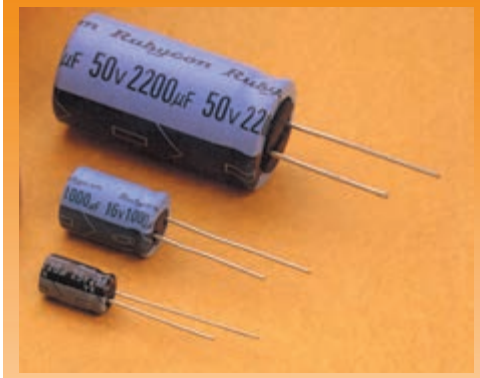
فصل پانزدهم

خازن در جریان مستقیم

هدف‌های رفتاری



در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ خازن را تعریف کند و ساختمان آن را شرح دهد.

۲ــ ظرفیّت خازن را تعریف کند.

۳ــ ضریب دی‌الکتریک را توضیح دهد.

۴ــ واحد ظرفیّت و عوامل مؤثر در آن را شرح دهد و ظرفیت خازن را محاسبه کند.

۵ــ رفتار خازن را در مدارهای DC بیان کند.

۶ــ چگونگی شارژ و دشارژ خازن را بیان کند.

۷ــ ثابت زمانی را بیان و منحنی شارژ و دشارژ را رسم کند.

۸ــ انرژی ذخیره‌شده و ثابت زمانی را محاسبه کند.

۹ــ ظرفیت معادل خازن‌های سری را محاسبه کند.

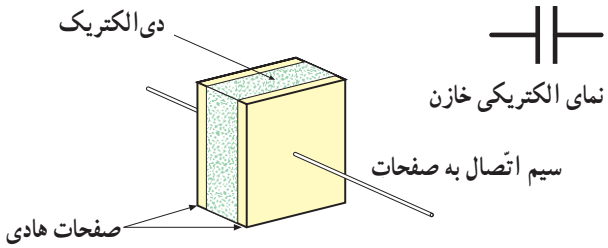
۱۰ــ ظرفیت معادل خازن‌های موازی را محاسبه کند.

۱ــ۱۵ــ خازن

خازن وسیله‌ای الکتریکی است که در مدارهای الکتریکی اثر خازنی ایجاد می‌کند. اثر خازنی خاصیّتی است که سبب می‌شود مقداری انرژی الکتریکی در یک میدان الکترواستاتیک ذخیره شود. به تعبیر دیگر، خازن‌ها عناصری هستند که می‌توانند مقداری الکتریسیته را به صورت یک میدان الکترواستاتیک در خود ذخیره کنند. همان گونه که یک مخزن آب برای ذخیره‌کردن مقداری آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

خازن‌ها به اشکال گوناگون ساخته می‌شوند و متداول‌ترین آن‌ها خازن‌های مسطّح هستند. این نوع خازن‌ها از دو صفحه‌ی هادی که بین آن‌ها عایق یا «دی‌الکتریک» قرار دارد، تشکیل می‌شوند. شکل ۱ــ۱۵ طرح ساده‌ی یک خازن مسطح و نمای الکتریکی آن را نشان می‌دهد.

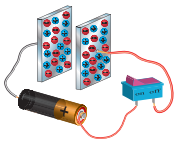
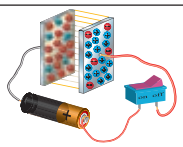
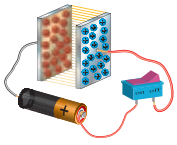
صفحات هادی نسبتاً بزرگ‌اند و در فاصله‌ای بسیار نزدیک به هم قرار می‌گیرند. دی‌الکتریک انواع مختلفی دارد و با ضریب مخصوصی که نسبت به هوا سنجیده می‌شود، معرفی می‌گردد. این ضریب را **ضریب دی‌الکتریک** می‌گویند و آن‌را با حرف / نمایش می‌دهند.



شکل ۱ــ۱۵ــ نمای یک خازن ساده

۲ــ۱۵ــ میدان الکتریکی

هنگامی که یک خازن شارژ می‌گردد، یک صفحه‌ی آن دارای بار منفی و صفحه‌ی دیگر دارای بار مثبت می‌شود. چون بار منفی به‌وسیله‌ی یک بار مثبت جذب می‌شود، الکترون‌های صفحه‌ی منفی مایل‌اند به‌طرف صفحه‌ی مثبت بروند امّا عایق بین صفحات، امکان این حرکت را نمی‌دهد. الکترون‌ها نمی‌توانند از طریق عایق به طرف صفحه‌ی مثبت بروند امّا یک نیروی الکتریکی که سبب جذب آن‌ها می‌شود، بین دو صفحه وجود دارد. این نیرو **میدان الکتریکی** نامیده می‌شود. میدان الکتریکی را نمی‌توان دید امّا می‌توان آن را به صورت خطوط نیروی الکتریکی فرضی بین دو صفحه‌ی خازن نشان داد. هرچه شارژ روی صفحات خازن بیش‌تر باشد، میدان الکتریکی ایجاد شده قوی‌تر خواهد بود و درنتیجه، نیروی جاذبه‌ی بین صفحات بزرگ‌تر می‌شود. شکل ۲ــ۱۵ میدان الکتریکی بین صفحات خازن را نشان می‌دهد.

خازن شارژ نشده بدون میدان الکتریکی	
خازن تا حدودی شارژشده میدان الکتریکی متوسط	
خازن کاملاً شارژشده میدان الکتریکی قوی	

شکل ۲ــ۱۵ــ نمایش میدان الکتریکی بین صفحات خازن در حالت‌های مختلف

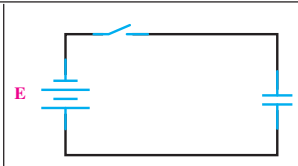
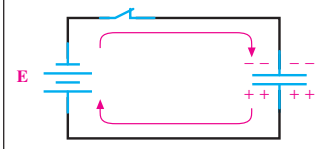
۳ــ۱۵ــ شارژ خازن با ولتاژ DC

برای این که یک خازن شارژ شود ــ یعنی انرژی الکتریکی را ذخیره کند ــ باید آن را به یک اختلاف پتانسیل (ولتاژ) وصل کرد. این ولتاژ به‌وسیله‌ی یک باتری تأمین می‌شود. قطب مثبت باتری، به یک طرف و قطب منفی آن به طرف دیگر خازن ــ مانند شکل ۳ــ۱۵ــ وصل می‌شود. قبل از بستن کلید، صفحات خازن خنثی است و هیچ انرژی‌ای ذخیره نخواهد شد.

با بستن کلید، الکترون‌ها از قطب منفی باتری به طرف صفحه‌ای که به این قطب متّصل است جاری می‌شوند و در آن تراکم الکترون یا بار منفی ایجاد می‌کنند. در همین لحظه، قطب مثبت باتری همان تعداد الکترون را از صفحه‌ای که به این قطب متّصل است جذب می‌کند و این صفحه، کمبود الکترون می‌کند و دارای بار مثبت می‌شود. در لحظاتی که خازن شارژ می‌شود، الکترون‌ها از طریق سیم‌های رابط به طرف قطب مثبت باتری حرکت می‌کنند، وارد باتری می‌شوند و از قطب منفی خارج می‌گردند. حرکت الکترون‌ها را در مدار، **عبور جریان در مدار** می‌گویند.[۱]

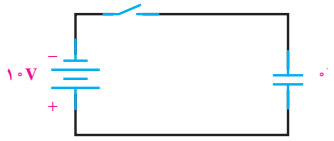
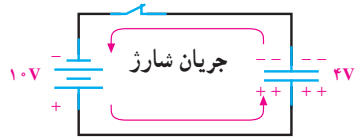
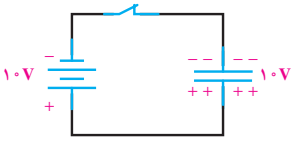
وارد و خارج‌شدن الکترون‌ها از صفحات خازن، میدان الکتریکی ساکن را بالا می‌برد و ولتاژی در خلاف جهت ولتاژ اعمال شده به دو سر خازن ایجاد می‌کند. ولتاژ ایجادشده در خازن، با جاری‌شدن جریان در مدار مخالفت می‌کند. به تعبیر دیگر، ولتاژ خازن با ولتاژ باتری مخالفت می‌کند. هرچه ولتاژ دو سر خازن بیش‌تر می‌شود، ولتاژ مؤثر مدار ــ که تفاوت بین ولتاژ باتری و ولتاژ خازن است ــ کمتر می‌شود و درنتیجه، شدت جریان مدار کاهش می‌یابد. هرگاه ولتاژ خازن با ولتاژ باتری برابر شود، جریان در مدار متوقف می‌گردد. صفرشدن جریان در مدار، نشانه‌ی شارژشدن کامل خازن است. خازن هیچ‌گاه با ولتاژی بیشتر از ولتاژ منبع شارژ نمی‌شود.

۱ــ طبق قرارداد، جهت جریان را در مدار برخلاف جهت حرکت الکترون‌ها در نظر می‌گیریم.

وقتی کلید باز است، هیچ جریانی از مدار نمی‌گذرد و خازن شارژ نمی‌شود.	
وقتی کلید بسته است، جریان از مدار می‌گذرد و خازن را شارژ می‌کند.	

شکل ۳ــ۱۵ــ اتصال باتری و شارژ خازن

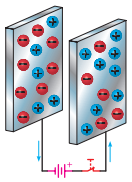
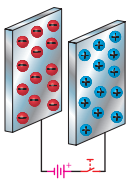
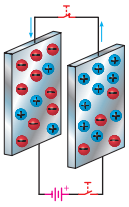
باید به این نکته توجه کرد که جریان شارژ و ولتاژ خازن مخالف یک‌دیگر عمل می‌کنند ؛ یعنی، در ابتدای شارژ جریان ماکزیمم و ولتاژ خازن صفر است. هرچه به ولتاژ خازن اضافه می‌شود، شدّت جریان کاهش می‌یابد. وقتی ولتاژ خازن به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد، جریان صفر می‌شود. شکل ۴ــ۱۵این مطلب را به‌روشنی نشان می‌دهد.

مدار باز بوده و جریان نمی‌گذرد	
خازن در حال شارژ	
خازن کاملاً شارژشده و جریان نمی‌گذرد	

شکل ۴ــ۱۵ــ شارژشدن خازن به‌اندازه‌ی ولتاژ باتری

۴ــ۱۵ــ دشارژ (تخلیه) خازن

یک خازن شارژشده باید شارژ خود را به‌مدّت نامحدودی نگاه دارد ؛ درحالی که این امر عملی نیست. با جداشدن منبع شارژ از خازن، دیر یا زود خازن شارژ (بار) خود را از دست می‌دهد. عمل از دست‌دادن شارژ را **دشارژشدن** می‌نامند. برای دشارژ خازن تنها لازم است یک مسیر هادی بین دو صفحه ایجاد شود. با ایجاد مسیر، الکترون‌های صفحه‌ی منفی به طرف پتانسیل مثبت در صفحه‌ی مثبت جاری می‌شوند. تبادل الکترون بین صفحات آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا صفحات خنثیٰ شوند. در این موقع، خازن هیچ‌گونه ولتاژی ندارد و می‌گویند خازن دشارژشده است. حرکت الکترون‌ها از مسیر ایجادشده **جریان دشارژ** نامیده می‌شود. در شکل ۵ ــ ۱۵ شارژ و دشارژ خازن را مشاهده می‌کنید.

خازن در حال شارژ	
خازن شارژشده	
خازن در حال تخلیه	

شکل ۵ــ۱۵ــ نمایش شارژ و دشارژ خازن

۵ــ۱۵ــ ظرفیت خازن

ظرفیّت یک خازن ــ که آن‌را با حرف C نمایش می‌دهند ــ نمودار میزان توانایی ذخیره‌کردن شارژ (بار) الکتریکی است. بنابه تعریف، ظرفیّت خازن برابر است با مقدار بار الکتریکی که باید روی یکی از صفحات خازن جمع شود تا پتانسیل آن نسبت به صفحه‌ی دیگر به‌اندازه‌ی یک ولت افزایش یابد. به عبارت دیگر، خارج‌قسمت بار الکتریکی (Q) ذخیره شده روی هر یک از صفحات خازن بر اختلاف‌پتانسیل (V) میان دو صفحه را **ظرفیّت** آن خازن گویند. به‌عبارت دیگر، می‌توان گفت که میزان ذخیره‌شدن

شارژ الکتریکی به ظرفیّت خازن‌ها بستگی دارد. در یک ولتاژ برابر خازنی که ظرفیّت کم‌تری دارد، بار کم‌تر و آن که ظرفیّت بیش‌تری دارد، بار بیش‌تری را در خود ذخیره می‌کند. واحد ظرفیت **فاراد** است که از نام مایکل فاراده گرفته شده و آن عبارت است از نسبت یک کولن[1] بار ذخیره شده در هریک از صفحات خازنی که به اختلاف پتانسیل یک ولت اتّصال داده شده باشد. با توجه به تعریف ارائه‌شده، رابطه‌ی ظرفیت خازن به صورت زیر است.

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

C ظرفیت خازن به فاراد (F)، Q بار یک صفحه برحسب کولن (C) و V ولتاژ دو سر خازن است. فاراد واحد بزرگی است و در کارهای عملی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. در عمل از واحدهای کوچک‌تری استفاده می‌شود. جدول ۱ــ۱۵ واحدهای کوچکتر خازن و ضرایب آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱ــ۱۵

چگونگی تبدیل	ضریب	حرف اختصاری	واحد
برای تبدیل از واحد بالا به واحد پایین در ضرایب ضرب می‌شود.	واحداصلی	f	فاراد
	10^{3}	mf	میلی فاراد
	10^{6}	µf	میکرو فاراد
	10^{9}	nf	نانو فاراد
	10^{12}	pf	پیکو فاراد

مثال ۱: یک خازن در اثر اعمال ۲۰ ولت به دو سر آن باری معادل ۸۰ کولن را ذخیره می‌کند. ظرفیت خازن چه‌قدر است؟

راه حل:

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

$$C = \frac{80(C)}{20(V)} = 4(F)$$

مثال ۲: خازنی با ظرفیت ۴۰µF را به ولتاژ ۵۰ ولت اتّصال می‌دهیم. مقدار بار ذخیره‌شده چه‌قدر است؟

راه حل:

$$Q = CV$$

$$Q = 40\times10^{-6}\times50 = 2000\,\mu C$$

مثال ۳: به دو سر خازن ۱۰µF چه ولتاژی بدهیم تا باری معادل ۱۰µC در آن ذخیره شود؟

راه حل:

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

$$V = \frac{10\times10^{-6}(C)}{10\times10^{-6}(F)} = 1V$$

۶ــ۱۵ــ عوامل مؤثر بر ظرفیّت خازن

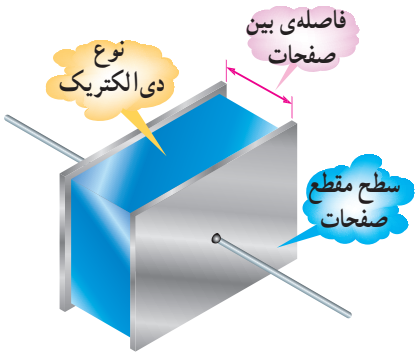
مهم‌ترین عوامل مؤثر در تعیین ظرفیت خازن عبارت‌اند از :

۱ــ مساحت صفحات

۲ــ فاصله‌ی بین صفحات

۳ــ دی‌الکتریک به‌کار رفته بین صفحات

ظرفیّت یک خازن فقط[2] به ابعاد و نوع عایق بستگی دارد نه به مقدار ولتاژ و بار ذخیره‌شده در آن. شکل ۶ــ۱۵ عوامل مؤثّر در ظرفیّت را نشان می‌دهد.

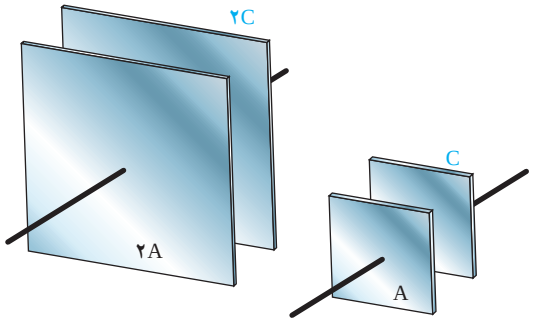


شکل ۶ــ۱۵ــ عوامل مؤثر بر ظرفیت خازن

۱ــ کولن (Coulomb) واحد بار الکتریکی است و مقدار آن بار $6/28\times10^{18}$ الکترون می‌باشد.

۲ــ فرکانس ولتاژ دو سر خازن، درجه حرارت و مدت زمانی که خازن مورد استفاده قرار می‌گیرد از عوامل دیگری است که بر ظرفیت خازن تأثیر ناچیزی می‌گذارند ؛ به‌طوری که می‌توان در بعضی مواقع از آن‌ها صرف نظر کرد.

۱ــ تأثیر مساحت صفحات: در صورت ثابت‌بودن فاصله‌ی بین صفحات دو خازن و استفاده از یک نوع دی‌الکتریک در آن‌ها، خازنی که دارای صفحات بزرگ‌تر است، ظرفیّت بیش‌تری خواهد داشت، زیرا هر چه صفحات بزرگ‌تر باشند، بار بیش‌تری روی آن‌ها ذخیره می‌شود. بنابراین، در صورت ثابت نگه‌داشتن عایق و فاصله‌ی بین صفحات، ظرفیّت خازن با مساحت صفحات نسبت مستقیم دارد ؛ یعنی، با دوبرابرشدن مساحت صفحات، ظرفیّت خازن دو برابر می‌شود و برعکس، در صورت نصف‌شدن مساحت صفحات ظرفیّت خازن نیز نصف می‌شود. شکل ۷ــ۱۵ نسبت بین ظرفیّت و مساحت صفحات را نشان می‌دهد.

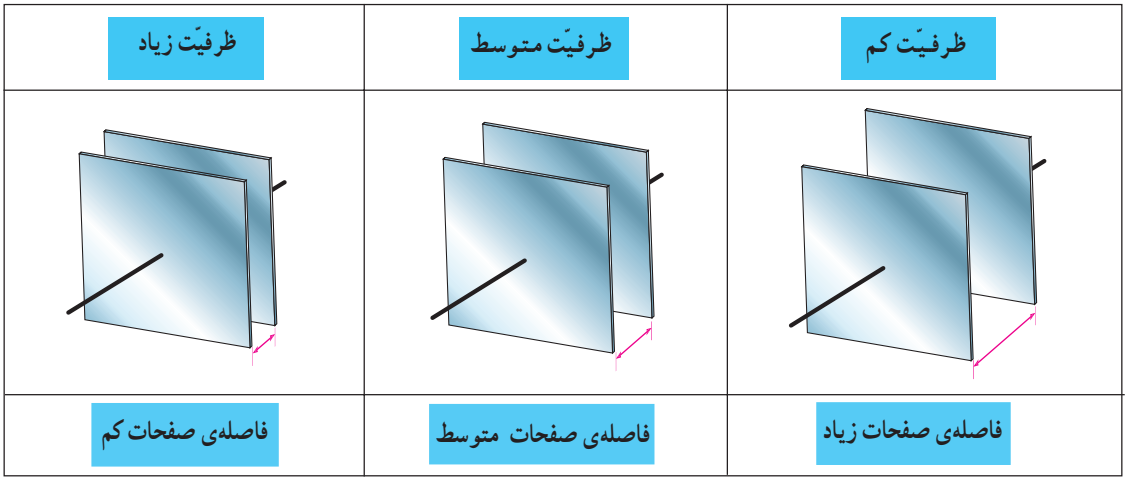


ظرفیّت خازن سمت راست، نصفِ ظرفیّت خازنِ سمت چپ است.

شکل ۷ــ۱۵ــ تأثیر مساحت صفحات بر ظرفیّت خازن

۲ــ تأثیر فاصله‌ی بین صفحات: همان‌گونه که در شکل ۸ــ۱۵ مشاهده می‌کنید، در صورت کم یا زیادشدن فاصله‌ی بین صفحات، ظرفیت خازنی متقابلاً زیاد یا کم می‌شود ؛ یعنی، مقدار ظرفیّت خازن با فاصله‌ی بین صفحات آن، نسبت عکس دارد. هرچه فاصله‌ی بین دو صفحه کم‌تر باشد، مقدار ظرفیّت خازن بیش‌تر است و برعکس، هرچه فاصله‌ی صفحات بیش‌تر باشد، مقدار ظرفیّت خازن کم‌تر است.

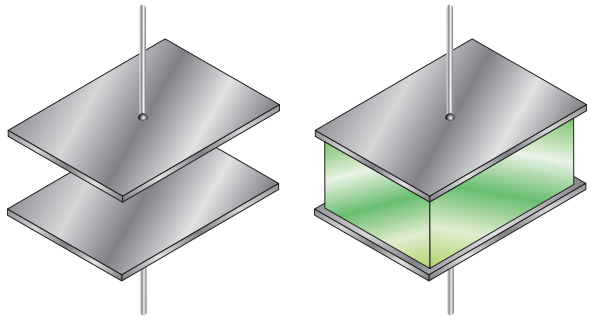
کم‌ترین فاصله‌ای که می‌تواند بین دو صفحه وجود داشته باشد، به ولتاژ داده شده به خازن و عایق بین صفحات آن بستگی دارد. امروزه خازن‌هایی با فاصله‌ی بسیار کوچک ساخته شده است که می‌توانند ولتاژهای بزرگ تا چند صد ولت را تحمل کنند.



شکل ۸ ــ۱۵ــ تأثیر فاصله‌ی بین صفحات بر ظرفیّت خازن

۳ــ اثر دی‌الکتریک: مادّه‌ی عایق مورد استفاده بین صفحات خازن را **دی‌الکتریک** گویند. دی‌الکتریک به‌کار رفته در خازن‌ها می‌تواند هوا، خلأ، کاغذ، شیشه، میکا و ... باشد. بعضی از دی‌الکتریک‌ها به‌علت این که ظرفیّت خازنی بزرگی تولید می‌کنند، دی‌الکتریک‌های خوبی هستند.

درحالی‌که برخی دیگر ظرفیّت کوچکی تولید می‌کنند و درنتیجه، دی‌الکتریک‌های ضعیفی هستند. تفاوت بین دی‌الکتریک‌های خوب و ضعیف، از چگونگی تأثیر نیروی الکترواستاتیکی بر مولکول‌های دی‌الکتریک مشخص می‌شود. شکل ۹ــ۱۵ تأثیر دی الکتریک را بر ظرفیّت خازن نشان می‌دهد.



ظرفیّت خازن سمت راست؛ پنج برابر ظرفیّت خازنِ سمت چپ است.

شکل ۹ــ۱۵ــ تأثیر دی‌الکتریک بر ظرفیّت خازن

۷ــ۱۵ــ ثابت دی‌الکتریک و قابلیت تحمل دی‌الکتریک

جنس دی‌الکتریک‌ها بر ظرفیّت خازن اثر دارد ؛ از این‌رو خواصّ دی‌الکتریکی مواد باید مورد توجّه قرار گیرد. برای این منظور، خواصّ دی‌الکتریکی مواد نسبت به خواص هوا سنجیده می‌شود. ثابت دی‌الکتریک هوا را ۱ و ثابت دی‌الکتریک هر ماده‌ی دیگر را در نظر می‌گیرند. مقدار برابر است با

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_0 = 8/85 \times 10^{-12} \left(\frac{F}{m}\right)$$

ε_r ضریب یا عدد ثابتی است که نشان می‌دهد خاصیّت دی‌الکتریک هر مادّه چند برابر خاصیت دی‌الکتریک هواست. همان‌طورکه قبلاً دیدیم، ظرفیّت خازن با مساحت صفحات و نوع دی‌الکتریک، نسبت مستقیم و با فاصله‌ی بین صفحات، نسبت عکس دارد ؛ بنابراین، می‌توان ظرفیّت را به این صورت نوشت :

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

A مساحت صفحه و d فاصله‌ی بین دو صفحه را نشان می‌دهد.

حداکثر ولتاژی را که دی‌الکتریک بدون خطر می تواند تحمّل کند، **قابلیّت تحمّل دی‌الکتریک** می‌نامند و آن‌را برحسب $\frac{1}{1000}$ V/mil ۲ (ولت بر میل) می‌سنجند. هر میل (mil) برابر اینچ است. در جدول ۲ــ۱۵ ضریب‌دی‌الکتریک (ε_r) و قابلیّت تحمل دی‌الکتریک بعضی عایق‌ها نشان داده شده است ؛ مثلاً اگر عایق خازنی از جنس میکا و فاصله‌ی بین صفحات آن یک میل باشد، حداکثر ولتاژی که این خازن می‌تواند تحمل کند و صدمه نبیند، ۱۵۰۰ ولت خواهد بود. اگر ولتاژ اعمال‌شده به خازن بیش از ۱۵۰۰ ولت شود، مولکول‌های دی‌الکتریک (میکا) می‌شکنند. در نتیجه،بین دی‌الکتریک و صفحات خازن، قوس الکتریکی ایجاد می‌شود و این خازن دیگر قابل استفاده نخواهد بود. اگر فاصله‌ی بین صفحات همین خازن را دو برابر کنیم (دو میل)، حداکثر ولتاژی که می‌تواند تحمّل کند و خراب نشود، ۳۰۰۰ ولت است.

مثال ۴: ظرفیّت خازنی را که مساحت صفحات آن ۰/۰۵ مترمربع و فاصله‌ی بین صفحات آن ۰/۱ سانتی‌متر و نوع دی‌الکتریک به‌کار رفته در آن میکا باشد، به دست آورید.

راه‌حل: با استفاده از جدول ۲ــ۱۵ ضریب‌دی‌الکتریک (ε_r) برای میکا برابر ۵ است. هم‌چنین می‌دانیم که ثابت دی‌الکتریک هوا برابر است با $\varepsilon_0 = 8/85 \times 10^{-12}$. بنابراین با توجه به مقادیر داده‌شده، مقدار C ظرفیت خازن را به‌دست می‌آوریم.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = 8/85 \times 10^{-12} \times 5 \left(\frac{F}{m}\right)$$

$$A = 0/05 m^2$$

$$d = 0/1 \times 10^{-2} m$$

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

$$C = \frac{8/85 \times 10^{-12} \times 5 \times 0/05}{0/1 \times 10^{-2}} = 0/00221 \mu f$$

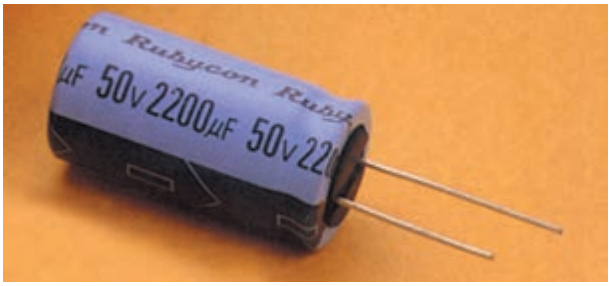
۱ــ خوانده می‌شود اپسیلون صفر.

۲ــ $1 V/mil = 1/0/001 \times 2/54 cm = 394 V/cm$ است.

جدول ۲ــ۱۵ــ ضریب‌های دی‌الکتریک و قابلیّت تحمل دی‌الکتریکی چند نوع عایق

نوع عایق	ضریب دی‌الکتریک (ε_r)	قابلیت تحمل دی‌الکتریک (V/mil)	قابلیت تحمل دی‌الکتریک V/cm
هوا	۱	۸۰	۳۹۴×۸۰
تفلون	۲	۱۵۰۰	۳۹۴×۱۵۰۰
کاغذ آغشته به پارافین	۲/۵	۱۲۰۰	۳۹۴×۱۲۰۰
روغن	۴	۳۷۵	۳۹۴×۳۷۵
میکا	۵	۱۵۰۰	۳۹۴×۱۵۰۰
اکسید آلومینیم	۷	۱۶۰۰	۳۹۴×۱۶۰۰
شیشه	۷/۵	۲۰۰۰	۳۹۴×۲۰۰۰
اکسید تانتالیُم	۲۶	۱۴۰۰	۳۹۴×۱۴۰۰
سرامیک	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۳۹۴×۱۰۰۰

از جمله مشخصه‌های دیگر خازن ولتاژ کار آن است که همراه با ظرفیّت روی بدنه‌ی خازن نوشته می‌شود و حتماً باید به آن توجه داشت. ولتاژ کار خازن حداکثر ولتاژ DCای است که خازن می‌تواند در آن ولتاژ، کار عادی خود را انجام دهد؛ مثلاً خازن شکل ۱۰ــ۱۵ را که روی آن ۲۲۰۰μF/۵۰V نوشته شده است، می‌تواند تا ۵۰ ولت DC را تحمّل کند و به کار خود ادامه دهد.



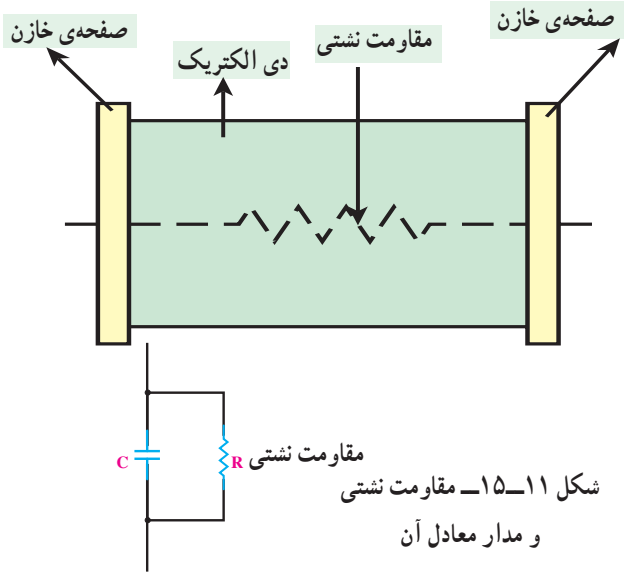
شکل ۱۰ــ۱۵

۸ــ۱۵ــ ضریب حرارتی

همان‌طور که تحت تأثیر حرارت مقدار مقاومت‌ها تغییر می‌یابد، در این‌جا نیز ضریب حرارتی، مقدار ظرفیّت را نسبت به درجه‌حرارت تغییر می‌دهد. اگر ضریب حرارتی مثبت باشد، افزایش درجه حرارت، مقدار ظرفیّت را بالا می‌برد و کاهش درجه حرارت، مقدار آن را کم می‌کند. در صورتی که ضریب حرارتی منفی باشد، افزایش و کاهش درجه حرارت سبب کاهش و افزایش مقدار ظرفیّت می‌شود.

۹ــ۱۵ــ نشت در خازن‌ها

دی الکتریک مورد استفاده در خازن‌ها باید از عبور هرگونه جریانی بین صفحات خازن جلوگیری کند. مگر در مواقعی که به دلیل ولتاژ بسیار زیاد، مولکول‌های دی‌الکتریک شکسته شوند. در هر صورت، عملاً عایقی به‌معنای صد درصد وجود ندارد. لذا دی‌الکتریک‌ها هم مقدار بسیار کمی جریان را از خود عبور می‌دهند. مقاومتی که هر دی‌الکتریک در مقابل عبور جریان از خود نشان می‌دهد، **مقاومت نشتی خازن** نامیده می‌شود. شکل ۱۱ــ۱۵ مقاومت نشتی و مدار معادل آن را نشان می‌دهد. مقاومت نشتی معمولاً حدود مگا اهم است. در اثر کارکرد زیاد خازن، مقاومت نشتی آن به‌تدریج کاهش می‌یابد.



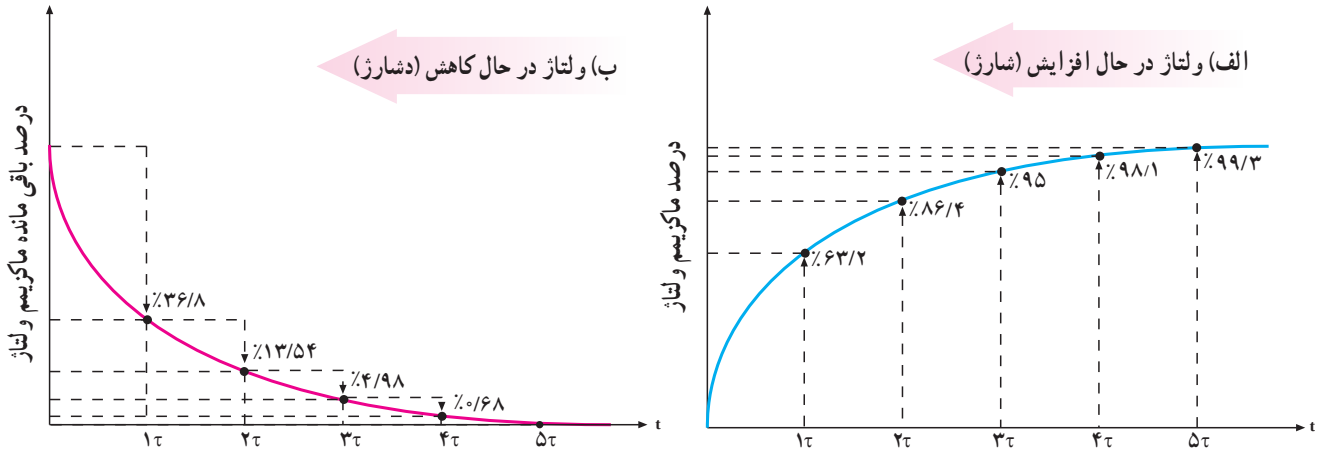
شکل ۱۱ــ۱۵ــ مقاومت نشتی و مدار معادل آن

۱۰ــ۱۵ــ ثابت زمانی خازن

چنان‌چه خازنی به تنهایی در یک مدار DC قرار گیرد، به‌سرعت شارژ می‌شود. شارژ سریع خازن به این دلیل اتفاق می‌افتد که در مسیر شارژ هیچ‌گونه مقاومتی وجود ندارد. حال اگر مقاومتی را به مدار اضافه کنیم، وجود آن در مسیر شارژ، زمان شارژ را طولانی‌تر می‌کند. مقدار دقیق زمان شارژ به مقدار مقاومت قرار گرفته در مسیر شارژ (R) و ظرفیّت خازن (C) بستگی دارد و به‌کمک رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود.

$$\tau = RC$$

τ را **ثابت زمانی خازن** گویند و آن، مدت زمانی است که ولتاژ خازن به ۶۳/۲ درصد ولتاژ کل آن برسد. در هر ثابت زمانی بعدی، خازن به‌اندازه‌ی ۶۳/۲ درصد از ولتاژ باقی‌مانده شارژ می‌شود. شارژ کل خازن در حدود ۵ ثابت زمانی طول می‌کشد و خالی‌شدن خازن نیز در حدود همین مدت زمان انجام می‌گیرد. در ثابت زمانی اول ۶۳/۲ درصد از شارژ کامل خازن از بین می‌رود و در ثابت زمانی‌های بعدی به ترتیب ۶۳/۲ درصد از شارژ باقی‌مانده تخلیه می‌شود . در انتهای ۵ ثابت زمانی، خازن کاملاً تخلیه شده است. در جدول ۳ــ۱۵ رابطه‌ی شارژ و دشارژ با ثابت زمانی و در شکل ۱۲ــ۱۵ منحنی‌های شارژ و دشارژ خازن را مشاهده می‌کنید.



در ۵ ثابت زمانی، ولتاژ به بیش از ۹۹٪ ماکزیمم می‌رسد که این مقدار عملاً ۱۰۰٪ است.

در ۵ ثابت زمانی، ولتاژ به کم‌تر از ۱٪ مقدار ماکزیمم می‌رسد که این مقدار عملاً صفر است.

شکل ۱۲ــ۱۵ــ منحنی‌های شارژ و دشارژ خازن

جدول ۳ــ۱۵ــ درصد شارژ و دشارژ خازن از ولتاژ ماکزیمم

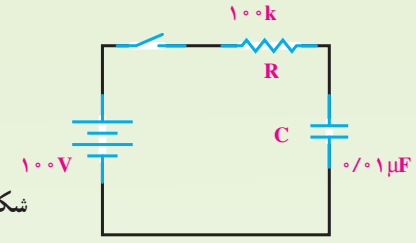
تعداد ثابت زمانی	درصد باقی‌مانده‌ی ولتاژ دشارژ
۱	۳۷
۲	۱۴
۳	۵
۴	۲
۵	۱
	تقریباً صفر

تعداد ثابت زمانی	درصد ماکزیمم ولتاژ دشارژ
۱	۶۳
۲	۸۶
۳	۹۵
۴	۹۸
۵	۹۹
	تقریباً ۱۰۰٪

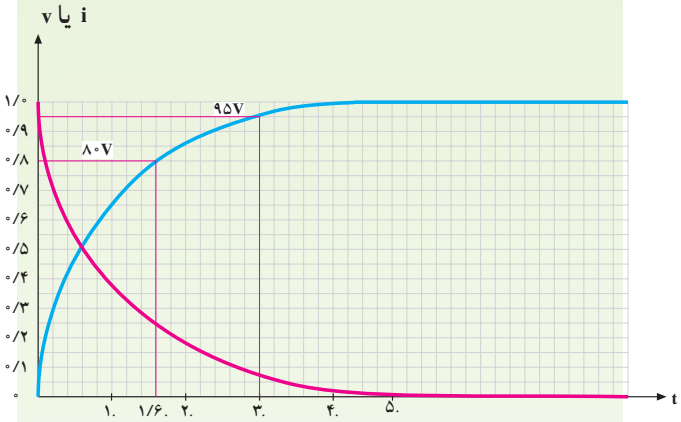
مثال ۵: مدار شکل ۱۳ــ۱۵ را در نظر می‌گیریم. پس از بستن کلید و با استفاده ازمنحنی شکل ۱۴ــ۱۵

الف : چه مدّت طول می‌کشد تا ولتاژ دو سر خازن به ۸۰ ولت برسد؟

ب : بعد از ۳ میلی‌ثانیه، ولتاژ دو سر خازن چه‌قدر می‌شود؟



شکل ۱۳ــ۱۵



شکل ۱۴ــ۱۵

راه‌حل:

ثابت زمانی مدار $\tau = RC = ۱۰۰ \times ۱۰^{۳} \times ۰/۰۱ \times ۱۰^{-۶} = ۱\,m\,sec$

در یک ثابت زمانی یا یک میلی ثانیه، خازن به اندازه‌ی ۶۳/۲ درصد ولتاژ کل ــ یعنی ۶۳/۲ ولت ــ شارژ می‌شود. اگر بخواهیم خازن ۸۰ ولت شارژ شود، چنین عمل می‌کنیم :

از روی محور عمودی که ولتاژ را نشان می‌دهد، مقدار ۸۰ ولت را پیدا می‌کنیم و خطی موازی محور زمان (افقی) می‌کشیم تا منحنی شارژ را قطع کند. از آن‌جا نیز خطی موازی محور عمودی (ولتاژ) رسم می‌کنیم تا محور زمان را قطع کند. محل تقاطع محور زمان عدد ۱/۶را نشان می‌دهد ؛ یعنی، ۱/۶ میلی ثانیه طول می‌کشد تا خازن به مقدار ۸۰ ولت شارژ شود.

در ۳ میلی‌ثانیه یا ۳ ثابت زمانی، ولتاژ دو سر خازن به ۹۵ ولت می‌رسد. چرا؟ با رسم خطوطی موازی محورهای مختصّات ــ همان‌طورکه قبلاً گفته شد ــ مقدار ۹۵ ولت به‌دست می‌آید.

۱۱ــ۱۵ــ انرژی ذخیره‌شده در خازن

میدان الکترواستاتیکی ذخیره‌شده در خازن، دارای انرژی خواهد بود. این انرژی به‌وسیله‌ی ولتاژ منبع که خازن را شارژ کرده است، تأمین می‌شود. چنان چه منبع ولتاژ را از خازن قطع کنیم، خازن در مرحله‌ی دشارژ قادر به بازپس‌دادن این انرژی است. مقدار انرژی الکتریکی ذخیره‌شده در یک خازن از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$W = \frac{۱}{۲}CV^{۲}$$

C ظرفیّت خازنی برحسب فاراد، V ولتاژ دو سر خازن برحسب ولت و W مقدار انرژی ذخیره‌شده برحسب ژول است.

مثال ۶: مقدار انرژی یک خازن ۱μF که با ولتاژ ۴۰۰ ولت شارژ شده، چه‌قدر است؟

راه حل:

$$W = \frac{۱}{۲}CV^{۲}$$

$$W = \frac{۱}{۲} \times ۱ \times ۱۰^{-۶} \times (۴۰۰)^{۲}$$

$$W = ۰/۰۸ \quad \text{ژول}$$

انرژی ذخیره‌شده در خازن شارژشده، می‌تواند شوک الکتریکی تولید کند ؛ حتی اگر به مداری بسته نشده باشد. اگر دو سر یک خازن شارژشده را لمس کنید، ولتاژ دو سر آن در بدن یک جریان تخلیه ایجاد می‌نماید. انرژی ذخیره‌شده‌ی بیش‌تر از یک ژول در خازن شارژشده با ولتاژهای زیاد می‌تواند شوک الکتریکی خطرناکی را سبب شود.

تحقیق کنید

در مورد خازن و نقش آن در فلاشرهای عکاسی و دستگاه‌های شوک الکتریکی تحقیق و نتیجه آن را به کلاس گزارش کنید.

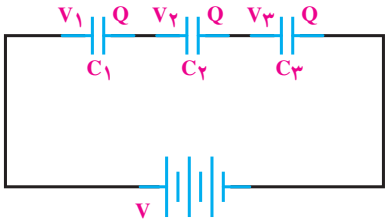
۱۲ــ۱۵ــ اتصال خازن‌ها

خازن‌ها را بسته به نوع استفاده از آن‌ها می‌توان به سه طریق سری، موازی و مختلط به هم متّصل کرد.

الف ــ اتّصال سری خازن‌ها: در شکل ۱۵ــ۱۵طرز به‌هم‌بستن سری خازن‌ها را مشاهده می‌کنید. در اتّصال سری، فاصله‌ی مؤثر بین صفحات بیش‌تر می‌شود و ظرفیت معادل مجموعه‌ی خازنی کاهش می یابد. همان‌گونه که در شکل می‌بینید، تنها دو صفحه‌ی ابتدا و انتهای مجموعه‌ی خازنی که به مولّد بسته شده است، از مولد بار الکتریکی دریافت می‌کنند و صفحه‌های دیگر از طریق القا دارای بار الکتریکی می‌شوند ؛ بنابراین، اندازه‌ی بار الکتریکی همه‌ی خازن‌ها یکی است ولی اختلاف‌پتانسیل دو سر مجموعه برابر حاصل‌جمع اختلاف‌پتانسیل‌های دو سر خازن‌هاست ؛ یعنی :

$$Q = Q_۱ = Q_۲ = Q_۳ \qquad (۱)$$

$$V = V_۱ + V_۲ + V_۳ \qquad (۲)$$



شکل ۱۵ــ۱۵ــ اتّصال سری خازن‌ها

می‌دانیم که

$$V = \frac{Q}{C_t}$$

$$V_۱ = \frac{Q}{C_۱} \quad و \quad V_۲ = \frac{Q}{C_۲} \quad و \quad V_۳ = \frac{Q}{C_۳} \qquad (۳)$$

با قراردادن روابط (۳) در رابطه‌ی ۲، رابطه‌ی ۴ حاصل می‌شود.

$$\frac{Q}{C_t} = \frac{Q}{C_۱} + \frac{Q}{C_۲} + \frac{Q}{C_۳} \qquad (۴)$$

با حذف Q از طرفین رابطه چنین می‌شود :

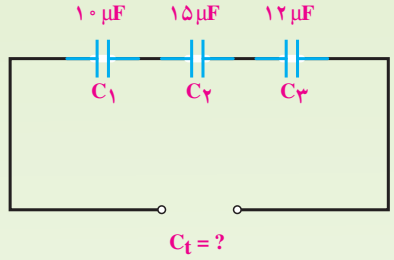
$$\boxed{\frac{۱}{C_t} = \frac{۱}{C_۱} + \frac{۱}{C_۲} + \frac{۱}{C_۳}} \qquad (۵)$$

با رابطه‌ی ۵ ظرفیت خازن معادل را می‌توان محاسبه کرد.

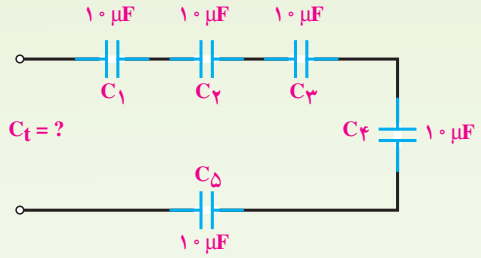
درصورتی که خازن‌ها با هم مساوی باشند، رابطه‌ی ظرفیت خازن معادل برای n خازن چنین است :

$$\boxed{C_t = \frac{C}{n}}$$

مثال ۷: ظرفیت معادل مدار شکل‌های ۱۶ــ۱۵ و ۱۷ــ۱۵ را به‌دست آورید.



شکل ۱۶ــ۱۵



شکل ۱۷ــ۱۵

راه‌حل: مدار ۱۶ــ۱۵ :

$$\frac{۱}{C_t} = \frac{۱}{C_۱} + \frac{۱}{C_۲} + \frac{۱}{C_۳}$$

$$\frac{۱}{C_t} = \frac{۱}{۱۰} + \frac{۱}{۱۵} + \frac{۱}{۱۲} = \frac{۶+۴+۵}{۶۰} = \frac{۱۵}{۶۰}$$

$$C_t = \frac{۶۰}{۱۵} = ۴\mu F$$

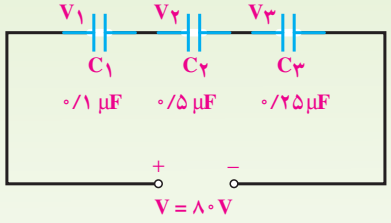
راه‌حل: مدار ۱۷ــ۱۵

$$C_t = \frac{C}{n} = \frac{۱۰\mu F}{۵}$$

$$C_t = ۲\mu F$$

افت ولتاژ دو سر خازن‌ها در مدار سری با ظرفیت هر خازن نسبت معکوس دارد ؛ یعنی، هرچه ظرفیت خازن کم‌تر باشد، مقدار ولتاژ شارژ روی آن بیش‌تر خواهد بود. به تعبیر دیگر، در مدار سری دو سر خازن‌های با ظرفیت کم‌تر، ولتاژ بیش‌تری نسبت به خازن‌های با ظرفیت بیش‌تر افت می‌کند.

مثال ۸: در مدار شکل ۱۸ــ۱۵ درصورتی که همه‌ی خازن‌ها شارژ کامل باشند، ولتاژ دو سر هر خازن را به‌دست آورید.



شکل ۱۸ــ۱۵

راه‌حل:

$$\frac{۱}{C_t}=\frac{۱}{۰/۱}+\frac{۱}{۰/۵}+\frac{۱}{۰/۲۵}=\frac{۵+۱+۲}{۰/۵}=\frac{۸}{۰/۵}$$

$$C_t=\frac{۰/۵}{۸}\mu F$$

در مدار سری مقدار بار خازن‌ها یکسان و برابر است با

$$Q_t=Q_۱=Q_۲=Q_۳=C_tV=\frac{۰/۵\times ۸۰}{۸}=۵\mu C$$

در این جا ولتاژ دو سر خازن‌ها برابر می‌شود با

$$V_۱=\frac{Q_۱}{C_۱}=\frac{۵}{۰/۱}=۵۰V$$

$$V_۲=\frac{Q_۲}{C_۲}=\frac{۵}{۰/۵}=۱۰V$$

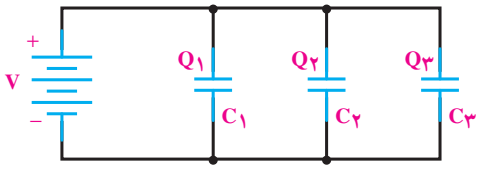
$$V_۳=\frac{Q_۳}{C_۳}=\frac{۵}{۰/۲۵}=۲۰V$$

$$V=V_۱+V_۲+V_۳$$

$$V=۵۰+۱۰+۲۰=۸۰V$$

نتیجه: خازن $C_۱$ که ظرفیت کم‌تری دارد، شارژ (ولتاژ) بیش‌تری را به خود گرفته است (۵۰ ولت).

ب ــ اتصال موازی خازن‌ها: شکل ۱۹ــ۱۵ اتّصال چند خازن را به‌طور موازی نشان می‌دهد. در اتّصال موازی خازن‌ها سطح مؤثر صفحات زیادتر می‌شود و ظرفیت معادل افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹ــ۱۵ ــ اتصال موازی خازن‌ها

در اتّصال موازی خازن‌ها اختلاف‌پتانسیل بین دو صفحه‌ی همه‌ی آن‌ها برابر ولتاژ منبع است ولی بار الکتریکی هر خازن با ظرفیت آن متناسب است ؛ یعنی :

$$Q=Q_۱+Q_۲+Q_۳ \qquad (۱)$$

با دانستن روابط ۲ و قراردادن در رابطه ی ۱ چنین به‌دست می‌آید :

$$Q=C_tV \qquad (۲)$$

$$Q_۱=C_۱V$$

$$Q_۲=C_۲V$$

$$Q_۳=C_۳V$$

$$C_tV=C_۱V+C_۲V+C_۳V$$

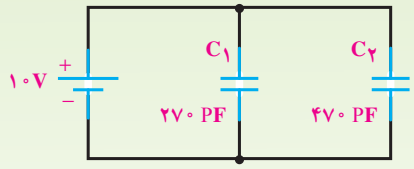
ولتاژ V را از طرفین حذف می‌کنیم تا C_t به‌دست آید.

$$\boxed{C_t=C_۱+C_۲+C_۳}$$

درصورتی که خازن‌های موازی یکسان باشند، ظرفیت کل برای n خازن برابر است با :

$$\boxed{C_t=nC}$$

مثال ۹: در مدار شکل ۲۰ــ۱۵ ظرفیت کل، ولتاژ و بار دوسر هر خازن چه‌قدر است؟



شکل ۲۰ــ۱۵

راه‌حل: ظرفیت معادل برابر است با

$$C_t = C_۱ + C_۲ = ۲۷۰ + ۴۷۰ = ۷۴۰PF$$

$$V = V_۱ = V_۲ = ۱۰V$$

مقدار بار هر خازن نیز به‌راحتی محاسبه می‌شود.

$$Q_۱ = C_۱V = ۲۷۰\times۱۰^{-۱۲}\times۱۰ = ۲/۷\times۱۰^{-۹}$$ کولن

$$Q_۲ = C_۲V = ۴۷۰\times۱۰^{-۱۲}\times۱۰ = ۴/۷\times۱۰^{-۹}$$ کولن

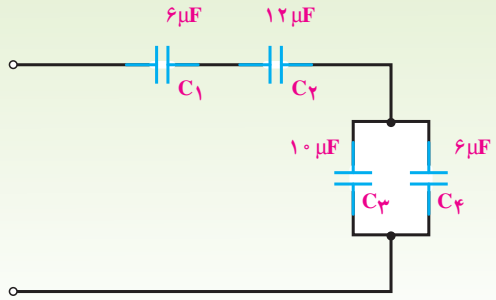
مثال ۱۰: ظرفیت معادل ۱۵ خازن ۱۰۰۰ میکروفارادی را که به‌طور موازی بسته شده‌اند، حساب کنید.

$$C_t = nC_۱$$

$$C_t = ۱۵\times۱۰۰۰\mu F = ۱۵۰۰۰\mu F$$

ج ــ اتّصال مختلط خازن‌ها: در اتّصال مختلط خازن‌ها از قوانین مربوط به اتّصال سری و موازی متناسب با روش انجام‌شده استفاده می‌کنیم ؛ یعنی، ابتدا کل مجموعه را به مجموعه‌های جزء سری و موازی تقسیم می‌کنیم ؛ آن‌گاه معادل مجموعه‌های جزء را به‌دست می‌آوریم و سپس قوانین سری و موازی را درباره‌ی آن‌ها اجرا می‌کنیم.

مثال ۱۱: ظرفیت کل مدار شکل ۲۱ــ۱۵ چه‌قدر است؟



شکل ۲۱ــ۱۵

راه حل:

در این مدار $C_۱$ و $C_۲$ سری است که روابط سری را درباره‌ی این دو عمل می‌کنیم. $C_۳$ و $C_۴$ نیز با هم موازی‌اند و روابط موازی را درباره‌ی آن‌ها عمل می‌کنیم. در نهایت، مجموعه‌ی $C_۱$ و $C_۲$ با مجموعه‌ی $C_۳$ و $C_۴$ سری هستند و از قوانین سری پیروی می‌کنند. بنابراین، می‌توان نوشت :

$$C_{۱,۲} = \frac{C_۱C_۲}{C_۱ + C_۲} = \frac{۶\times۱۲}{۶+۱۲} = ۴\mu F$$

$$C_{۳,۴} = C_۳ + C_۴ = ۱۰ + ۶ = ۱۶\mu F$$

$$C_t = \frac{۴\times۱۶}{۴+۱۶} = \frac{۱۶}{۵} = ۳/۲\mu F$$

البته می‌توانستیم ابتدا ظرفیت $C_{۳,۴}$ را حساب کنیم و سپس ظرفیت معادل را به‌صورت مجموعه‌ی سه خازن سری به‌دست آوریم.

۱۳ــ۱۵ــ جمع‌بندی خصوصیات و قوانین خازن‌های سری و موازی در مدارهای DC

مدار سری	ــ بار ذخیره شده در هر خازن با بار کل برابر است. ــ ولتاژ کل با مجموع ولتاژهای جزء برابر است. ــ ظرفیت کل کاهش می‌یابد.
مدار موازی	ــ ولتاژ کل با ولتاژ دو سر هر خازن برابر است. ــ بار کل با مجموع بارهای جزء برابر است. ــ ظرفیت کل افزایش می‌یابد.

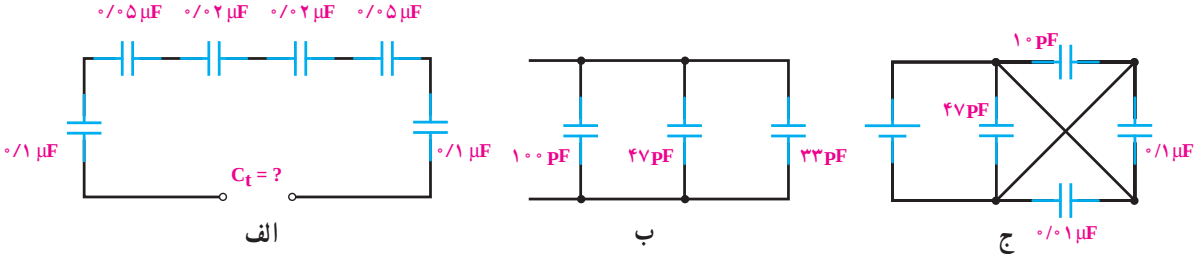
پرسش

۱ــ شارژ و دشارژ را تعریف کنید.
۲ــ میدان الکترواستاتیکی چگونه پدید می‌آید؟
۳ــ ظرفیت خازن به چه عواملی بستگی دارد؟
۴ــ چرا دی‌الکتریک را در خازن به‌کار می‌بریم؟
۵ ــ منظور از قابلیت تحمّل دی‌الکتریک یک ماده چیست؟
۶ ــ ثابت زمانی یک مدار RC را توضیح دهید و رابطه‌ی آن را بنویسید.
۷ــ خصوصیات مدار سری و موازی خازنی را با یک‌دیگر مقایسه کنید.

تمرین

۱ــ در مدارهای شکل ۲۲ــ۱۵ مقدار C_t را حساب کنید.

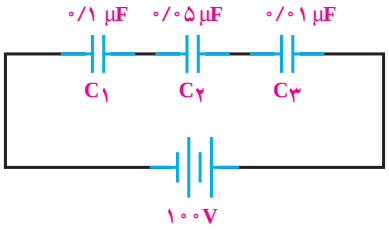
(جواب : الف ــ ۶/۲۵nF ب ــ ۱۸۰pF ج ــ ۱۱۰۰۵۷pF



شکل ۲۲ــ۱۵

۲ــ ولتاژ دو سر هر خازن مدار شکل ۲۳ــ۱۵ درصورت شارژبودن همه‌ی آن‌ها چه‌قدر است؟

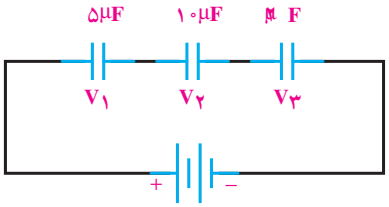
(جواب : $V_1 = \frac{۱۰۰}{۱۳}V, V_2 = \frac{۱۰۰۰}{۶۵}V, V_3 = \frac{۱۰۰۰}{۱۳}$)



شکل ۲۳ــ۱۵

۳ــ در مدار شکل ۲۴ــ۱۵ اگر مقدار بار ذخیره‌شده در مجموعه‌ی خازن‌ها ۱۰۰ میکروکولن باشد، ولتاژ دو سر هر خازن چه‌قدر است؟

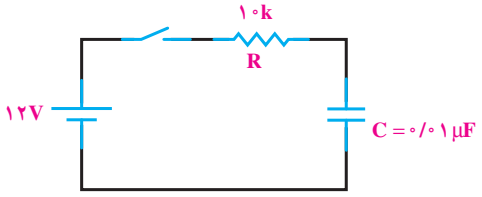
(جواب : $V_3 = 50V, V_2 = 10V, V_1 = 20V, C_t = 1/25\mu F$)



شکل ۲۴ــ۱۵

۴ــ در مدار شکل ۲۵ــ۱۵ اگر خازن خالی باشد و کلید را به مدت ۲۰ میلی‌ثانیه ببندیم، خازن چه‌قدر شارژ می‌شود؟

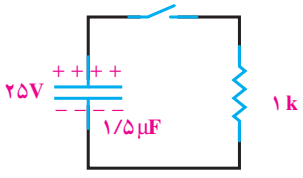
(جواب : شارژ کامل)



شکل ۲۵ــ ۱۵

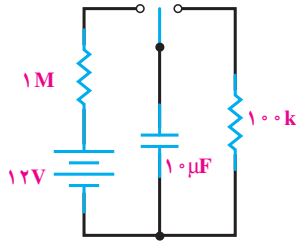
۵ ــ در مدار شکل ۲۶ــ۱۵ خازن دارای شارژ کامل است. کلید را به‌مدّت ۳ میلی‌ثانیه می‌بندیم. چه ولتاژی از خازن خالی می‌شود؟

(جواب : ۲۱/۶ ولت)



شکل ۲۶ــ۱۵

۶ــ با توجه به مدار شکل ۲۷ــ۱۵ جدول زیر را برای یک تا ۵ ثابت زمانی کامل کنید.



شکل ۲۷ــ۱۵

دشارژ		شارژ	
مقدار ولتاژ ولت	زمان ثانیه	مقدار ولتاژ ولت	زمان ثانیه
۴/۴۱۶	۱	۷/۵۸۴	۱۰
۱/۶۲۶	۲	۱۰/۳۷۴	۲۰
۰/۵۱۷	۳	۱۱/۴۰۱	۳۰
۰/۲۲۱	۴	۱۱/۷۷۶	۴۰
۰/۰۸۲	۵	۱۱/۹۱۸	۵۰

دشارژ		شارژ	
مقدار ولتاژ ولت	زمان ثانیه	مقدار ولتاژ ولت	زمان ثانیه