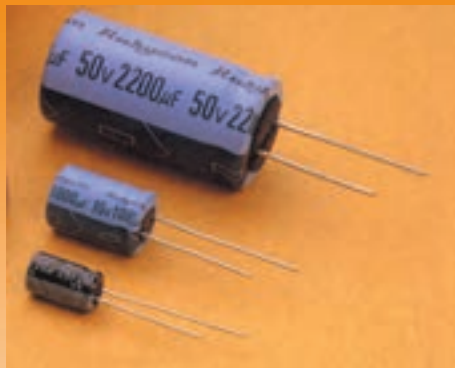


## خازن در جریان مستقیم

هدف‌های رفتاری



- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود:
- ۱- خازن را تعریف کند و ساختمان آن را شرح دهد.
- ۲- ظرفیت خازن را تعریف کند.
- ۳- ضریب دی‌الکتریک را توضیح دهد.
- ۴- واحد ظرفیت و عوامل مؤثر در آن را شرح دهد و ظرفیت خازن را محاسبه کند.
- ۵- رفتار خازن را در مدارهای DC بیان کند.
- ۶- چگونگی شارژ و دشارژ خازن را بیان کند.
- ۷- ثابت زمانی را بیان و منحنی شارژ و دشارژ را رسم کند.
- ۸- انرژی ذخیره‌شده و ثابت زمانی را محاسبه کند.
- ۹- ظرفیت معادل خازن‌های سری را محاسبه کند.
- ۱۰- ظرفیت معادل خازن‌های موازی را محاسبه کند.

### ۱۵-۱- خازن

آن‌ها خازن‌های مسطح هستند. این نوع خازن‌ها از دو صفحه‌ی هادی که بین آن‌ها عایق یا «دی‌الکتریک» قرار دارد، تشکیل می‌شوند. شکل ۱۵-۱ 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  $\epsilon$  نمایش می‌دهند.

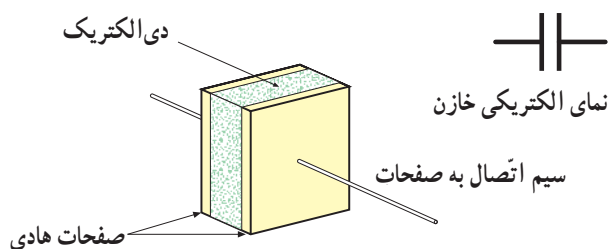
خازن وسیله‌ای الکتریکی است که در مدارهای الکتریکی اثر خازنی ایجاد می‌کند. اثر خازنی خاصیتی است که سبب می‌شود مقداری انرژی الکتریکی در یک میدان الکترواستاتیک ذخیره شود. به تعبیر دیگر، خازن‌ها عناصری هستند که می‌توانند مقداری الکتریسیته را به صورت یک میدان الکترواستاتیک در خود ذخیره کنند. همان گونه که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

### ۱۵-۳- شارژ خازن با ولتاژ DC

برای این که یک خازن شارژ شود - یعنی انرژی الکتریکی را ذخیره کند - باید آن را به یک اختلاف پتانسیل (ولتاژ) وصل کرد. این ولتاژ به وسیله ی یک باتری تأمین می شود. قطب مثبت باتری، به یک طرف و قطب منفی آن به طرف دیگر خازن - مانند شکل ۱۵-۳- وصل می شود. قبل از بستن کلید، صفحات خازن خنثی است و هیچ انرژی ای ذخیره نخواهد شد.

با بستن کلید، الکترون ها از قطب منفی باتری به طرف صفحه ای که به این قطب متصل است جاری می شوند و در آن تراکم الکترون یا بار منفی ایجاد می کنند. در همین لحظه، قطب مثبت باتری همان تعداد الکترون را از صفحه ای که به این قطب متصل است جذب می کند و این صفحه، کمبود الکترون می کند و دارای بار مثبت می شود. در لحظاتی که خازن شارژ می شود، الکترون ها از طریق سیم های رابط به طرف قطب مثبت باتری حرکت می کنند، وارد باتری می شوند و از قطب منفی خارج می گردند. حرکت الکترون ها را در مدار، **عبور جریان در مدار** می گویند.<sup>۱</sup>

وارد و خارج شدن الکترون ها از صفحات خازن، میدان الکتریکی ساکن را بالا می برد و ولتاژی در خلاف جهت ولتاژ اعمال شده به دو سر خازن ایجاد می کند. ولتاژ ایجاد شده در خازن، با جاری شدن جریان در مدار مخالفت می کند. به تعبیر دیگر، ولتاژ خازن با ولتاژ باتری مخالفت می کند. هرچه ولتاژ دو سر خازن بیش تر می شود، ولتاژ مؤثر مدار - که تفاوت بین ولتاژ باتری و ولتاژ خازن است - کمتر می شود و در نتیجه، شدت جریان مدار کاهش می یابد. هرگاه ولتاژ خازن با ولتاژ باتری برابر شود، جریان در مدار متوقف می گردد. صفر شدن جریان در مدار، نشانه ی شارژ شدن کامل خازن است. خازن هیچ گاه با ولتاژی بیشتر از ولتاژ منبع شارژ نمی شود.



شکل ۱۵-۱- نمای یک خازن ساده

### ۱۵-۲- میدان الکتریکی

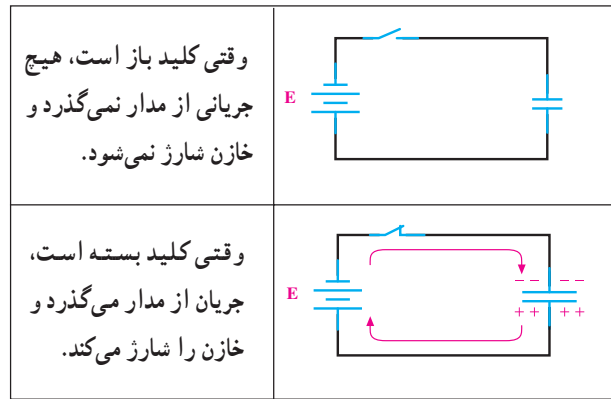
هنگامی که یک خازن شارژ می گردد، یک صفحه ی آن دارای بار منفی و صفحه ی دیگر دارای بار مثبت می شود. چون بار منفی به وسیله ی یک بار مثبت جذب می شود، الکترون های صفحه ی منفی مایل اند به طرف صفحه ی مثبت بروند اما عایق بین صفحات، امکان این حرکت را نمی دهد. الکترون ها نمی توانند از طریق عایق به طرف صفحه ی مثبت بروند اما یک نیروی الکتریکی که سبب جذب آن ها می شود، بین دو صفحه وجود دارد. این نیرو **میدان الکتریکی** نامیده می شود. میدان الکتریکی را نمی توان دید اما می توان آن را به صورت خطوط نیروی الکتریکی فرضی بین دو صفحه ی خازن نشان داد. هرچه شارژ روی صفحات خازن بیش تر باشد، میدان الکتریکی ایجاد شده قوی تر خواهد بود و در نتیجه، نیروی جاذبه ی بین صفحات بزرگ تر می شود. شکل ۱۵-۲- میدان الکتریکی بین صفحات خازن را نشان می دهد.

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

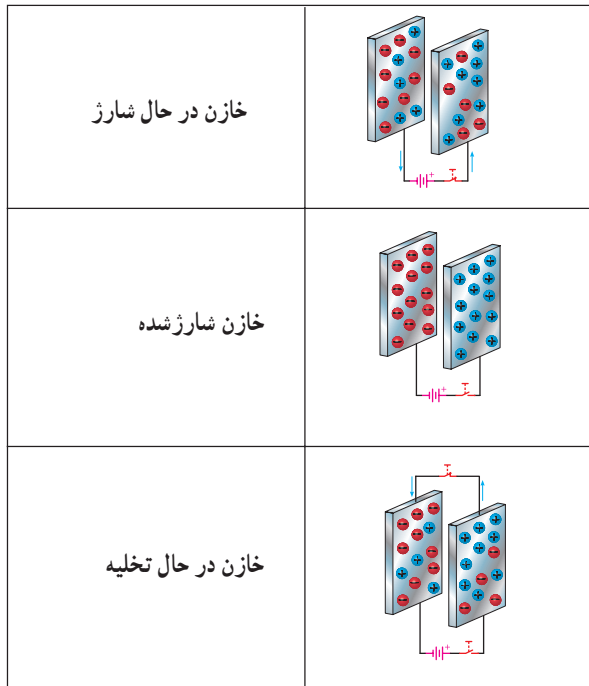
شکل ۱۵-۲- نمایش میدان الکتریکی بین صفحات خازن در حالت های مختلف

۱- طبق قرارداد، جهت جریان را در مدار برخلاف جهت حرکت الکترون ها در نظر می گیریم.

عمل از دست دادن شارژ را **دشارژ شدن** می نامند. برای دشارژ خازن تنها لازم است یک مسیر هادی بین دو صفحه ایجاد شود. با ایجاد مسیر، الکترون های صفحه ی منفی به طرف پتانسیل مثبت در صفحه ی مثبت جاری می شوند. تبادل الکترون بین صفحات آن قدر ادامه پیدا می کند تا صفحات خنثی شوند. در این موقع، خازن هیچ گونه ولتاژی ندارد و می گویند خازن دشارژ شده است. حرکت الکترون ها از مسیر ایجاد شده **جریان دشارژ** نامیده می شود. در شکل ۵-۱۵ شارژ و دشارژ خازن را مشاهده می کنید.

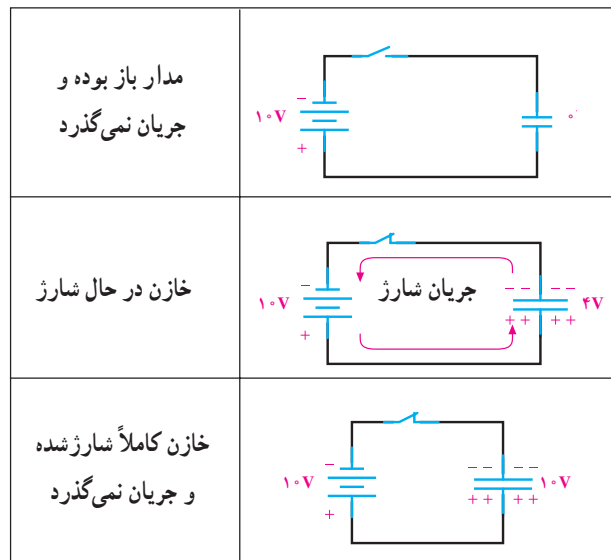


شکل ۳-۱۵- اتصال باتری و شارژ خازن



شکل ۵-۱۵- نمایش شارژ و دشارژ خازن

باید به این نکته توجه کرد که جریان شارژ و ولتاژ خازن مخالف یک دیگر عمل می کنند؛ یعنی، در ابتدای شارژ جریان ماکزیمم و ولتاژ خازن صفر است. هرچه به ولتاژ خازن اضافه می شود، شدت جریان کاهش می یابد. وقتی ولتاژ خازن به مقدار ماکزیمم خود می رسد، جریان صفر می شود. شکل ۴-۱۵ این مطلب را به روشنی نشان می دهد.



شکل ۴-۱۵- شارژ شدن خازن به اندازه ی ولتاژ باتری

### ۵-۱۵- ظرفیت خازن

ظرفیت یک خازن - که آن را با حرف C نمایش می دهند - نمودار میزان توانایی ذخیره کردن شارژ (بار) الکتریکی است. بنابه تعریف، ظرفیت خازن برابر است با مقدار بار الکتریکی که باید روی یکی از صفحات خازن جمع شود تا پتانسیل آن نسبت به صفحه ی دیگر به اندازه ی یک ولت افزایش یابد. به عبارت دیگر، خارج قسمت بار الکتریکی (Q) ذخیره شده روی هر یک از صفحات خازن بر اختلاف پتانسیل (V) میان دو صفحه را **ظرفیت** آن خازن گویند. به عبارت دیگر، می توان گفت که میزان ذخیره شدن

### ۴-۱۵- دشارژ (تخلیه) خازن

یک خازن شارژ شده باید شارژ خود را به مدت نامحدودی نگاه دارد؛ درحالی که این امر عملی نیست. با جدا شدن منبع شارژ از خازن، دیر یا زود خازن شارژ (بار) خود را از دست می دهد.

مثال ۲: خازنی با ظرفیت  $40 \mu\text{F}$  را به ولتاژ  $50^\circ$  ولت اتصال می‌دهیم. مقدار بار ذخیره شده چه قدر است؟  
راه حل:

$$Q = CV$$

$$Q = 40 \times 10^{-6} \times 50 = 2000 \mu\text{C}$$

مثال ۳: به دو سر خازن  $10 \mu\text{F}$  چه ولتاژی بدهیم تا باری معادل  $10 \mu\text{C}$  در آن ذخیره شود؟  
راه حل:

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

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

## ۱۵-۶- عوامل مؤثر بر ظرفیت خازن

مهم ترین عوامل مؤثر در تعیین ظرفیت خازن عبارت‌اند از:

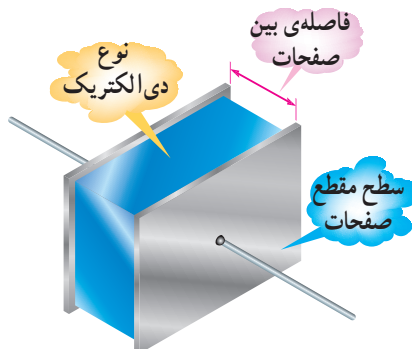
۱- مساحت صفحات

۲- فاصله‌ی بین صفحات

۳- دی الکتریک به کار رفته بین صفحات

ظرفیت یک خازن فقط<sup>۲</sup> به ابعاد و نوع عایق بستگی دارد

نه به مقدار ولتاژ و بار ذخیره شده در آن. شکل ۱۵-۶ عوامل مؤثر در ظرفیت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵-۶- عوامل مؤثر بر ظرفیت خازن

شارژ الکتریکی به ظرفیت خازن‌ها بستگی دارد. در یک ولتاژ برابر خازنی که ظرفیت کم‌تری دارد، بار کم‌تر و آن که ظرفیت 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<sup>۱</sup> بار ذخیره شده در هریک از صفحات خازنی که به اختلاف پتانسیل یک ولت اتصال داده شده باشد. با توجه به تعریف ارائه شده، 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 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 ۱-۱۵ واحدهای کوچکتر خازن و ضرایب آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱۵

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

مثال ۱: یک خازن در اثر اعمال  $20^\circ$  ولت به دو سر آن باری معادل  $80^\circ$  کولن را ذخیره می‌کند. ظرفیت خازن چه قدر است؟  
راه حل:

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

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

۱- کولن (Coulomb) واحد بار الکتریکی است و مقدار آن بار  $1.6 \times 10^{-19}$  الکترون می‌باشد.

۲- 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

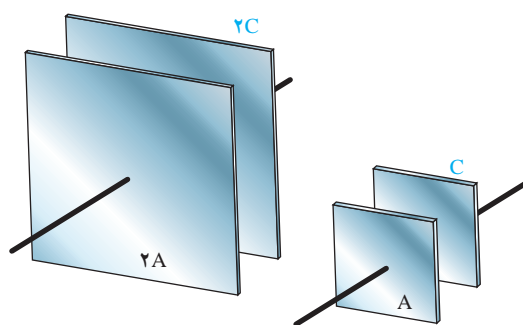
می‌گذارند؛ به طوری که می‌توان در بعضی مواقع از آن‌ها صرف نظر کرد.

دو برابر شدن مساحت صفحات، ظرفیت خازن دو برابر می‌شود و برعکس، در صورت نصف شدن مساحت صفحات ظرفیت خازن نیز نصف می‌شود. شکل ۷-۱۵ نسبت بین ظرفیت و مساحت صفحات را نشان می‌دهد.

۲- تأثیر فاصله‌ی بین صفحات: همان‌گونه که در شکل ۸-۱۵ مشاهده می‌کنید، در صورت کم یا زیاد شدن فاصله‌ی بین صفحات، ظرفیت خازنی متقابلاً زیاد یا کم می‌شود؛ یعنی، مقدار ظرفیت خازن با فاصله‌ی بین صفحات آن، نسبت عکس دارد. هرچه فاصله‌ی بین دو صفحه کم تر باشد، مقدار ظرفیت خازن بیش تر است و برعکس، هرچه فاصله‌ی صفحات بیش تر باشد، مقدار ظرفیت خازن کم تر 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.

۱- تأثیر مساحت صفحات: در صورت ثابت بودن فاصله‌ی بین صفحات دو خازن و استفاده از یک نوع دی‌الکتریک در آن‌ها، خازنی که دارای صفحات بزرگ تر است، ظرفیت بیش تری خواهد داشت، زیرا هر چه صفحات بزرگ تر باشند، بار بیش تری روی آن‌ها ذخیره می‌شود. بنابراین، در صورت ثابت نگه داشتن عایق و فاصله‌ی بین صفحات، ظرفیت خازن با مساحت صفحات نسبت مستقیم دارد؛ یعنی، با



ظرفیت خازن سمت راست، نصف ظرفیت خازن سمت چپ است.

شکل ۷-۱۵- تأثیر مساحت صفحات بر ظرفیت خازن

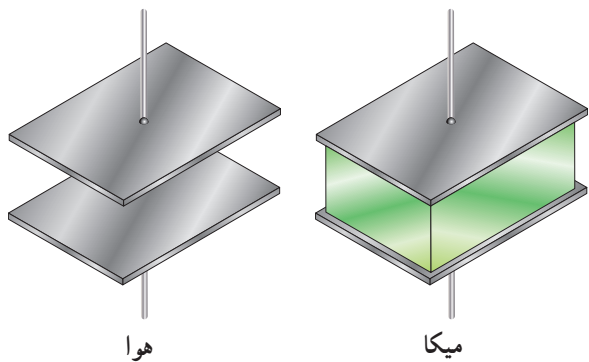
ظرفیت زیاد	ظرفیت متوسط	ظرفیت کم
فاصله‌ی صفحات کم	فاصله‌ی صفحات متوسط	فاصله‌ی صفحات زیاد

شکل ۸-۱۵- تأثیر فاصله‌ی بین صفحات بر ظرفیت خازن

درحالی که برخی دیگر ظرفیت کوچکی تولید می‌کنند و در نتیجه، دی‌الکتریک‌های ضعیفی هستند. تفاوت بین دی‌الکتریک‌های خوب و ضعیف، از چگونگی تأثیر نیروی الکترواستاتیکی بر مولکول‌های دی‌الکتریک مشخص می‌شود. شکل ۹-۱۵ تأثیر دی‌الکتریک را بر ظرفیت خازن نشان می‌دهد.

۳- اثر دی‌الکتریک: ماده‌ی عایق مورد استفاده بین صفحات خازن را **دی‌الکتریک** گویند. دی‌الکتریک به کار رفته در خازن‌ها می‌تواند هوا، خلاء، کاغذ، شیشه، میکا و ... باشد. بعضی از دی‌الکتریک‌ها به علت این که ظرفیت خازنی بزرگی تولید می‌کنند، دی‌الکتریک‌های خوبی هستند.

حداکثر ولتاژی را که دی الکتریک بدون خطر می تواند تحمل کند، **قابلیت تحمل دی الکتریک** می نامند و آن را بر حسب  $V/mil$  (ولت بر میل) می سنجند. هر میل (mil) برابر  $\frac{1}{1000}$  اینچ است. در جدول ۱۵-۲ ضریب دی الکتریک ( $\epsilon_r$ ) و قابلیت تحمل دی الکتریک بعضی عایق ها نشان داده شده است؛ مثلاً اگر عایق خازنی از جنس میکا و فاصله ی بین صفحات آن یک میل باشد، حداکثر ولتاژی که این خازن می تواند تحمل کند و صدمه نبیند،  $1500$  ولت خواهد بود. اگر ولتاژ اعمال شده به خازن بیش از  $1500$  ولت شود، مولکول های دی الکتریک (میکا) می شکنند. در نتیجه، بین دی الکتریک و صفحات خازن، قوس الکتریکی ایجاد می شود و این خازن دیگر قابل استفاده نخواهد بود. اگر فاصله ی بین صفحات همین خازن را دو برابر کنیم (دو میل)، حداکثر ولتاژی که می تواند تحمل کند و خراب نشود،  $3000$  ولت است.



ظرفیت خازن سمت راست؛ پنج برابر ظرفیت خازن سمت چپ است.

شکل ۱۵-۹- تأثیر دی الکتریک بر ظرفیت خازن

## ۱۵-۷- ثابت دی الکتریک و قابلیت تحمل دی الکتریک

جنس دی الکتریک ها بر ظرفیت خازن اثر دارد؛ از این رو خواص دی الکتریکی مواد باید مورد توجه قرار گیرد. برای این منظور، خواص دی الکتریکی مواد نسبت به خواص هوا سنجیده می شود. ثابت دی الکتریک هوا را  $\epsilon_0$  و ثابت دی الکتریک هر ماده ی دیگر را  $\epsilon$  در نظر می گیرند. مقدار  $\epsilon$  برابر است با

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right]$$

$\epsilon_r$  ضریب یا عدد ثابتی است که نشان می دهد خاصیت دی الکتریک هر ماده چند برابر خاصیت دی الکتریک هواست. همان طور که قبلاً دیدیم، ظرفیت خازن با مساحت صفحات و نوع دی الکتریک، نسبت مستقیم و با فاصله ی بین صفحات، نسبت عکس دارد؛ بنابراین، می توان ظرفیت را به این صورت نوشت:

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

A مساحت صفحه و d فاصله ی بین دو صفحه را نشان

می دهد.

**مثال ۴:** ظرفیت خازنی را که مساحت صفحات آن  $0.05$  مترمربع و فاصله ی بین صفحات آن  $1$  سانتی متر و نوع دی الکتریک به کار رفته در آن میکا باشد، به دست آورید. **راه حل:** با استفاده از جدول ۱۵-۲ ضریب دی الکتریک ( $\epsilon_r$ ) برای میکا برابر ۵ است. هم چنین می دانیم که ثابت دی الکتریک هوا برابر است با  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ . بنابراین با توجه به مقادیر داده شده، مقدار C ظرفیت خازن را به دست می آوریم.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = 8.85 \times 10^{-12} \times 5 \left[ \frac{F}{m} \right]$$

$$A = 0.05 m^2$$

$$d = 0.1 \times 10^{-2} m$$

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

$$C = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 5 \times 0.05}{0.1 \times 10^{-2}} = 0.00221 \mu f$$

۱- خوانده می شود اپسیلون صفر.

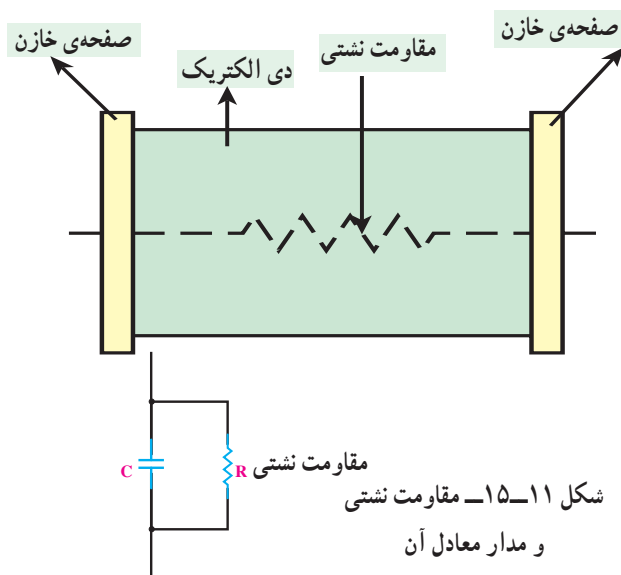
۲-  $2.54 cm = 1000 \times 0.001 \times 2.54 cm = 1000 \times 0.001 \times 2.54 cm = 2.54 cm = 1 mil$  است.

جدول ۲-۱۵- ضریب‌های دی‌الکتریک و قابلیت تحمل دی‌الکتریکی چند نوع عایق

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

### ۹-۱۵- نشت در خازن‌ها

دی‌الکتریک 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 به معنای 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 ۱۵-۱۱ مقاومت نشتی و مدار معادل آن را نشان می‌دهد. مقاومت نشتی معمولاً حدود مگا اهم است. در اثر کارکرد زیاد خازن، مقاومت نشتی آن به تدریج کاهش می‌یابد.



از جمله مشخصه‌های دیگر خازن ولتاژ کار آن است که همراه با ظرفیت روی بدنه‌ی خازن نوشته می‌شود و حتماً باید به آن توجه داشت. ولتاژ کار خازن حداکثر ولتاژ DC ای است که خازن می‌تواند در آن ولتاژ، کار عادی خود را انجام دهد؛ مثلاً خازن شکل ۱۵-۱۰ را که روی آن  $۲۲۰ \mu\text{F}/۵۰\text{V}$  نوشته شده است، می‌تواند تا  $۵۰$  ولت DC را تحمل کند و به کار خود ادامه دهد.



شکل ۱۵-۱۰

### ۸-۱۵- ضریب حرارتی

همان‌طور که تحت تأثیر حرارت مقدار مقاومت‌ها تغییر می‌یابد، در این‌جا نیز ضریب حرارتی، مقدار ظرفیت را نسبت به درجه حرارت تغییر می‌دهد. اگر ضریب حرارتی مثبت باشد، افزایش درجه حرارت، مقدار ظرفیت 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 ظرفیت می‌شود.

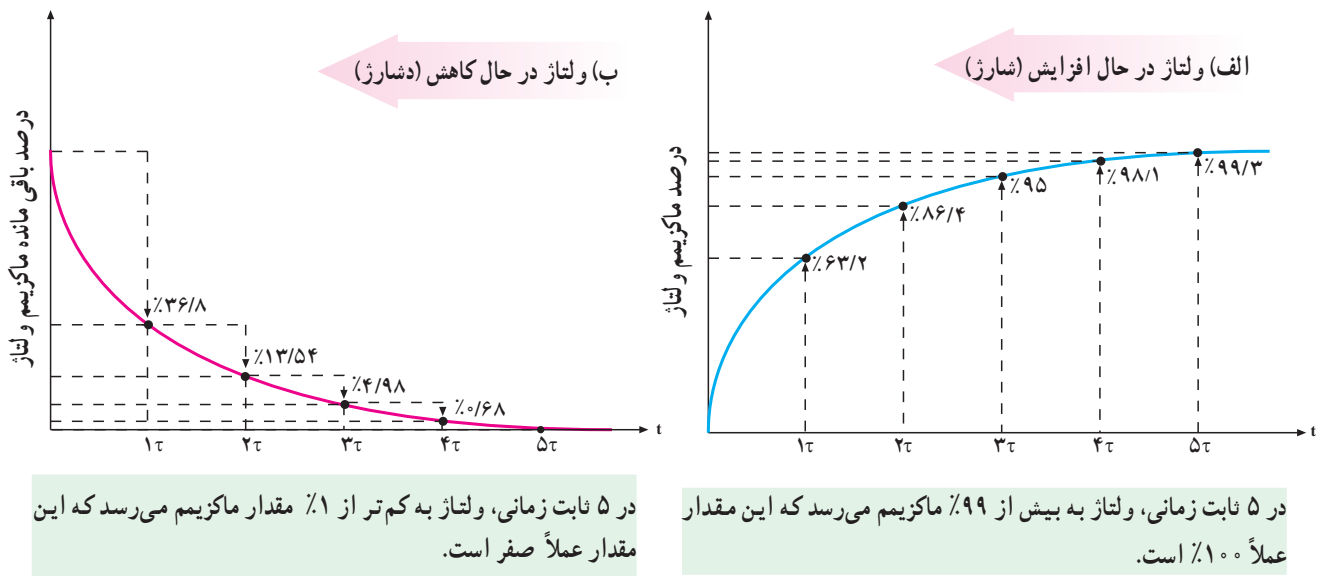
## ۱۰-۱۵- ثابت زمانی خازن

چنانچه خازنی به تنهایی در یک مدار DC قرار گیرد، به سرعت 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 ظرفیت خازن (C) بستگی دارد و به کمک رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود.

$$\tau = RC$$

$\tau$  را **ثابت زمانی خازن** گویند و آن، مدت زمانی است

که ولتاژ خازن به  $63/2$  درصد ولتاژ کل آن برسد. در هر ثابت زمانی بعدی، خازن به اندازه‌ی  $63/2$  درصد از ولتاژ باقی‌مانده شارژ می‌شود. شارژ کل خازن در حدود ۵ ثابت زمانی طول می‌کشد و خالی شدن خازن نیز در حدود همین مدت زمان انجام می‌گیرد. در ثابت زمانی اول  $63/2$  درصد از شارژ کامل خازن از بین می‌رود و در ثابت زمانی‌های بعدی به ترتیب  $63/2$  درصد از شارژ باقی‌مانده تخلیه می‌شود. در انتهای ۵ ثابت زمانی، خازن کاملاً تخلیه شده است. در جدول ۳-۱۵ رابطه‌ی شارژ و دشارژ با ثابت زمانی و در شکل ۱۲-۱۵ منحنی‌های شارژ و دشارژ خازن را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۲-۱۵- منحنی‌های شارژ و دشارژ خازن

جدول ۳-۱۵- درصد شارژ و دشارژ خازن از ولتاژ ماکزیمم

تعداد ثابت زمانی	درصد ماکزیمم ولتاژ دشارژ	تعداد ثابت زمانی	درصد باقی‌مانده ولتاژ دشارژ
۱	۶۳	۱	۳۷
۲	۸۶	۲	۱۴
۳	۹۵	۳	۵
۴	۹۸	۴	۲
۵	۹۹	۵	۱
	تقریباً ۱۰۰٪		تقریباً صفر



## ۱۱-۱۵- انرژی ذخیره شده در خازن

میدان الکترواستاتیکی ذخیره شده در خازن، دارای انرژی خواهد بود. این انرژی به وسیله ولتاژ منبع که خازن را شارژ کرده است، تأمین می شود. چنانچه منبع ولتاژ را از خازن قطع کنیم، خازن در مرحلهی دشارژ قادر به بازپس دادن این انرژی است. مقدار انرژی الکتریکی ذخیره شده در یک خازن از رابطه زیر به دست می آید.

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

C ظرفیت خازنی بر حسب فاراد، V ولتاژ دو سر خازن بر حسب ولت و W مقدار انرژی ذخیره شده بر حسب ژول است.

مثال ۶: مقدار انرژی یک خازن  $1 \mu F$  که با ولتاژ  $400^\circ$  ولت شارژ شده، چه قدر است؟  
راه حل:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

$$W = \frac{1}{2} \times 1 \times 10^{-6} \times (400)^2$$

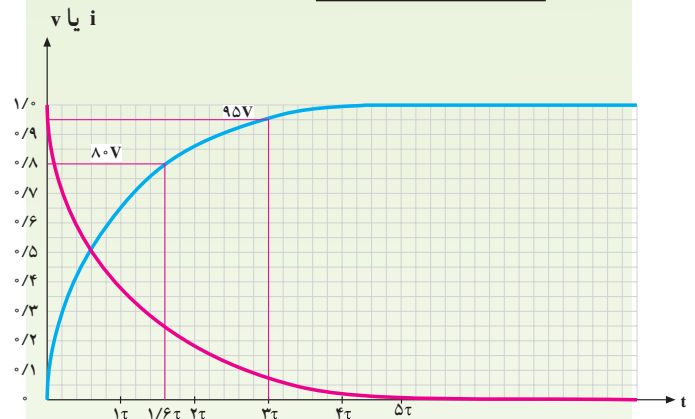
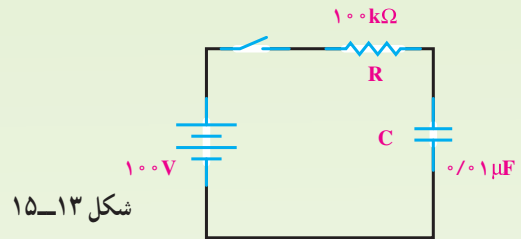
$$W = 0.08 \text{ ژول}$$

انرژی ذخیره شده در خازن شارژ شده، می تواند شوک الکتریکی تولید کند؛ حتی اگر به مداری بسته نشده باشد. اگر دو سر یک خازن شارژ شده را لمس کنید، ولتاژ دو سر آن در بدن یک جریان تخلیه ایجاد می نماید. انرژی ذخیره شده ی بیش تر از یک ژول در خازن شارژ شده با ولتاژهای زیاد می تواند شوک الکتریکی خطرناکی را سبب شود.

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

مثال ۵: مدار شکل ۱۳-۱۵ را در نظر می گیریم. پس از بستن کلید و با استفاده از منحنی شکل ۱۴-۱۵ الف: چه مدت طول می کشد تا ولتاژ دو سر خازن به  $80^\circ$  ولت برسد؟

ب: بعد از ۳ میلی ثانیه، ولتاژ دو سر خازن چه قدر می شود؟



شکل ۱۴-۱۵

راه حل:

ثابت زمانی مدار  $\tau = RC = 100 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} = 1 \text{ m sec}$   
در یک ثابت زمانی یا یک میلی ثانیه، خازن به اندازه ی  $63.2\%$  درصد ولتاژ کل - یعنی  $63.2/100$  ولت - شارژ می شود. اگر بخواهیم خازن  $80^\circ$  ولت شارژ شود، چنین عمل می کنیم:  
از روی محور عمودی که ولتاژ را نشان می دهد، مقدار  $80^\circ$  ولت را پیدا می کنیم و خطی موازی محور زمان (افقی) می کشیم تا منحنی شارژ را قطع کند. از آنجا نیز خطی موازی محور عمودی (ولتاژ) رسم می کنیم تا محور زمان را قطع کند. محل تقاطع محور زمان عدد  $1/6\tau$  را نشان می دهد؛ یعنی،  $1/6$  میلی ثانیه طول می کشد تا خازن به مقدار  $80^\circ$  ولت شارژ شود.  
در ۳ میلی ثانیه یا ۳ ثابت زمانی، ولتاژ دو سر خازن به  $95^\circ$  ولت می رسد. چرا؟ با رسم خطوطی موازی محورهای مختصات - همان طور که قبلاً گفته شد - مقدار  $95^\circ$  ولت به دست می آید.

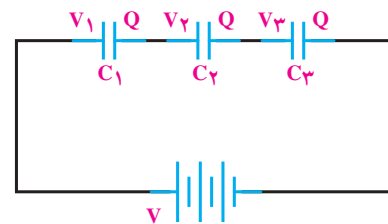
## ۱۲-۱۵- اتصال خازن‌ها

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

**الف - اتصال سری خازن‌ها:** در شکل ۱۵-۱۵ طرز به هم بستن سری خازن‌ها را مشاهده می‌کنید. در اتصال سری، فاصله‌ی مؤثر بین صفحات بیشتر می‌شود و ظرفیت معادل مجموعه‌ی خازنی کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل می‌بینید، تنها دو صفحه‌ی ابتدا و انتهای مجموعه‌ی خازنی که به مولد 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 اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه برابر حاصل جمع اختلاف پتانسیل‌های دو سر خازن‌هاست؛ یعنی:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (1)$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (2)$$



شکل ۱۵-۱۵- اتصال سری خازن‌ها

می‌دانیم که

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

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad \text{و} \quad V_2 = \frac{Q}{C_2} \quad \text{و} \quad V_3 = \frac{Q}{C_3} \quad (3)$$

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

$$\frac{Q}{C_t} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \quad (4)$$

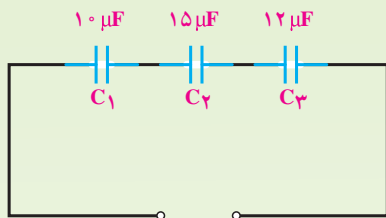
با حذف Q از طرفین رابطه چنین می‌شود:

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (5)$$

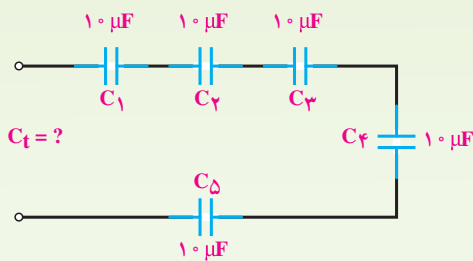
با رابطه‌ی ۵ ظرفیت خازن معادل را می‌توان محاسبه کرد. در صورتی که خازن‌ها با هم مساوی باشند، رابطه‌ی ظرفیت خازن معادل برای n خازن چنین است:

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

مثال ۷: ظرفیت معادل مدار شکل‌های ۱۵-۱۶ و ۱۵-۱۷ را به دست آورید.



شکل ۱۵-۱۶  
 $C_t = ?$



شکل ۱۵-۱۷

راه‌حل: مدار ۱۵-۱۶:

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{10} + \frac{1}{15} + \frac{1}{12} = \frac{6+4+5}{60} = \frac{15}{60}$$

$$C_t = \frac{60}{15} = 4 \mu\text{F}$$

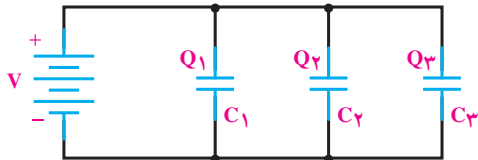
راه‌حل: مدار ۱۵-۱۷:

$$C_t = \frac{C}{n} = \frac{1 \mu\text{F}}{5}$$

$$C_t = 2 \mu\text{F}$$

**نتیجه:** خازن  $C_1$  که ظرفیت کمتری دارد، شارژ (ولتاژ) بیشتری را به خود گرفته است ( $50$  ولت).

**ب - اتصال موازی خازن‌ها:** شکل ۱۹-۱۵ اتصال چند خازن را به‌طور موازی نشان می‌دهد. در اتصال موازی خازن‌ها سطح مؤثر صفحات زیادتر می‌شود و ظرفیت معادل افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹-۱۵ - اتصال موازی خازن‌ها

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

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

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

$$Q = C_t V \quad (2)$$

$$Q_1 = C_1 V$$

$$Q_2 = C_2 V$$

$$Q_3 = C_3 V$$

$$C_t V = C_1 V + C_2 V + C_3 V$$

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

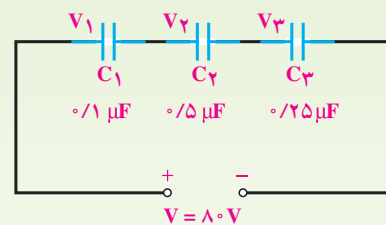
$$C_t = C_1 + C_2 + C_3$$

در صورتی که خازن‌های موازی یکسان باشند، ظرفیت کل برای  $n$  خازن برابر است با:

$$C_t = nC$$

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 ۱۸-۱۵ در صورتی که همه‌ی خازن‌ها شارژ کامل باشند، ولتاژ دو سر هر خازن را به‌دست آورید.



شکل ۱۸-۱۵

**راه‌حل:**

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.5} + \frac{1}{0.25} = \frac{5+1+2}{0.5} = \frac{8}{0.5}$$

$$C_t = \frac{0.5}{8} \mu F$$

در مدار سری مقدار بار خازن‌ها یکسان و برابر است با

$$Q_t = Q_1 = Q_2 = Q_3 = C_t V = \frac{0.5 \times 80}{8} = 5 \mu C$$

در این جا ولتاژ دو سر خازن‌ها برابر می‌شود با

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{5}{0.1} = 50 V$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{5}{0.5} = 10 V$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{C_3} = \frac{5}{0.25} = 20 V$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V = 50 + 10 + 20 = 80 V$$

### راه حل:

در این مدار  $C_1$  و  $C_2$  سری است که روابط سری را درباره‌ی این دو عمل می‌کنیم.  $C_3$  و  $C_4$  نیز با هم موازی‌اند و روابط موازی را درباره‌ی آن‌ها عمل می‌کنیم. در نهایت، مجموعه‌ی  $C_1$  و  $C_2$  با مجموعه‌ی  $C_3$  و  $C_4$  سری هستند و از قوانین سری پیروی می‌کنند. بنابراین، می‌توان نوشت:

$$C_{1,2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{6 \times 12}{6 + 12} = 4 \mu F$$

$$C_{3,4} = C_3 + C_4 = 10 + 6 = 16 \mu F$$

$$C_t = \frac{4 \times 16}{4 + 16} = \frac{16}{5} = 3.2 \mu F$$

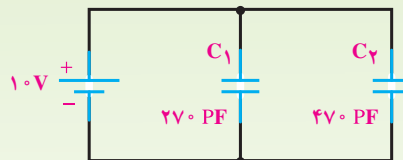
البته می‌توانستیم ابتدا ظرفیت  $C_{3,4}$  را حساب کنیم و سپس ظرفیت معادل را به صورت مجموعه‌ی سه خازن سری به دست آوریم.

## ۱۳-۱۵- جمع‌بندی خصوصیات و قوانین خازن‌های سری و موازی در مدارهای DC

<ul style="list-style-type: none"> <li>- بار ذخیره شده در هر خازن با بار کل برابر است.</li> <li>- ولتاژ کل با مجموع ولتاژهای جزء برابر است.</li> <li>- ظرفیت کل کاهش می‌یابد.</li> </ul>	مدار سری
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ولتاژ کل با ولتاژ دو سر هر خازن برابر است.</li> <li>- بار کل با مجموع بارهای جزء برابر است.</li> <li>- ظرفیت کل افزایش می‌یابد.</li> </ul>	مدار موازی

### مثال ۹: در مدار شکل ۱۵-۲۰ ظرفیت کل، ولتاژ و بار

دوسر هر خازن چه قدر است؟



شکل ۱۵-۲۰

راه حل: ظرفیت معادل برابر است با

$$C_t = C_1 + C_2 = 270 + 470 = 740 \text{ pF}$$

$$V = V_1 = V_2 = 10 \text{ V}$$

مقدار بار هر خازن نیز به راحتی محاسبه می‌شود.

$$Q_1 = C_1 V = 270 \times 10^{-12} \times 10 = 2.7 \times 10^{-9} \text{ کولن}$$

$$Q_2 = C_2 V = 470 \times 10^{-12} \times 10 = 4.7 \times 10^{-9} \text{ کولن}$$

### مثال ۱۰: ظرفیت معادل ۱۵ خازن ۱۰۰۰ میکروفارادی

را که به طور موازی بسته شده‌اند، حساب کنید.

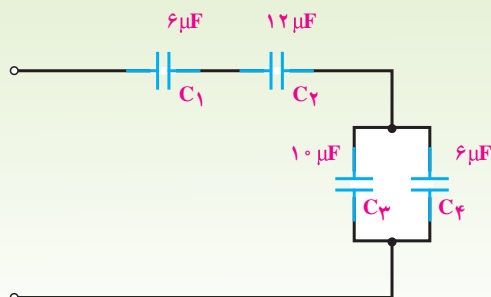
$$C_t = nC_1$$

$$C_t = 15 \times 1000 \mu F = 15000 \mu F$$

### ج- اتصال مختلط خازن‌ها: در اتصال مختلط خازن‌ها

از قوانین مربوط به اتصال سری و موازی متناسب با روش انجام شده استفاده می‌کنیم؛ یعنی، ابتدا کل مجموعه را به مجموعه‌های جزء سری و موازی تقسیم می‌کنیم؛ آنگاه معادل مجموعه‌های جزء را به دست می‌آوریم و سپس قوانین سری و موازی را درباره‌ی آن‌ها اجرا می‌کنیم.

### مثال ۱۱: ظرفیت کل مدار شکل ۱۵-۲۱ چه قدر است؟



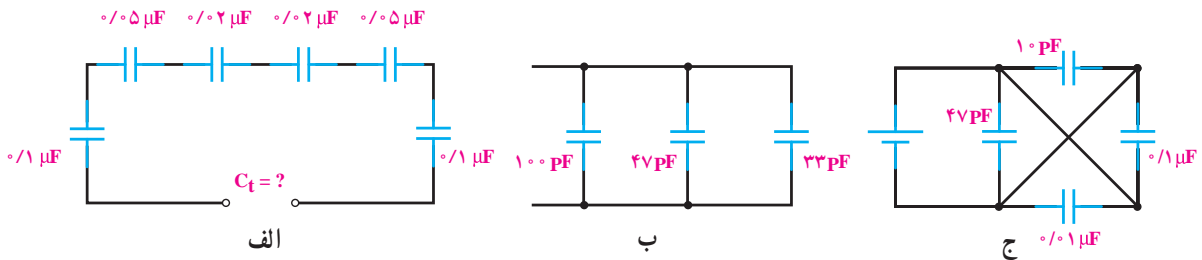
شکل ۱۵-۲۱



- ۱- شارژ و دشارژ را تعریف کنید.
- ۲- میدان الکترواستاتیکی چگونه پدید می آید؟
- ۳- ظرفیت خازن به چه عواملی بستگی دارد؟
- ۴- چرا دی الکتریک را در خازن به کار می بریم؟
- ۵- منظور از قابلیت تحمل دی الکتریک یک ماده چیست؟
- ۶- ثابت زمانی یک مدار RC را توضیح دهید و رابطه ی آن را بنویسید.
- ۷- خصوصیات مدار سری و موازی خازنی را با یک دیگر مقایسه کنید.

۱- در مدارهای شکل ۲۲-۱۵ مقدار  $C_t$  را حساب کنید.

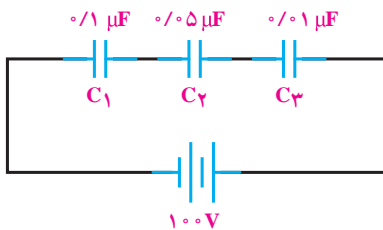
(جواب: ج -  $110 \cdot 57 \text{ pF}$     ب -  $180 \text{ pF}$     الف -  $6/25 \text{ nF}$ )



شکل ۲۲-۱۵

۲- ولتاژ دو سر هر خازن مدار شکل ۲۳-۱۵ در صورت شارژ بودن همه ی آنها چه قدر است؟

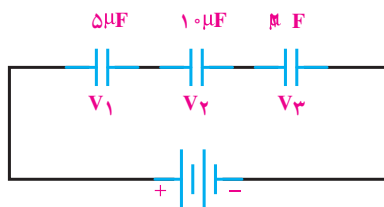
(جواب:  $V_3 = \frac{1000}{13}$ ,  $V_2 = \frac{1000}{65} \text{ V}$ ,  $V_1 = \frac{1000}{13} \text{ V}$ )



شکل ۲۳-۱۵

۳- در مدار شکل ۱۵-۲۴ اگر مقدار بار ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها  $10^6$  میکروکولن باشد، ولتاژ دو سر هر خازن چه قدر است؟

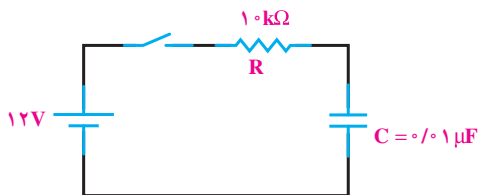
(جواب:  $V_3 = 50V, V_2 = 10V, V_1 = 20V, C_t = 1/25 \mu F$ )



شکل ۱۵-۲۴

۴- در مدار شکل ۱۵-۲۵ اگر خازن خالی باشد و کلید را به مدت  $20$  میلی ثانیه ببندیم، خازن چه قدر شارژ می‌شود؟

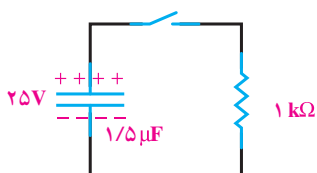
(جواب: شارژ کامل)



شکل ۱۵-۲۵

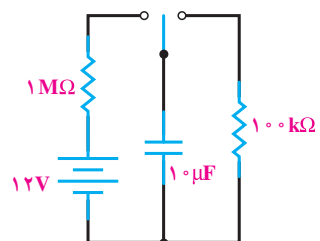
۵- در مدار شکل ۱۵-۲۶ خازن دارای شارژ کامل است. کلید را به مدت  $3$  میلی ثانیه می‌بندیم. چه ولتاژی از خازن خالی می‌شود؟

(جواب:  $21/6$  ولت)



شکل ۱۵-۲۶

۶- با توجه به مدار شکل ۱۵-۲۷ جدول زیر را برای یک تا ۵ ثابت زمانی کامل کنید.



شکل ۱۵-۲۷

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

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