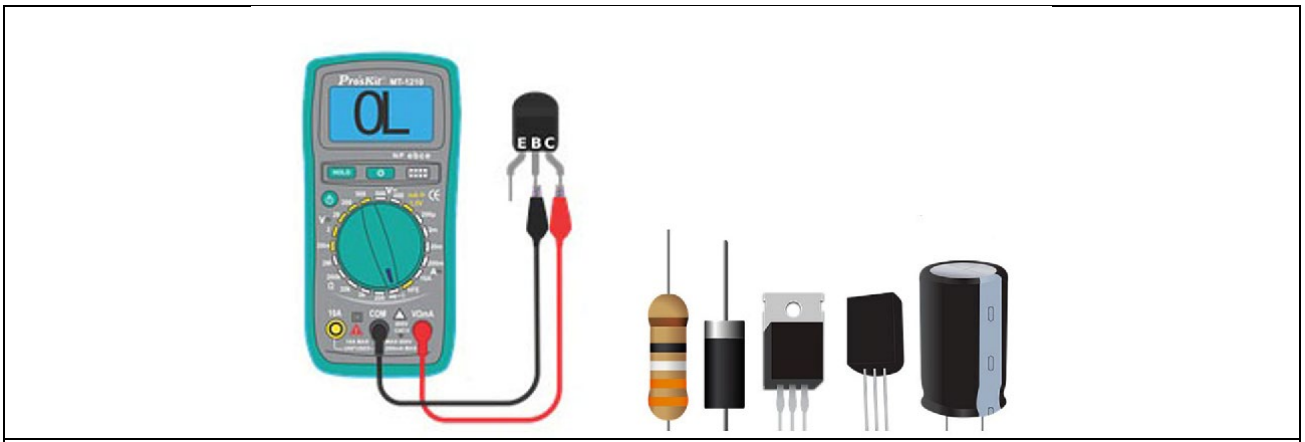
بسمه‌تعالی

مبانی مهندسی برق ۱



تهیه‌کننده:

دکتر سعید حسنوند

فصل اول

مفاهیم اولیه مدارهای الکتریکی

چهار کمیت اصلی مدارهای الکتریکی شامل بار الکتریکی و شار مغناطیسی و دو کمیت دیگر یعنی ولتاژ و جریان هستند که به دو کمیت اول وابسته هستند. در ادامه این کمیت ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۱- بار الکتریکی (q)

خاصیت فیزیکی ماده است و زمانی که در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد به آن نیرو وارد می‌شود. بار الکتریکی، دو نوع است: بار مثبت و بار منفی. بار مثبت دربردارنده پروتون‌ها و بار منفی دربردارنده الکترون‌ها می‌باشد. بارهای هم‌نام یکدیگر را دفع و بارهای ناهمنام یکدیگر را جذب می‌کنند. ماده ای که هیچ بار خالصی ندارد، از لحاظ الکتریکی خنثی است. در استاندارد بین‌المللی یکاها (SI) واحد بار الکتریکی کولُن (C) است. البته در مهندسی برق از یکای آمپر ساعت (Ah) نیز استفاده می‌کنند.

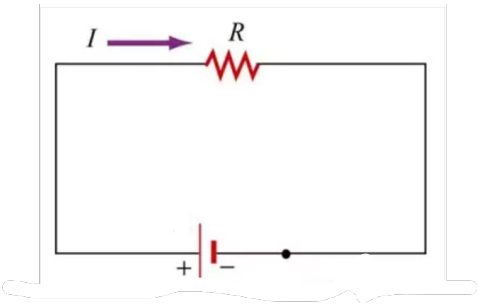
بار یک الکترون تقریباً برابر با $-1.6X10^{-16}$ کولُن و بار یک پروتون تقریباً برابر با $+1.6X10^{-16}$ کولُن است. در فیزیک قانونی به نام پایستگی بار وجود دارد که بار الکتریکی بوجود نمی اید و از بین هم نمی رود و فقط جابجا می شود.

۲- جریان الکتریکی (i)

جریان الکتریکی به جاری شدن بار الکتریکی گفته می‌شود. به معنای دیگر جریان الکتریکی به صورت نرخ تغییر بار الکتریکی نسبت به زمان تعریف شده که با نماد i نشان داده می‌شود. در یک مدار الکتریکی، بار الکتریکی را، اغلب، الکترون‌ها حمل می‌کنند. در استاندارد بین‌المللی یکاها (SI) واحد جریان آمپر (A) است. یک آمپر، برابر با گذر یک کولن بار الکتریکی در یک ثانیه از یک سطح است. فرمول زیر رابطه جریان را نشان میدهد.

$$i = \frac{dq}{dt}$$

در مواد رسانا الکترون های آزاد وجود داد که می توانند حرکت کنند و جریان بوجود آید. اما در مواد نارسانا و عایق الکترون آزاد وجود ندارد بنابراین جریان هم برقرار نمی شود. در هر قسمت از مدار ۲ جهت مثبت و منفی برای جریان می توان در نظر گرفت، اما قرار داد می شود که جهت جریان از اختلاف پتانسیل بیشتر به اختلاف پتانسیل کمتر است.



۳- ولتاژ یا اختلاف پتانسیل یا نیرو محرکه الکتریکی (V)

یکی از عوامل اساسی در عملکرد یک مدار الکتریکی، وجود اختلاف پتانسیل است که موجب ایجاد جریان الکتریکی برقرار شود. نیرویی که در داخل این ابزار سبب می‌شود تا این اختلاف پتانسیل در دو سر آن‌ها ایجاد شود، نیرو محرکه الکتریکی (Electromotive Force) نام دارد. در واقع، نیرو محرکه الکتریکی میزان نیرویی است که توسط باتری به بارهای الکتریکی وارد می‌شود تا به واسطه این نیرو، بارهای الکتریکی به حرکت دربیایند و جریان الکتریکی در مدار برقرار شود. لازم به ذکر است که نیرو محرکه الکتریکی از جنس نیرو نیست و کلمه نیرو صرفا برای نام‌گذاری آن به کاربرده شده است؛ زیرا این کمیت نه بر حسب نیوتن، بلکه در استاندارد بین‌المللی یکاها (SI) بر حسب ولت (V) بیان می‌شود. باتری‌ها و سلول‌های خورشیدی (Solar Cells) نمونه‌های بارزی از این کمیت هستند. در حقیقت نیرو محرکه الکتریکی، پمپ الکتریکی است که بارها را از پتانسیل کمتر به پتانسیل بیشتر منتقل می‌کند. از آنجا که خطوط میدان الکتریکی (E) همواره ذرات باردار را از پتانسیل بالاتر به پتانسیل پایین‌تر منتقل می‌کنند، پس به میزان کاری که میدان الکتریکی E، برای جابجایی بار آزمون q از نقطه A به B انجام می‌دهد، اختلاف پتانسیل (ΔV) گفته می‌شود.

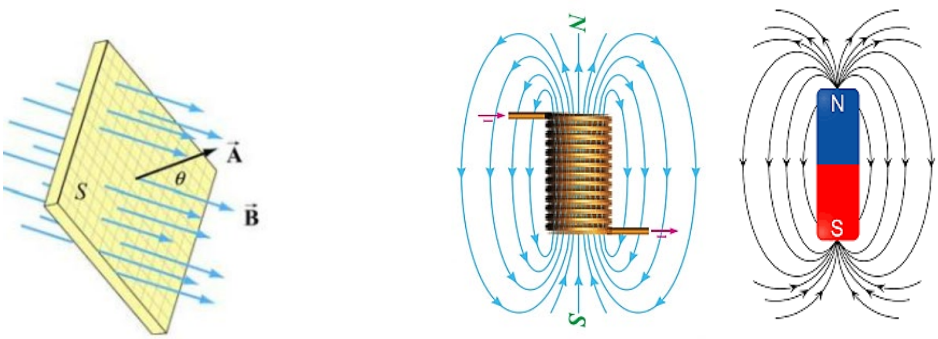
$$\Delta V = V_{AB} = \int_A^B f.dl = \int_A^B qE.dl = W$$

شکل (۱) : چند نمونه منبع ولتاژ - بارتی خودرو- باتری ۹ ولت و سلول خورشیدی

۴- شار مغناطیسی φ

شار یک کمیت مغناطیسی است و در واقع مؤلفه‌هایی از میدان مغناطیسی B است که از سطح مشخصی با مساحت A می‌گذرد. میدان مغناطیسی توسط اهنربا و یا سیم پیچی که در آن جریان الکتریکی وجود دارد ایجاد میشود. اگر شار توسط سیم پیچ ایجاد شود جهت آن با استفاده از قانون دست راست بدست می آید.

$$\varphi = \int B.ds \xrightarrow{B=cte} \varphi = BA\cos\theta$$



شکل (۲) : میدان مغناطیسی و شار

از طرفی مشابه جریان که از تغییرات بار بوجود می آید، فارادی اثبات کرد که از تغییرات شار ولتاژ تولید می شود.

$$V = \frac{d\varphi}{dt}$$

- **عناصر (المان) های اصلی مدار های الکتریکی**

المان های اصلی مدار های الکتریکی ارتباط دوتایی کمیت های الکتریکی قسمت قبل را نشان می دهند. این المان ها شامل مقاومت، خازن و سلف (القاگر) می شوند و در ادامه بررسی خواهند شد.

۱- مقاومت

مقاومتها یکی از معروف ترین و در عین حال پرکاربردترین قطعات در مدارات برق و الکترونیک هستند که از لحاظ نوع، مشخصات و کاربرد دارای انواع مختلفی می باشند. بیشترین دلیل استفاده شان جهت تقسیم ولتاژ و یا کنترل جریان در مدارهای الکتریکی است. این المان از نقطه نظر مداری ارتباط بین کمیت ولتاژ و جریان را نشان میدهد که قانون اهم نام دارد.

$$R = \frac{V}{I}$$

الف) انواع مقاومت ها

از نظر ساختاری می توان مقاومت ها را به سه دسته کلی تقسیم کرد که عبارتند از: مقاومت های ثابت، مقاومتهای متغیر و مقاومت های وابسته.

۱- مقاومت‌های ثابت:

مقدار این نوع از مقاومت ها ثابت است و بر خلاف دو دسته دیگر با تغییر عوامل محیطی مانند نور و گرما و همچنین از طریق حرکات مکانیکی نمی توان مقدارشان را تغییر داد. مقاومت های ثابت نسبت به انواع دیگر بیشترین کاربرد را در مدارهای الکتریکی دارند.

شکل (۱): انواع مقاومت‌های ثابت و نماد مداری آن

۲- مقاومت های متغیر:

نمونه آشنای این مقاومت ها ولوم هایی است که در وسایل برقی مانند رادیو و ضبط صوت جهت کنترل بلندی صدا به کار می روند که با چرخاندن دسته آنها می توان مقدارشان را از صفر تا حدی مشخص تغییر داد. مقاومت های متغیر نیز چه از لحاظ شکل ظاهری و چه از لحاظ نحوه تغییر مقاومت دارای انواع مختلفی هستند و به دو دسته کلی زیر تقسیم می شوند.

- پتانسیومتر که دارای سه پایه است و جهت تقسیم ولتاژ بکار می رود.
- رئوستا که دارای دو پایه است و جهت کنترل جریان به کار می رود.

شکل (۲): انواع مقاومت‌های متغیر و نماد مداری آن

۳- مقاومت های وابسته:

این نوع از مقاومت ها نیز دارای مقداری متغیر هستند. با این تفاوت که تغییر مقدار مقاومت در آنها به عوامل محیطی مانند نور، گرما و... وابسته است. مثلاً نوع وابسته به نور آنها بدین صورت عمل می کند که وقتی نور محیط افزایش پیدا کند به شکلی اتوماتیک مقدار مقاومت آن کم می شود و مانند یک کلید بسته عمل می کند. از این خاصیت مثلا برای روشن کردن خودکار روشنایی های معابر و خیابان ها بدون نیاز به دخالت نیروی انسانی استفاده می شود.

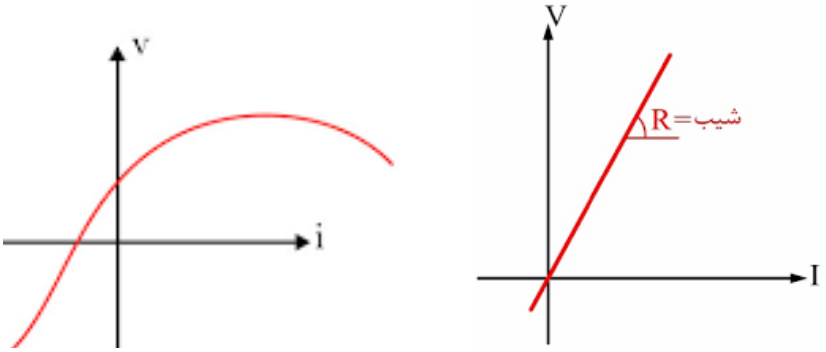
مقاومت های وابسته دارای انواع مختلفی هستند که برخی از آنها در ادامه ذکر شده اند:

- مقاومت وابسته به حرارت ((*Positive Temperature Coefficient*) **PTC** ,(*Negative Temperature Coefficient*) **NTC**)
- مقاومت وابسته به نور ((*Light Dependent Resistor*) LDR)
- مقاومت وابسته به ولتاژ ((*Voltage Dependent Resistor*) VDR)
- مقاومت وابسته به میدان مغناطیسی ((*Magnetic Dependent Resistor*) MDR)

شکل (۳): انواع مقاومت‌های وابسته

۴- مقاومت های خطی و غیر غیر خطی:

مقاومت‌های خطی دارای مشخصه‌ی V/I خطی (در واقع همان قانون اهم) و مقاومت‌های غیرخطی دارای مشخصه V/I غیرخطی هستند. در واقع در مقاومت‌های غیر خطی، ولتاژ و جریان به شکل غیرخطی تغییر می‌کنند و تغییرات آن‌ها وابسته به عواملی دیگر می‌باشد که ممکن است این وابستگی به صورت خطی نباشد. مقاومت های ثابت و متغیر خطی و مقاومتهای وابسته غیر خطی هستند.



شکل (۳): مشخصه مقاومت خطی (ثابت و متغیر) و مقاومت غیر خطی (وابسته)

ب) مشخصات مقاومت ها

مقاومت ها دارای مشخصاتی هستند که از جمله ی مهمترین آنها می توان به مقدار، تلورانس و توان اشاره کرد که در ادامه به تشریح هر یک از آنها خواهیم پرداخت.

۱- مقدار مقاومت:

مهمترین مشخصه یک مقاومت مقدار آن است. همانظور که هر پارامتری دارای واحدی است (مثلاً واحد طول متراست) مقاومت نیز دارای واحدی است که آن را " اهم" می نامند و نماد آن شکل Ω می باشد. و بر این اساس مقدار یک مقاومت را مثلا صد اهم می نامند و ۱۰۰Ω می نویسند. همچنین جهت سهولت در گفتار و نوشتار هر هزار اهم را یک کیلو اهم (1KΩ) و هر یک میلیون اهم را یک مگا اهم (1 MΩ) می گویند. مقدار برخی از مقاومت ها بر رویشان نوشته می شود. اما به دلیل اینکه سایز مقاومت های ثابت معمولا کوچک است، نوشتن مقدار بصورت عددی مشکل بوده و در صورت انجام آن نیز عدد نوشته شده یا به سختی خوانده می شود و یا به راحتی پاک می شود. در نتیجه برای حل این مشکل مقدار مقاومت ها را به وسیله نوارهای رنگی که دور تا دور آنهاست مشخص می کنند. هر رنگ نشان دهنده یک عدد است که به وسیله آن می توان مقدار مقاومت را مشخص کرد.

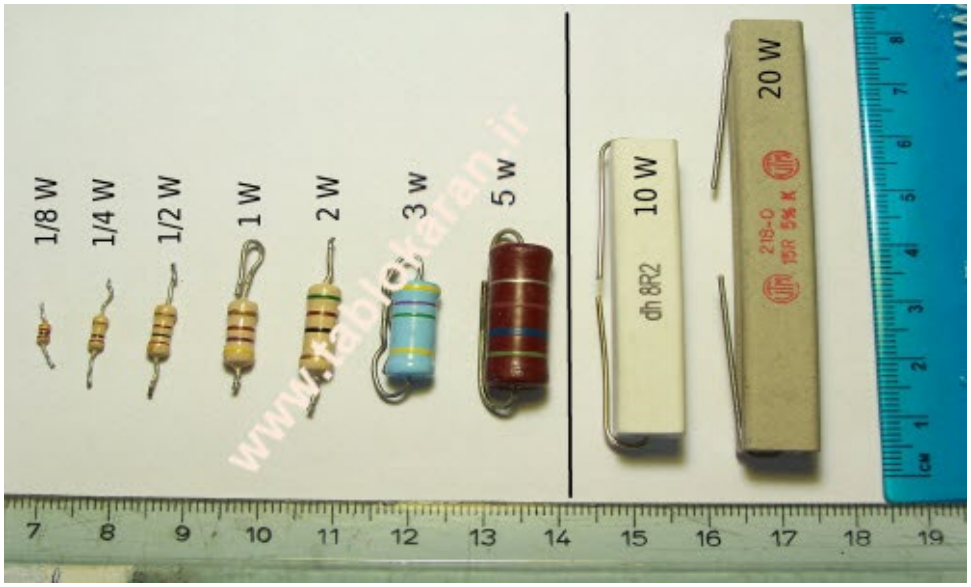
۲- تلورانس یا ضریب خطا:

همانطور که گفته شد مقدار مقاومت ها یا بصورت عددی بر روی آنها نوشته می شود و یا به وسیله نوارهای رنگی مشخص می گردد. اما این مقدار با دقت صد در صد نیست و در واقع سازندگان طی فرآیند تولید نمی توانند یا مقرون به صرفه نیست که دقیقاً مقدار مورد نظر را تولید کنند. در نتیجه مشخصه دیگری به نام تلورانس یا ضریب خطا برای مقاومت ها تعریف می شود که بر حسب درصد بیان می گردد. مثلاً اگر مقدار مندرج بر روی یک مقاومت ۱۰۰ اهم باشد و تلورانس

آن ٪۵ عنوان شود، مقدار واقعی این مقاومت ممکن است بین ۹۵ تا ۱۰۵ اهم باشد. یعنی مقدار واقعی یک مقاومت ممکن است به اندازه تلورانس آن کمتر یا بیشتر از مقدار مندرج بر روی آن باشد. ضریب خطا نیز در مقاومت های کوچک با نوارهای رنگی مشخص می شود که هر رنگ معادل درصدی خاص است.

۳- توان مقاومت:

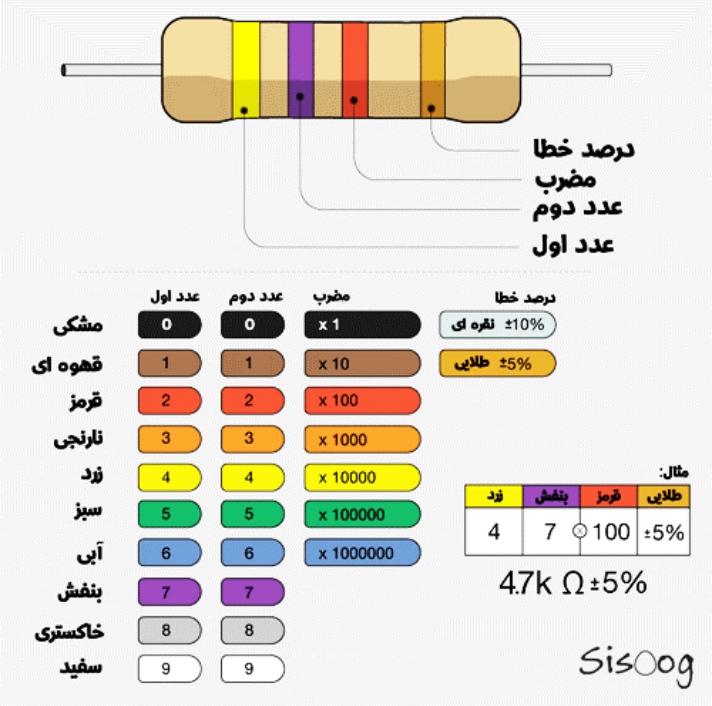
هر مقاومتی دارای توان کاری مشخصی است که یا بر روی آن نوشته می شود (در مقاومتهای سایز بزرگ) و یا در مقاومت های توان پایین از سایز آنها می توان مقدار توانشان را تشخیص داد. با توجه به استفاده علاوه بر مقدار مقاومت توان آن نیز باید در نظر گرفته شود. توان مقاومت ها را معمولاً با اصطلاحاتی نظیر $\frac{1}{8}$ (یک هشتم وات)، $\frac{1}{4}$ (یک چهارم وات)، $\frac{1}{2}$ (یک دوم وات)، ۱ وات ، ۲ وات و... نامگذاری می کنند که مثلاً منظور از $\frac{1}{4}$ این است که توان قابل تحمل آن مقاومت یک چهارم وات یا 0.25W (یا ۲۵۰ میلی وات) می باشد. هر چه سایز مقاومت بزرگتر باشد توانش نیز بیشتر است و در مقاومت های وات بالا که نمونه آنها مقاومت های آجری است مقدار توان بر رویشان نوشته می شود. در مقاومت های کوچکی که در آزمایشگاه استفاده می‌شود حداکثر توان قابل تحمل 0.5 تا 0.25 وات می باشد.



شکل (۴): حداکثر توان قابل تحمل مقاومت های مختلف

ج) محاسبه مقدار مقاومت توسط نوارهای رنگی

قریب به اتفاق مقاومت های موجود در بازار از ۴ باند رنگی جهت علامت گذاریشان استفاده می شود که در آن سه باند اول نشان دهنده مقدار مقاومت است و باند چهارم اندکی فاصله دارد تا در خواندن اشتباهی صورت نگیرد و درصد تلورانس را نشان می دهد. روش محاسبه مقدار مقاومت به وسیله نوراهای رنگی به این صورت است که معادل عددی رنگ اول و دوم را می نویسیم و به تعداد معادل عددی رنگ سوم صفر جلوی دو رقم اول می گذاریم. مثلا اگر نوارهای رنگی به ترتیب از سمت چپ قهوه ای، سیاه و قرمز بود قهوه ای معادل عدد یک، سیاه معادل عدد صفر، قرمز معادل عدد دو) معادل رنگ های قهوه ای و سیاه را به ترتیب می نویسیم که ۱۰ می شود و به تعداد معادل عدد قرمز که ۲ است صفر جلوی آن می گذاریم، در این مثال مقاومت معادل ۱۰۰۰ اهم یا یک کیلو اهم (1 KΩ) می شود.



شکل (۵): عدد معادل هر باند رنگی

گفتیم که در روش علامتگذاری بوسیله ۴ باند رنگی، سه باند اول نشان دهنده مقدار مقاومت و باند چهارم نشان دهنده درصد تلورانس است. حال اگر در مثال قبل که مقدار مقاومت ۱۰۰۰ اهم بود، رنگ چهارم طلایی باشد (معادل ۵٪) نشان دهنده این است که ضریب خطای این مقاومت ۵٪ است و در نتیجه مقدار واقعی آن می تواند بین ۹۵۰ تا ۱۰۵۰ اهم باشد.

تذکر ۱: اگر نوار سوم سیاه باشد به این معنی است که مقدار مقاومت همان عدد دو رقمی است و صفر اضافی ندارد.

تذکر ۲: در مقاومت های کمتر از ده اهم (یعنی یک رقمی ها) نوار سوم طلایی است. در این جور مقاومت ها عدد دو رقمی حاصل از نوار های اول و دوم را باید در "۰.۱" ضرب کنیم تا عدد مقاومت در بیاید. یعنی به طور خلاصه یک ممیز بگذاریم بین دوتا نوار!

تذکر ۳ : اگر نوار سوم نقره ای بود یعنی مقاومت زیر ۱ است، یعنی کلا مقدارش برابر کسری از اهم است و به یک اهم هم نمیرسد. در این جور مقاومت ها عدد دو رقمی حاصل از نوار های اول و دوم را باید در "۰.۰۱" ضرب کنیم. یعنی یک ممیز بگذاریم روی عدد و بعد بخوانیم!

نکته: مقاومتها با ۳، ۵ و ۶ نوار رنگی و رنگهای دیگر تلورانس نیز وجود دارد که بررسی آنها به خواننده واگذار میشود.

نکته: مقدار مقاومت های تولید شده دارای استانداردهایی هستند و این گونه نیست که در بازه ۱ تا ۱۰۰۰ اهم شما در بازار بتوانید ۱۰۰۰ نوع مقدار مقاومت را بیابید. مثلاً مقاومت ۲۷۰ اهم در بازار موجود است اما مقاومت ۲۷۵ اهم تولید نمی شود. چند نوع استاندارد برای مقدار مقاومت ها وجود دارد. اگر مقاومتی که نیاز دارید در رنج مقاومتهای استاندارد نبود می توانید مقداری نزدیک به آنرا تهیه کنید و یا با سری و موازی کردن مقاومت‌های موجود آن مقدار را بدست آورید.

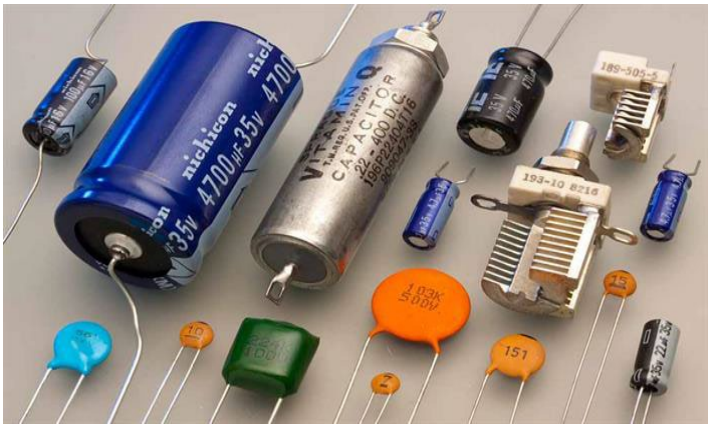
۲- خازن

خازن المان ذخیره کننده انرژی و در واقع ذخیره کننده بارهای الکتریکی است. پس از اتصال یک باتری به یک خازن، الکترون ها حرکت کرده و بر روی یک صفحه خازن جمع می شوند که این امر در زمان کوتاهی اتفاق می افتد و پس از آن خازن کاملا شارژ شده و دیگر الکترونی در مدار حرکت نخواهد کرد و در اصل جریان مدار که همان حرکت جهت دار الکترون ها است برابر با صفر می شود. تمامی اتفاقات فوق در بازه زمانی کوتاهی اتفاق می افتد. همچنین با اتصال دو سر یک خازن شارژ شده به یک مقاومت، می توان شارژ ذخیره شده در خازن را تخلیه نمود. این کار به این صورت اتفاق می افتد که با اتصال مقاومت به دو سر خازن ، یک مسیر برای حرکت الکترون ها از یک صفحه خازن به صفحه دیگر محیا می شود که باعث می شود با گذشت زمانی مشخص، بار موجود بر روی هر دو صفحه خازن با یکدیگر برابر و هم علامت شود.

خازن در واقع ارتباط بین کمیت ولتاژ و بار را نشان می دهد. ظرفیت خازن را به کمک رابطه زیر محاسبه میشود.

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

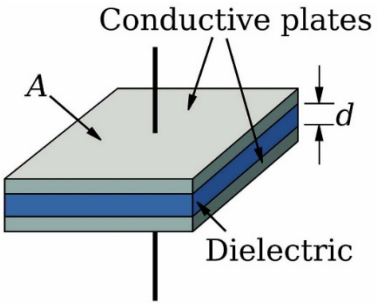
همانطور که از رابطه فوق مشخص است، ظرفیت خازن، نسبت بار ذخیره شده بر روی خازن به اختلاف پتانسیل اعمال شده به آن می باشد. این رابطه مشخص می کند که بار الکتریکی ذخیره شده بر روی یک خازن ۲ فارادی که به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت وصل شده، بسیار بیشتر از بار خازن ۱ فارادی متصل شده به همین ولتاژ است. خازن ها از کاربردی ترین قطعات الکتریکی می باشند که می توان به واسطه آن ها انرژی الکتریکی را به صورت موقت ذخیره سازی نمود.



شکل (۶): خازن و نماد مداری آن

ساختار خازن و محاسبه ظرفیت آن

خازن‌ها از دو صفحه رسانا با سطح مقطع مشخص تشکیل شده اند که این دو صفحه با فاصله ای مناسب از یکدیگر قرار گرفته اند. با اتصال خازن به یک منبع انرژی الکتریکی مانند باتری، الکترون ها به کمک اختلاف پتانسیل باتری بر روی یکی از صفحات خازن جمع می شوند و به همین دلیل الکترون های موجود بر روی صفحه دیگر خازن، جذب قطب مثبت باتری می شوند . در این حالت یک صفحه خازن دارای بار منفی بیشتری نسبت به صفحه دیگر است که با جدا کردن خازن از باتری، این اختلاف بار الکتریک بر روی صفحه خازن باقی خواهد ماند.



شکل (۷): ساختار خازن که از دو صفحه موازی و دی الکتریک تشکیل شده است

بسته به ابعاد صفحات، فاصله آن ها از یکدیگر و عایقی که بین دو صفحه خازن قرار می گیرد، میزان بار الکتریکی ذخیره شده بر روی صفحات خازن به ازای یک اختلاف پتانسیل مشخص و ثابت، تغییر می کند که این باعث به وجود آمدن پارامتر جدیدی به نام ظرفیت خازن می شود. ظرفیت یک خازن، بسیار وابسته به نوع ساخت و موادی که در ساخت خازن به کار می رود دارد و طبق رابطه زیر بدست می آید.

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

در رابطه فوق، A سطح مقطع صفحات خازن، d فاصله دو صفحه از یکدیگر و K ثابت دی الکتریک است. ظرفیت خازن با C نشان داده می شود و واحد آن به افتخار دانشمند بزرگ مایکل فارادی، فاراد نام گرفته است. همچنین لازم به ذکر است که واحد فاراد بسیار بزرگ بوده و عملا برای سنجش ظرفیت خازن از واحد های کوچکتر میلی فاراد ، میکرو فاراد ، نانو فاراد و پیکو فاراد استفاده می شود که مطابق رابطه زیر هر میلی فاراد ۱۰۰۰ برابر میکرو فاراد و هر میکرو فاراد ۱۰۰۰ برابر نانو فاراد است . پیکو فاراد نیز واحد بسیار کوچکی است که ۱۰۰۰ برابر کوچکتر از نانو فاراد است.

برخی از کاربرد های خازن

خازن ها، قطعات بسیار کاربردی در علم برق و الکترونیک هستند و می توان از آن ها در بسیاری از مدارت مانند سیستم های صوتی، مبدل های برق شهر (باتری) ، مدارات فرستنده و گیرنده مخابراتی، نوسان ساز ها و ... استفاده نمود. همچنین یکی از قطعاتی که بسیار در کنار خازن مورد استفاده قرار می گیرد، مقاومت است که در قسمت قبل توضیح داده شد. مقاومت ها به دلیل خاصیت محدود کننده جریان، باعث می شوند تا روند شارژ خازن ها کند تر پیش برود که این خاصیت دارای کاربرد فراوانی در طراحی مدارات الکتریکی و الکترونیک است.

الف) انواع خازن ها

خازن ها را می توان مانند سایر قطعات الکتریکی و الکترونیکی به روش های مختلف دسته بندی نمود. معروف ترین دسته بندی مربوط به خازن ها به شرح زیر است:

- دسته بندی بر اساس خازن های ثابت و متغیر
- دسته بندی بر اساس شکل ظاهری
- دسته بندی بر اساس عایق یا همان دی الکتریک بین صفحات با توجه به قطبی و غیر قطبی بودن آن

۱- خازن های ثابت و متغیر

بیشتر خازن های موجود در بازار دارای ظرفیت ثابتی می باشند که فقط با گذشت زمان ممکن است مقدار ظرفیت آن مقداری تغییر کند که آن نیز مربوط به درصد خطای خازن است.

اما گونه دیگری از خازن ها وجود دارد که می توان توسط یک پیچ و یا یک اهرم مقدار ظرفیت آن را نیز تغییر دهیم .به این نوع خازن، خازن متغیر یا Variable گویند که ممکن است با چرخش اهرم، سطح مقطع مشترک بین دو صفحه خازن، فاصله بین دو صفحه و یا ابعاد دی الکتریک درون خازن تغییر کند. با تغییر هر کدام از پارامتر ها گفته شده، ظرفیت خازن نیز تغییر می کند. کاربرد اصلی این خازن ها در مدارت فرستنده و گیرنده مخابراتی است و با تغییر ظرفیت خازن فرکانس نوسان ساز مدار یا فرکانس فیلتر دریافت در گیرنده تغییر می کند. به دلیل حساسیت مدارات مخابراتی، این خازن ها به صورت Multi Turn یا چند دور ساخته می شوند که این امر باعث می شود ، گام تغییر ظرفیت بسیار کوچک شود که این امر دقت ظرفیت خازن را افزایش می دهد. تصاویر زیر مربوط به مدل های مختلف خازن های متغیر است:

شکل (۸): مدل های مختلف خازن متغیر

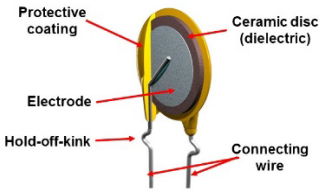
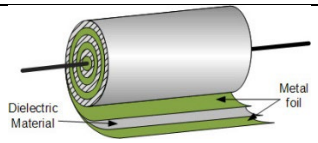
۲- شکل ظاهری خازن ها (خازن های پایه دار و خازن های SMD)

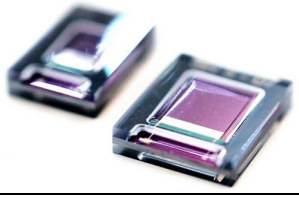
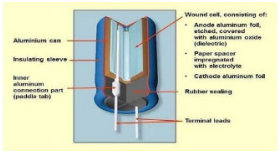
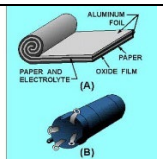
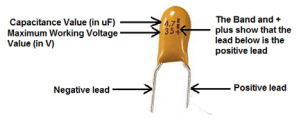
خازن های دارای مدل و ظاهرهای متنوعی می باشند که می توان در مدارت مختلف از آن ها استفاده نمود. خازن ها نیز مانند مقاومت ها به سه گروه پایه دار، نصب سطحی SMD و ترمینالی تقسیم بندی می شوند که بسته به نوع مدار چاپی طراحی شده انتخاب می شوند. نوع اول دارای پایه بوده که به درون سوراخ های برد مدار چاپی میرود و از پشت به برد لحیم می شود. نوع دوم بر روی سطح برد نصب می شود و ابعاد بسیار کوچکی داردکه در نتیجه ظرفیت آن نیز کم است. نوع سوم شامل خازن های ولتاژ بالا می شود و توسط زوج سیم به مدار متصل می شود.

شکل (۹): خازن های نصب سطحی SMD

۳- انواع خازن ها بر اساس نوع دی الکتریک یا همان عایق بین صفحات

این دسته بندی از اهمیت بالایی برخوردار است که دلیل اصلی نام گذاری انواع خازن ها می باشد. همانطور که در قسمت‌های قبل نیز گفته شد، با قرار دادن دی الکتریک یا همان عایق در بین صفحات خازن، ظرفیت خازن افزایش پیدا می کند. تولید کننده های قطعات الکتریکی و الکترونیکی، خازن ها را به روش های مختلف و با دی الکتریک های متنوعی تولید می کنند که در ادامه قصد داریم به شرح معروف ترین آن ها بپردازیم. یکی از مهم ترین دسته بندی خازن ها بر اساس نوع ساخت، دسته بندی خازن های قطبی و غیر قطبی است. در خازن های قطبی، بر خلاف خازن های غیر قطبی، پلاریته اتصال از اهمیت بالایی برخوردار است و در صورتی که قطبی مثبت و منفی منبع به اشتباه به خازن متصل شود، خازن دچار مشکل می شود و در برخی مواقع انفجار رخ می دهد. خازن های قطبی دارای ظرفیت بیشتری نسبت به خازن های غیر قطبی میباشند، اما از لحاظ حداکثر ولتاژ کاری، ضعیف تر از خازن های غیر قطبی هستند. در جدول زیر انواع خازن آورده شده است.

نوع خازن	توضیحات	شکل
خازن ها سرامیکی	دی الکتریک استفاده شده در این خازن ها از جنس سرامیک است ظرفیت خازنهای سرامیکی معمولاً بین ۵ پیکوفاراد تا ۰/۱ میکروفاراد است. این نوع خازن به صورت دیسکی (عدسی) و استوانه‌ای تولید می‌شود و فرکانس کار خازنهای سرامیکی بالای ۱۰۰ مگاهرتز است. از این خازن ها می توان در کاربرد هایی مانند کوپلاژ مدارت فرکانس بالا، مدارت فیلتر و نوسان ساز مخابراتی فرکانس بالا و منابع تغذیه استفاده نمود .مشکل بزرگ این خازن ها وابستگی ظرفیت به دما است که با افزایش دما، ظرفیت نیز مقداری تغییر می کند. به این خازن ها خازن های عدسی نیز گفته می شود.	
خازن های ورقه ای یا لایه ای Film Capacitor	این خازن ها از ورقه های فلزی و دی الکتریک پلاستیکی از جنس تفلون، پلی استر و پلی اتیلن تشکیل شده است که این ورقه ها مانند شکل (۱۶) به صورت استوانه ای پیچیده می شوند و در نهایت در داخل یک پکیج پلاستیکی مقاوم قرار داده می شود .به دلیل ساختار داخلی این خازن ها، پایه های بیرونی خازن به طور مستقیم به صفحه های خازن متصل می شود که این امر باعث کاهش خاصیت مقاومتی و سلفی داخلی می شود و این ویژگی مهندسین را قادر می سازد تا بتوانند از این خازن در مدارات تغذیه جریان متناوب و فرکانس بالا استفاده نمایند .رنج ولتاژ کاری در این خازن ها در بازه ۱۰ تا ۲۰۰۰ ولت است و ظرفیت آن ها در بازه کمتر از ۱۰۰ پیکو تا ۲۲ پیکو فاراد قرار می گیرد. لازم به ذکر است نوع دیگری از این خازن ها نیز موجود است که به Power Film Cap معروف هستند و در مدارت جریان متناوب با ولتاژ بالا در بازه ۱۰۰ ولت تا ۱۰۰ کیلو ولت از آن ها استفاده می شود.	
خازن هایی با عایق های طبیعی مانند میکا، شیشه، کاغذ و هوا	این خازن ها دارای تنوع بسیار زیادی می باشند که جنس دی الکتریک آن از مواد طبیعی مانند، میکا، شیشه، کاغذ و ... می باشد. هر کدام از این خازن ها دارای ویژگی های منحصر به فردی می باشند و از آن ها در کاربرد های خاص استفاده می شود.	
میکا	میکا، ماده ای پایدار از لحاظ الکتریکی است و خازن میکا به پایداری بالا مشهور هستند . مقدار این خازن ها در طول زمان بسیار کم تغییر می کند و همچنین نسبت به حرارت بسیار پایدار است. از این قطعات می توان در مدارت فرستنده و گیرنده های حساس و فرکانس بالای رادیویی استفاده نمود. لازم به ذکر است که این قطعات دارای نوع قدرت بالا نیز می باشند که می تواند تحت ولتاژ تا ۱۰۰ کیلو ولت نیز کار کند. از دیگر ویژگی های این نوع خازن، پایین بودن مقاومت و خاصیت سلفی داخلی است. عیب بزرگ این خازن ها، ابعاد و قیمت بالای آن ها می باشد که امروزه در مدارت غیر حساس از خازن های سرامیکی و ورقه ای به عنوان جایگزینی برای آن استفاده می شود.	

هوا	خازن با دی الکتریک هوا نیز در این دسته قرار می گیرد که لازم به ذکر است که این خازن ها بیشتر به صورت متغیر ساخته می شود و از ویژگی های آن می توان به ظرفیت کم، ولتاژ کاری بسیار بالا و مقاومت داخلی بسیار کم می باشد. از این خازن ها در فرستنده های قدرت بالا مانند فرستنده های نظامی برای از بین بردن تجهیزات الکتریکی استفاده می شود.	
کاغذ	خازن های کاغذی از لحاظ ساختار مانند خازن های ورقه ای هستند که در آن ها از کاغذ به عنوان دی الکتریک استفاده شده است.	
شیشه	خازن های شیشه ای به دو دسته خازن با دی الکتریک خلا و پوشش شیشه ای و خازن با دی الکتریک شیشه تقسیم می شوند که نوع اول، از همه لحاظ مانند خازن با دی الکتریک هوا است و نوع دوم، یکی از بهترین و گران قیمت ترین خازن های غیر قطبی است که از لحاظ پایداری، فرکانس و مقاومت داخلی در بهترین وضعیت قرار می گیرد.	
خازن های قطبی	خازن های قطبی به دو دسته خازن های الکترولیتی و SuperCapacitor تقسیم می شوند که نوع دوم شامل خازن هایی با ظرفیت بسیار بالا است و می توان از آن ها در بسیاری از مدارت به عنوان باتری استفاده نمود. این خازن ها را خازن های دو لایه نیز می نامند و دارای قیمت بسیار زیادی هستند. مشکل اصلی این خازن ها ولتاژ کاری بسیار کم آن ها است که می توان با سری کردن چند خازن، آن را برطرف نمود.	
خازن های الکترولیتی	این نوع خازنها معمولاً در رنج میکروفاراد هستند. خازنهای الکترولیتی همان خازنهای ثابت هستند، اما اندازه و ظرفیتشان از خازنهای ثابت بزرگتر است. نام دیگر این خازنها، خازن شیمیایی است. علت نامیدن آنها به این نام این است که دی‌الکتریک این خازنها را به نوعی مواد شیمیایی آغشته می‌کنند که در عمل، حالت یک کاتالیزور را دارا می‌باشند و باعث بالا رفتن ظرفیت خازن می‌شوند. برخلاف خازنهای عدسی، این خازنها دارای قطب یا پایه مثبت و منفی می‌باشند. روی بدنه خازن کنار پایه منفی، علامت – نوشته شده‌است. مقدار واقعی ظرفیت و ولتاژ قابل تحمل آنها نیز روی بدنه درج شده‌است. خازن‌های الکترولیتی در دو نوع آلومینیومی و تانتالیومی ساخته می‌شوند. یکی از کاربردهای گسترده این نوع خازن استفاده در مدار یکسوساز دیودی بعنوان فیلتر dc است.	
	خازن های آلومینیومی همانند خازنهای ورقه‌ای از دو ورقه آلومینیومی تشکیل شده‌است. یکی از این ورقه‌ها که لایه اکسید بر روی آن ایجاد می‌شود «آند» نامیده می‌شود و ورقه آلومینیومی دیگر نقش کاتد را دارد. ساختمان داخلی آن بدین صورت است که دو ورقه آلومینیومی به همراه دو لایه کاغذ متخلخل که در بین آنها قرار دارند هم زمان پیچیده شده و سیمهای اتصال نیز به انتهای ورقه‌های آلومینیومی متصل می‌شوند. پس از پیچیدن ورقه‌ها آن را درون یک الکترولیت مناسب که شکل گیری لایه اکسید را سرعت می‌بخشد غوطه‌ور می‌سازند تا دو لایه کاغذ متخلخل از الکترولیت پر شوند. سپس کل مجموعه را درون یک قاب فلزی قرار داده و با یک پولک پلاستیکی که سیمهای خازن از آن می‌گذرد محکم بسته می‌شود.	
	در خازن های تانتالیوم به جای آلومینیوم از فلز تانتالیوم استفاده می‌شود. زیاد بودن ثابت دی‌الکتریک اکسید تانتالیوم نسبت به اکسید آلومینیوم (حدوداً ۳ برابر) سبب می‌شود خازنهای تانتالیومی نسبت به نوع آلومینیومی درحجم مساوی دارای ظرفیت بیشتری باشند. محاسن خازن تانتالیومی نسبت به نوع آلومینیومی ابعاد کوچکتر، جریان نشتی کمتر و عمر کارکرد طولانی و از معایب آن قیمت بالاتر، حساس به افزایش ولتاژ و پلاریته و ظرفیت محدودتر(حد اکثر تا ۳۳۰ میکرو فاراد ساخته می‌شوند) می باشد	

ب) روش خواندن ظرفیت خازن ها

تولید کننده های قطعات الکتریکی و الکترونیکی، برای درج مشخصات خازن ها بر روی خود قطعه از دو روش کد رنگی و کد عددی استفاده می کنند. اما متاسفانه بسیاری از خازن های غیر قطبی، فاقد این دو کد بوده و بدون وجود بسته

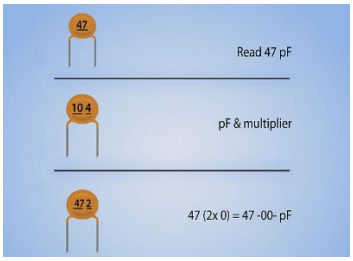
بندی اولیه خازن نمی توان از ظرفیت آن اطلاع پیدا کرد. برای اطلاع از ظرفیت دقیق هر خازنی می توان از دستگاهی به نام خازن سنج استفاده نمود که دارای دو ترمینال است و با اتصال خازن به آن می توان از مقدار ظرفیت آن اطلاع پیدا کرد. همچنین دستگاه دیگری به نام LRC سنج نیز وجود دارد که توسط آن می توان علاوه بر اندازه گیری ظرفیت خازن، اهم مقاومت و اندوکتانس سلف، از مقدار مقاومت و سلف موجود در ساختار خازن اطلاع پیدا کنیم. نمونه ای از این دستگاه اندازه گیری را می توانید در تصویر زیر مشاهده نمایید.

شکل (۱۰): دستگاه LRC سنج

لازم به ذکر است که خازن های الکترولیتی، فاقد این دو کد می باشند و ظرفیت آن ها بر حسب واحد فاراد به همراه حداکثر ولتاژ کاری بر روی خازن نوشته می شود. همچنین کد های رنگی، امروزه دیگر استفاده نمی شود و بیشتر مربوط به خازن های قدیمی است که دیگر از رده خارج شده اند.

شکل (۱۱): خازن های الکترولیتی و مقدار طرفیت خازن و ولتاژ کاری

مطابق شکل (۱۲) در صورتی که عدد نوشته شده بر روی خازن ۲ رقمی باشد ، عدد نوشته شده همان ظرفیت بر حسب پیکو فاراد است و در صورتی که از چند رقم استفاده شده باشد، تمامی رقم ها در کنار هم می نویسیم و معادل رقم آخر صفر جلوی آن ها قرار می دهیم. عدد بدست آمده ظرفیت خازن بر حسب پیکو فاراد است. معروف ترین خازن عدسی یا همان خازن سرامیکی، خازن ۱۰۴ است که ظرفیت آن برابر است با ۱۰۰۰۰۰ پیکو فاراد یا ۱۰۰ نانو فاراد و یا می توانیم آن را ۰.۱ میکرو فاراد بنویسیم.



شکل (۱۲): نحوه خواندن کد عددی خازن ها

ج) مدلسازی مداری خازن

از آنجا که برای تحلیل مدارهای الکتریکی روابط بر اساس ولتاژ و جریان نوشته میشوند، جریان خازن از رابطه زیر بدست می آید:

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

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{dCV}{dt} = C\frac{dV}{dt}$$

مشاهده می‌شود جریان خازن با مشتق ولتاژ آن ارتباط دارد که به این معنی است که در مدارات با وجود خازن روابط مداری به معادله دیفرانسیل تبدیل خواهند شد.

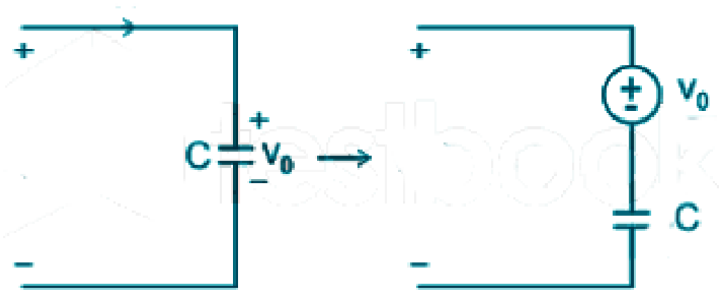
نکته: اگر ولتاژ خازن عددی ثابت باشد جریان آن که مشتق ولتاژ است صفر خواهد شد بنابراین بعد از شارژ شدن کامل خازن و رسیدن ولتاژ آن به مقدار ثابت دیگر جریانی از آن نمی‌گذرد یعنی جریان صفر میشود و مدار باز میشود.

نکته: هرگاه جریان خازن محدود باشد dV/dt نیز محدود است. یعنی ولتاژ خازن تابعی پیوسته از زمان است و به طور ناگهانی تغییر نمیکند.

در صورت معلوم بودن جریان، برای بدست آوردن ولتاژ باید از رابطه بالا انتگرال گرفته شود تا ولتاژ در هر زمان تعیین شود.

$$Vc = \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt + V_0$$

از این رابطه نتیجه میشود که خازن یک المان حافظه دار است چون مقدار ولتاژ اولیه V_0 را ذخیره می‌کند. بنابراین می‌توان یک خازن با ولتاژ اولیه را به صورت یک خازن دشارژ به همراه یک منبع ولتاژ موقت مدل کرد.



د) انرژی ذخیره شده در خازن و کاربرد آن

همانطور که گفته شد، با اتصال خازن به منبع انرژی الکتریک مانند باتری، بار الکتریک بر روی خازن ذخیره می شود. پس از جدا کردن خازن از باتری، مقداری بار الکتریکی بر روی خازن ذخیره شده است و با اتصال خازن به یک مقاومت یا یک مدار الکتریکی این بار تخلیه می شود. پس در این فرایند شارژ و تخلیه شارژ (دشارژ)، خازن انرژی الکتریک را در خود ذخیره می کند و سپس تحویل مدار الکتریکی می دهد. از دید فیزیک، این انرژی در میدان الکتریک بین صفحات خازن ذخیره شده و می توان خازن را، به چشم یک منبع انرژی موقت یا یک باتری موقت نگاه کنیم. لازم به ذکر است، خازن جریان الکتریکی مستقیم DC را در خود ذخیره می کند ولی جریان الکتریکی متناوب AC را فقط عبور می دهد. این خاصیت ذخیره سازی انرژی در خازن باعث شده است تا از خازن در بعضی از کاربرد های نظامی، پزشکی و صنعتی

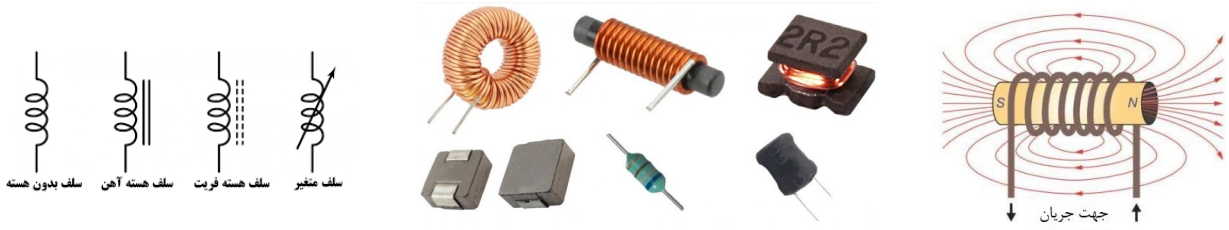
استفاده شود. برای مثال دستگاه شوک پزشکی که در زمان ایست قلب بیمار از آن استفاده می شود، خازنی با ظرفیت زیاد است که می تواند شارژ ذخیره شده در خود را در زمان کوتاهی در بدن بیمار تخلیه کند. کاربرد نظامی خازن نیز در تجهیزاتی خاص مانند شوکر است که می توان به واسطه شارژ موجود در آن به یک فرد صدمه رساند. میزان انرژی ذخیره شده در خازن به اختلاف پتانسیل و میزان بار ذخیره شده بر روی خازن بستگی دارد و از روابط زیر محاسبه می شود.

$$W = \frac{1}{2} C \times V^2 = \frac{1}{2} q \times V = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

۳- سلف (القاگر)

سلف یا القاگر که به آن کویل یا چوک یا اندوکتانس هم گفته می‌شود، زمانی که جریانی از داخل سلف عبور دهید، یک میدان مغناطیسی اطراف آن ایجاد می‌شود و شار مغناطیسی بوجود می آید.
در واقع سلف ارتباط بین شار و جریان گذرنده از آن را نشان میدهد.

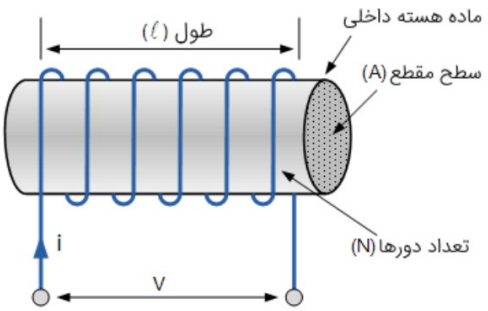
$$L = \frac{\varphi}{I}$$



شکل (۱۳): سلف و نماد مداری آن

ساختار سلف و محاسبه ظرفیت آن

در واقع سلف یک سیم پیچ است که دور یک هسته مرکزی (که می‌تواند شکل های مختلفی داشته باشد) پیچیده شده است. نماد الکتریکی برای سلف حرف L و واحد آن هانری (H) است. مقدار خاصیت سلف بر اساس ساختار فیزیکی آن به صورت رابطه زیر قابل محاسبه است:



$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

که N تعداد دورها، A مساحت سطح مقطع هسته بر حسب متر مربع، μ نفوذپذیری ماده هسته، l طول پیچه بر حسب متر است.

برخی از کاربردهای سلف

سلف ها یا القاگرها کاربردهای بسیاری مانند استفاده در فیلترها، سنسورها، ترانسفورماتور، موتور، ذخیره انرژی، مدارهای تنظیم فرکانس، چوک ها و به عنوان رله دارند.

الف) انواع مختلف سلف

۱- بر اساس ثابت یا متغیر بودن
۲- بر اساس شکل و ساختار فیزیکی

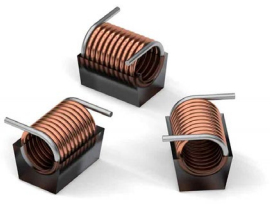
۱- سلف های ثابت و متغیر

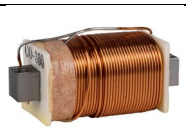
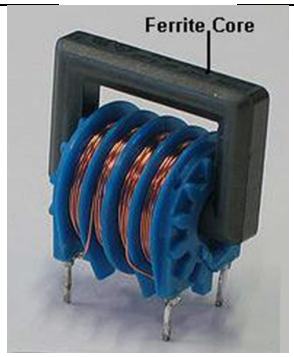
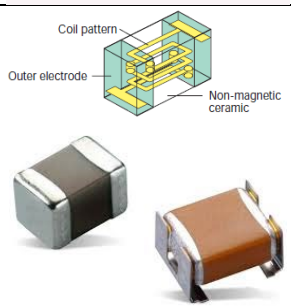
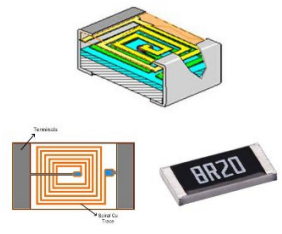
سلف ثابت دارای اندوکتانس ثابت است اما سلف متغیر با حرکت دادن هسته مغناطیسی به داخل و خارج از سیم پیچ های سلف شکل می گیرد. با این هسته مغناطیسی می توانیم مقدار اندوکتانس را تنظیم کنیم. هنگامی که یک کویل هسته فریت را در نظر می گیریم، با حرکت دادن هسته آن به داخل و خارج که سیم پیچ روی آن پیچانده شده است، می توان کویل هسته فریت متغیری را تشکیل داد. این نوع سلف ها در کاربردهای رادیویی و فرکانس بالا که نیاز به تنظیم است، استفاده می شود. این القاگرها معمولاً از ۱۰ μH تا ۱۰۰ μH و امروزه از nH۱۰ تا ۱۰۰ mH متغیر هستند

شکل (۱۴): سلف متغیر

۲- بر اساس مواد اصلی و ساختار مکانیکی :

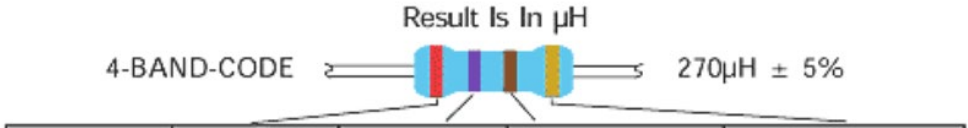
أنواع مختلف سلف در جدول زیر آورده شده است:

نوع سلف	توضیحات	شکل
سلف فاقد هسته (هسته هوا) Air Cored Inductor	سلف های هسته سرامیکی به عنوان "سلف فاقد هسته" شناخته می شوند. سرامیک رایج ترین ماده مورد استفاده برای هسته های کویل است. سرامیک دارای ضریب انبساط حرارتی بسیار پایینی است، بنابراین حتی برای طیف وسیعی از دماهای کاری، پایداری اندوکتانس القاگر بالا است. از آنجایی که سرامیک خاصیت مغناطیسی ندارد، به دلیل مواد هسته، افزایشی در مقدار نفوذپذیری وجود ندارد. هدف اصلی آن ارائه فرمی برای سیم پیچ است. مزیت اصلی این سلف ها تلفات بسیار کم هسته و ضریب کیفیت بالا است. این القاگرها عمدتاً در کاربردهای فرکانس بالا که در آن مقادیر اندوکتانس پایین مورد نیاز است، استفاده می شوند..	

سلف فرومغناطیسی (سلف با هسته آهنی)	در مواردی که نیاز به القاگر های فضای کم است، این کویل های هسته آهنی بهترین گزینه هستند. این سیم پیچ ها در تجهیزات صوتی قابل استفاده هستند. در مقایسه با سایر القاگرها، کاربردهای بسیار محدودی دارند.	
سلف هسته فریت	فریت به عنوان ماده فرومغناطیسی نیز شناخته می شود که خواص مغناطیسی را نشان می دهند. آنها از اکسید فلزی مخلوط آهن و سایر عناصر تشکیل شده اند تا ساختارهای کریستالی را تشکیل دهند. ترکیب کلی فریت ها XFe2O4 است. جایی که X نشان دهنده مواد انتقالی است. از ترکیبات موادی که به راحتی مغناطیسی می شوند مانند منگنز و روی (MnZn)، نیکل و روی (niZn) استفاده می شود. سلف هسته فریت یک قطعه الکتریکی پسیو دو ترمیناله است که در برابر تغییر جریان الکتریکی عبوری از خود مقاومت می کند. از فریت به عنوان یک ماده اصلی استفاده می کند که دارای نفوذپذیری مغناطیسی بالا و مقاومت الکتریکی بالا است. معمولاً با منبع تغذیه و کاربردهای مدیریت توان استفاده می شود. فریت ها عمدتاً دو نوع هستند، فریت های نرم و فریت های سخت. فریت ها بر اساس وادارندگی مغناطیسی طبقه بندی می شوند. وادارندگی، شدت میدان مغناطیسی مورد نیاز برای مغناطیس زدایی مواد فرومغناطیسی از حالت اشباع کامل به صفر است.	
سلف پودر آهنی Iron Powder Inductor	این سلف ها از ذرات بسیار ریز با ذرات عایق شده از پودر آهن بسیار خالص تشکیل شده اند. این نوع کویل حاوی تقریباً ۱۰۰٪ آهن است. هنگامی که این توان آهنی تحت فشار بسیار بالا فشرده شده و با یک ماده چسبنده مانند اپوکسی یا فنولیک مخلوط می شود، به ما یک هسته جامد می دهد. با این عمل پودر آهن مانند یک ساختار جامد مغناطیسی تشکیل می شود که از شکاف هوای توزیع شده تشکیل شده است. این کویل ها عمدتاً در منابع تغذیه سوئیچینگ قابل استفاده هستند.	
سلف های مبتنی بر بوبین	این القاگرها روی بوبین استوانه‌ای پیچانده می‌شوند، بنابراین به عنوان سلف‌های مبتنی بر بوبین نامیده می‌شوند و عمدتاً برای نصب بر روی بردهای مدار چاپی استفاده می شوند. این سلف ها از دو نوع لید تشکیل شده اند که عبارتند از: لید محوری (axial lead) و لید شعاعی (radial lead). لید محوری برای نصب افقی بر روی برد و لید شعاعی برای نصب عمودی بر روی برد مورد استفاده قرار می گیرد.	
سلف حلقوی	این نوع القاگر در واقع سیم پیچانده شده ای است بر روی هسته ای که دارای سطح حلقه ای است. این سلف ها معمولاً از مواد مختلفی مانند فریت، آهن پودری و غیره تشکیل می شوند. این سیم پیچ ها عمدتاً در تجهیزات پزشکی، تنظیم کننده سوئیچینگ، تهویه هوا، یخچال، مخابرات و آلات موسیقی و غیره استفاده می شوند.	
سلف های سرامیکی چند لایه	همانطور که از نام آن مشخص است، این سیم پیچ از چند لایه تشکیل شده است. به سادگی با افزودن لایه های اضافی سیم پیچ خورده ای که در اطراف هسته مرکزی پیچیده شده است، یک سلف چند لایه ایجاد می کند. در این سلف های چند لایه نه تنها اندوکتانس کویل افزایش می یابد بلکه ظرفیت بین سیم ها نیز افزایش می یابد. بیشترین مزیت این کویل ها این است که با دادن فرکانس های کاری پایین تر می توانیم نتایج اندوکتانس بالاتری بدست آوریم. این سیم پیچ ها دارای کاربردهایی در فرکانس‌های بالا برای توقف نویز و همچنین در ماژول‌های پردازش سیگنال مانند شبکه‌های محلی بی‌سیم و بلوتوث هستند. همچنین در سیستم‌های ارتباطی سیار استفاده می‌شوند.	
سلف های فیلمی	این کویل ها از یک فیلم رسانا بر روی مواد پایه استفاده می کنند. بنابراین با توجه به نیاز این فیلم برای کاربرد هادی شکل می گیرد. سلف های فیلم در اندازه نازک برای مبدل های DC به DC مناسب هستند که به عنوان منبع تغذیه در تلفن های هوشمند و دستگاه های تلفن همراه عمل می کنند. سلف لایه نازک Rf در تصویر زیر نشان داده شده است:	

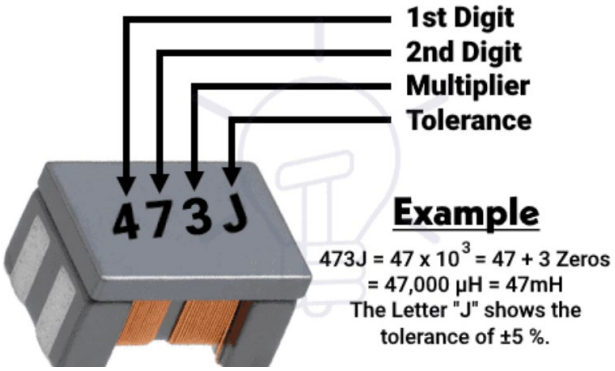
ب) روش خواندن ظرفیت سلف

ظرفیت سلفهای محوری شبیه مقاومت مطابق جدول زیر است.



COLOR	1st BAND	2nd BAND	MULTIPLIER	TOLERANCE
BLACK	0	0	1	± 20%
BROWN	1	1	10	Military ± 1%
RED	2	2	100	Military ± 2%
ORANGE	3	3	1,000	Military ± 3%
YELLOW	4	4	10,000	Military ± 4%
GREEN	5	5		
BLUE	6	6		
VIOLET	7	7		
GREY	8	8		
WHITE	9	9		
NONE				Military ± 20%
GOLD			0.1 / Mil. Dec. Pt	Both ± 5%
SILVER			0.01	Both ±10%

و اگر بر روی سلف عدد نوشته شده باشد مطابق شکل زیر است.



Symbol	Tolerance
B	+/-0.15 nH
C	+/-0.2 nH
S	+/-0.3 nH
D	+/-0.5 nH
F	+/-1%
G	+/-2%
H	+/-3%
J	+/-5%
K	+/-10%
L	+/-15%
M	+/-20%
V	+/-25%
N	+/-30%

ج) مدلسازی مداری سلف

از آنجا که برای تحلیل مدارهای الکتریکی روابط بر اساس ولتاژ و جریان نوشته می‌شوند، ولتاژ سلف از رابطه زیر بدست می آید:

$$L = \frac{\varphi}{i} \rightarrow \varphi = Li$$

$$V = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dLi}{dt} = L\frac{di}{dt}$$

مشاهده می‌شود ولتاژ سلف با مشتق جریان آن ارتباط دارد که به این معنی است که در مدارات با وجود سلف روابط مداری به معادله دیفرانسیل تبدیل خواهند شد.

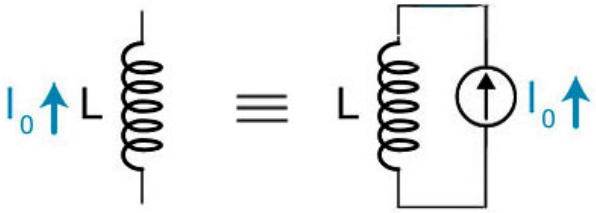
نکته: اگر جریان سلف عددی ثابت باشد ولتاژ آن که مشتق جریان است صفر خواهد شد. بنابراین بعد از شارژ شدن کامل سلف و رسیدن جریان آن به مقدار ثابت، ولتاژ صفر میشود و شبیه اتصال کوتاه عمل میشود.

نکته: هرگاه ولتاژ سلف محدود باشد di/dt نیز محدود است. یعنی جریان سلف تابعی پیوسته از زمان است و به طور ناگهانی تغییر نمی‌کند.

در صورت معلوم بودن ولتاژ سلف، برای بدست آوردن جریان باید از رابطه بالا انتگرال گرفته شود تا جریان در هر زمان تعیین شود.

$$i_L = \frac{1}{L}\int_0^t V(t)dt + i_0$$

از این رابطه نتیجه میشود که سلف یک المان حافظه دار است چون مقدار جریان i_0 را ذخیره می‌کند. بنابراین می‌توان یک سلف با جریان اولیه را به صورت یک سلف دشارژ به همراه یک منبع جریان موازی موقت مدل کرد.



منابع ولتاژ و جریان در مدارهای الکتریکی

اجزای مدارهای الکتریکی یا الکترونیکی دو نوع هستند: اجزای پسیو یا غیرفعال و اجزای اکتیو یا فعال. یک عنصر اکتیو، قادر است مدار را به صورت پیوسته تغذیه کند (مانند باتری، ژنراتور و غیره). عناصر پسیو، قطعاتی مانند مقاومت‌ها، خازن‌ها، سلف‌ها و غیره هستند که نمی‌توانند انرژی الکتریکی تولید کنند و فقط آن را مصرف می‌کنند. اجزای اکتیو، مهمترین اجزای مدار هستند که از آن‌ها برای تامین انرژی سایر اجزای متصل به مدار استفاده می‌کنیم. این عناصر، «منابع الکتریکی» نامیده می‌شوند که متشکل از دو نوع **جریان** و **ولتاژ** هستند. منبع ولتاژ، معمولاً رایج‌تر از منبع جریان است، اما هر کدام دوگان یا مکمل دیگری است.

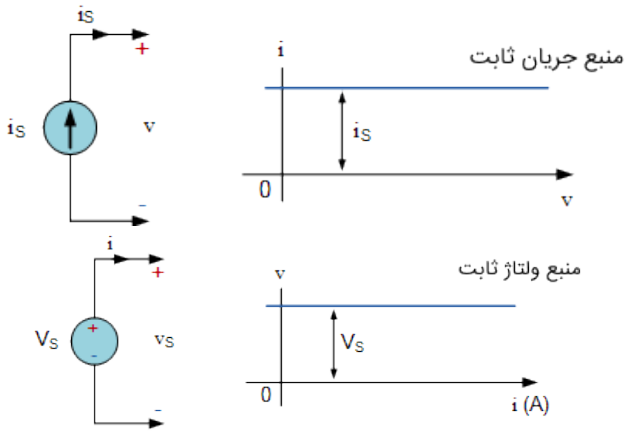
انواع منابع

۱- منابع مستقل: ولتاژ یا جریان آنها به قسمتهای دیگر مدار بستگی ندارد.

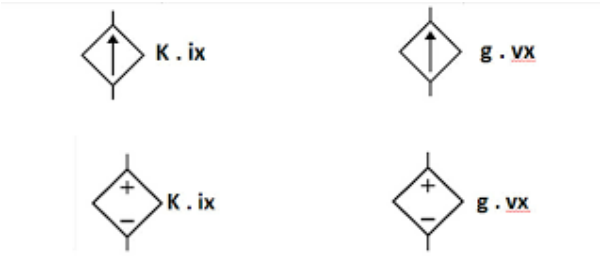
۲- منابع وابسته: ولتاژ یا جریان آنها وابسته به ولتاژ یا جریان قسمتها دیگر مدار است.

منابع مستقل: منابعی هستند که انرژی الکتریکی را به مدار به صورت مستقل تزریق میکنند. منابع مستقل معمولا انرژی غیرالکتریکی را به انرژی الکتریکی و بالعکس تبدیل می‌کنند. برای مثال، یک باتری، انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، در حالی که یک ماشین الکتریکی مانند ژنراتور DC یاAC، انرژی مکانیکی را به فرم انرژی الکتریکی تحویل می‌دهد.

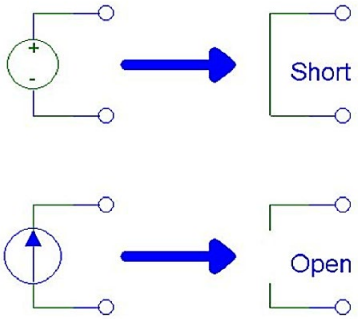
در شکل زیر نماد منابع ولتاژ و جریان مستقل به همراه نمودار آنها نشان داده شده است.



منبع وابسته: بر خلاف منبع مستقل، که بدون در نظر گرفتن اینکه چه چیزی به آن متصل است، ولتاژ یا جریان ثابتی را در پایانه‌های خود ایجاد می‌کند. یک منبع کنترل‌شده یا وابسته، بسته به ولتاژ دو سر یا جریان جاری در یک عنصر دیگر، ولتاژ پایانه‌های خود را تغییر می‌دهد و از این رو گاهی تعیین مقدار منبع ولتاژ وابسته دشوار است؛ مگر اینکه مقدار واقعی ولتاژ یا جریانی که به آن بستگی دارد را بدانیم. منابع ولتاژ وابسته، رفتار مشابهی با منابع الکتریکی که تاکنون بررسی کردیم، چه ایده‌آل (مستقل) و چه کاربردی دارند. تفاوت اینبار در این است؛ که یک منبع ولتاژ وابسته را، می‌توان با جریان یا ولتاژ ورودی کنترل کرد. منابع وابسته ایده‌آل، معمولا در آنالیز مشخصه‌های ورودی/خروجی یا بهره‌ی عناصر مدار مانند تقویت‌کننده‌های عملیاتی، ترانزیستورها و مدارهای مجتمع استفاده می‌شود. به طور کلی، یک منبع وابسته، چه کنترل‌شده با ولتاژ باشد چه جریان، با نماد لوزی، مطابق شکل زیر مشخص می‌شود.



نکته: برای صفر کردن (در نظر نگرفتن) منابع ولتاژ آنها را اتصال کوتاه و برای صفر کردن منابع جریان آنها را مدار باز در نظر میگیریم.



روش حل مدارهای الکتریکی

اولین گام در تحلیل مدارهای الکتریکی بدست آوردن ولتاژ و جریان قسمتهای مختلف مدار است.

قانون اهم (Ohm Law) برای محاسبه جریان و ولتاژ مدار استفاده می شد. این قانون به صورت زیر بیان می شود:

$$R = \frac{V}{I}$$

پس در یک مدار الکتریکی در صورتی که دو پارامتر از سه کمیت رابطه بالا را داشته باشیم، مقدار مجهول سوم به دست می آید؛ بنابراین برای محاسبه جریان فقط کافی است مقدار ولتاژ و مقدار مقاومت را داشته باشیم. این رابطه برای حل مدارهای ساده بسیار کمک کننده است؛ اما به محض این که مدار کمی پیچیده تر شود، برای مثال مقاومت از حالت سری و موازی معمولی، ساختارهای پیچیده تری مانند ستاره و پل داشته باشد، دیگر نمی توان از رابطه اهم به تنهایی برای محاسبه جریان یا ولتاژ استفاده کرد؛ اما قانون کرشهف به راحتی به ما امکان محاسبه پارامترهای مجهول را می دهد.

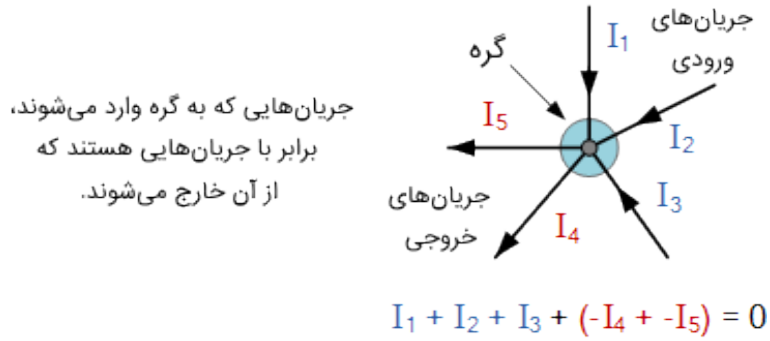
در سال ۱۸۴۵، یک فیزیکدان آلمانی، گوستاو کرشهف، یک جفت از قوانین را ارائه کرد که به روابط جریان و ولتاژ در مدارهای الکتریکی می‌پردازد. این قوانین از پایستار بودن میدان الکتریکی ساکن نتیجه می‌شود و در حلقه‌هایی که ابعاد آنها از طول موج بسیار کوچکتر است یا به عبارت دیگر در مدارهای فشرده برقرار است. این دو قانون معمولاً با نام‌های زیر شناخته می‌شوند: قانون جریان کرشهف (KCL) و دیگری قانون ولتاژ کرشهف (KVL). با استفاده از این دو قانون ولتاژ و جریان قسمتهای مختلف مدار را می‌توان بدست آورد.

۱- قانون جریان (KCL)

قانون جریان کرشهف یا KCL بیان می‌کند: «جریان یا بار الکتریکی وارد شده به یک گره دقیقاً برابر با بار یا جریانی است که از آن خارج می‌شود». به عبارت دیگر، مجموع جبری تمام جریان‌های وارد شده به یک گره باید برابر صفر باشد. این ایده کرشهف، با نام پایستگی یا بقای بار نیز شناخته می‌شود.

رابطه زیر را میتوان برای این قانون نوشت:

$$\sum i = 0$$



$$I_1 + I_2 + I_3 + (-I_4 + -I_5) = 0$$

در شکل بالا، مقدار سه جریان I_1، I_2 و I_3 که به گره وارد می‌شوند، مثبت است و دو جریان I_4 و I_5 که از گره خارج می‌شوند، منفی هستند. معادله زیر، رابطه بین جریان‌ها را بیان می‌کند:

$$I_1+I_2+I_3-I_4-I_5=0$$

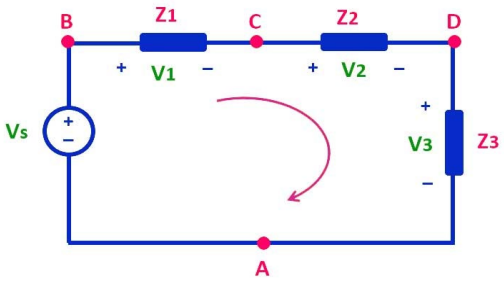
۲- قانون ولتاژ KVL

قانون ولتاژ کرشهف بیان می کند که " در هر حلقه از یک مدار الکتریکی فشرده، در هر لحظه از زمان، جمع جبری ولتاژهای شاخه های آن حلقه برابر با صفر است." به عبارت دیگر در یک حلقه از مدار الکتریکی فشرده خواهیم داشت:

$$\sum V = 0$$

توجه : هنگام KVL زدن در یک حلقه، در صورتی که روی خود شکل پلاریته ولتاژ هر شاخه مشخص نشده باشد، می توان پلاریته آن ولتاژ را به صورت دلخواه انتخاب کرد. **(بهتر است برای منابع جریان از سر مثبت خارج شود و برای المان های پسیو جریان وارد سر مثبت شود).**

برای KVL زدن در یک حلقه بسته، می توانیم به دو صورت ساعتگرد و پادساعتگرد عمل KVL زدن را انجام دهیم. در ادامه هر دو صورت را انجام خواهیم داد. اگر بخواهیم به صورت ساعتگرد در این حلقه KVL بزنیم، می توانیم از سر منفی Vs شروع کنیم و عمل KVL زدن را انجام دهیم. توجه کنید هنگامی جمع جبری ولتاژهای درون این شاخه برابر صفر خواهد بود که دوباره به سر منفی Vs باز گردیم و هنگامی که داریم در یک جهت می چرخیم تا بازگشت به نقطه شروع باید در همان جهت حرکت کنیم و تغییر مسیر ندهیم، در غیر این صورت جمع جبری ولتاژ های درون حلقه برابر با صفر نخواهد بود.



KVL حلقه موجود در شکل بالا به صورت ساعتگرد به صورت زیر خواهد بود:

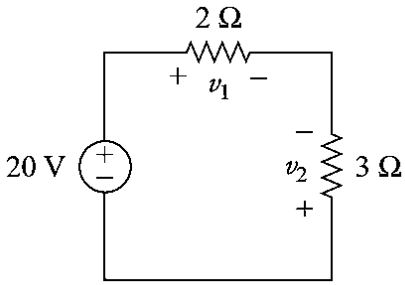
ساعتگرد

$$-V_S + V_1 + V_2 + V_3 = 0$$

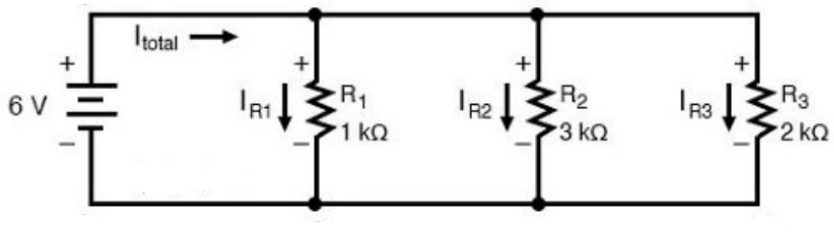
پادساعتگرد

$$-V_3 - V_2 - V_1 + V_S = 0$$

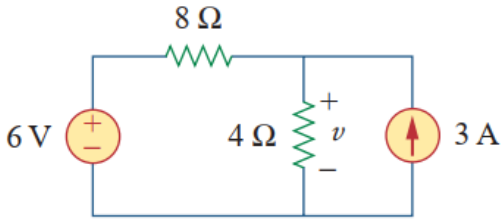
مثال ۱: در مدار زیر ولتاژ هر مقاومت را با استفاده از قانون اهم و KVL بدست آورید.



مثال ۲: در مدار زیر جریان کل کشیده شده از منبع را با استفاده از قانون اهم و KCL بدست آورید.



مثال ۳: در شکل زیر مقدار ولتاژ مقاومت ۴ اهمی را با استفاده از KVL, KCL بدست آورید.



توان و انرژی در مدارهای الکتریکی

طبق تعریف، هر شکلی از توان (الکتریکی، مکانیکی، گرمایی و..) برابر با نرخ انرژی یا کاری است که مصرف یا انجام می‌شود. واحد استاندارد توان، وات (Watt) یا «ژول بر ثانیه» است .توان برای یک المان در مدارهای الکتریکی به صورت حاصلضرب ولتاژ در جریان آن تعریف میشود.

$$P = VI$$

$$P(t) = VI = \frac{dw}{dq}\frac{dq}{dt} = \frac{dw}{dt}$$

$$Energy = W = \int P(t)dt$$

علامت توان و انرژی

با در نظر گرفتن قرار دا اینکه جریان برای هر المان مصرف کننده وارد سر مثبت شود و برای المان تولید کننده از سر مثبت خارج شود:

الف) توان و انرژی مثبت یعنی مصرف کننده

ب) توان و انرژی منفی یعنی تولید کننده

روابط توان و انرژی المان های مداری

۱- مقاومت

$$\mathrm{P}_R = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

$$Energy = W_R = \int P(t)dt = VIt = RI^2t = \frac{V^2}{R}t$$

نکته: رابطه دوم و سوم محاسبه توان مقاومت همیشه مثبت است که نشان میدهد مقاومت همیشه مصرف کننده است.

۲- خازن

$$P_C = 0$$

$$Energy = W_C = \int P(t)dt = \int VIdt = \int V(C\frac{dV}{dt})dt = \frac{1}{2}CV^2$$

سوال: توان صفر است اما انرژی غیر صفر چرا؟

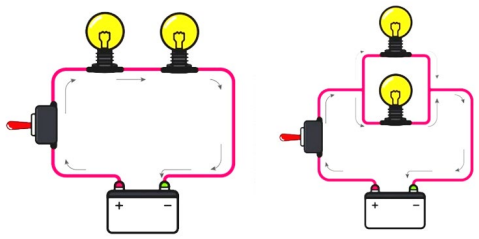
۳- سلف

$$P_L = 0$$

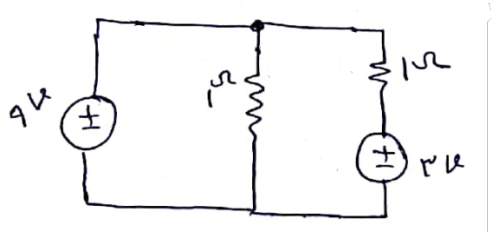
$$Energy = W_L = \int P(t)dt = \int VIdt = \int (L\frac{dI}{dt})Idt = \frac{1}{2}LI^2$$

سوال: توان صفر است اما انرژی غیر صفر چرا؟

مثال۴: دولامپ مشابه را یک بار به صورت سری و یک بار به صورت موازی به باتری متصل میکنیم. اگر مقدار مقاومت معادل هر لامپ ۱ اهم و باتری ۱۲ ولت باشد توان هر المان را در دو حالت با استفاده از قانون اهم و KVL یا KCL بدست آورده و با هم مقایسه کنید.



مثال ۵: در مدار زیر توان هر المان را بدست آورید.



اتصالات رایج در مدارهای الکتریکی

اتصال سری و موازی دو اتصال رایج در مدار ها هستند. که در ادامه بررسی خواهند شد.

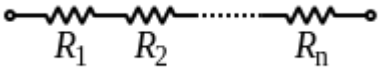
۱- اتصال سری

در این اتصال یک سر دو المان به هم اتصال دارد و به صورت دقیق تر از هر دو المان یک جریان عبور میکند.

$$I = I_1 = I_2 = \cdots = I_n$$

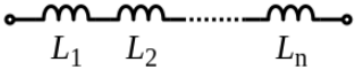
در صورت باز شدن یا شکستن مدار در هر نقطه، کل مدار «باز» می‌شود و از کار می‌افتد.

الف) اتصال سری مقاومت ها: مقاومت معادل تعدادی مقاومت سری برابر مجموع مقاومت‌های آن‌ها خواهد بود.



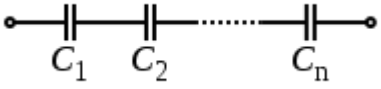
$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

ب) اتصال سری سلف ها: اندوکتانس معادل چند سلف سری برابر مجموع اندوکتانس هر یک از آن‌هاست.



$$L_{\text{total}} = L_1 + L_2 + \cdots + L_n$$

ج) اتصال سری خازن ها: ظرفیت خازنی کل چند خازن سری‌شده برابر معکوس مجموع وارون ضربی ظرفیت خازنی هریک از آن‌هاست.



$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n}.$$

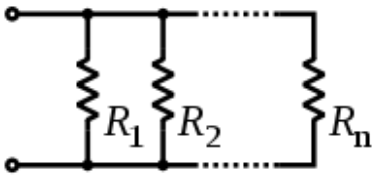
۲- اتصال موازی

در این اتصال دو سر دو المان به هم اتصال دارد و به صورت دقیق تر ولتاژ هر دو المان با هم برابر است.

$$V = V_1 = V_2 = \ldots = V_n$$

در صورت باز شدن یا خرابی مدار در هر نقطه، کل مدار از کار نمی‌افتد.

الف) اتصال موازی مقاومت ها



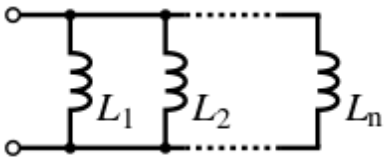
$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}.$$

نکته: برای حالتی که تنها دو مقاومت داشته باشیم:

$$R_{\text{total}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

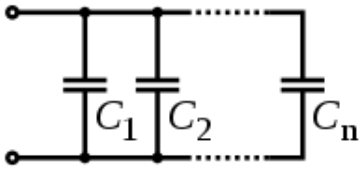
برای به خاطر سپردن ساده‌تر، عبارت فوق را «حاصلضرب به روی حاصل جمع» می‌گویند.

ب) اتصال موازی سلف ها



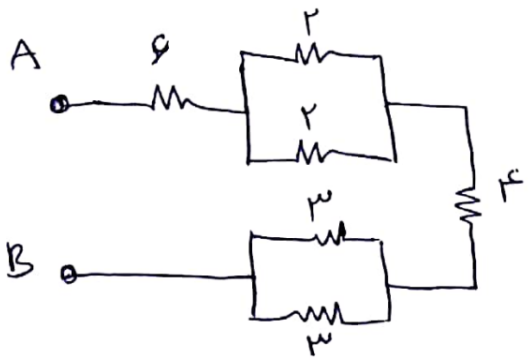
$$\frac{1}{L_{\text{total}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \cdots + \frac{1}{L_n}.$$

ج) اتصال موازی خازن ها



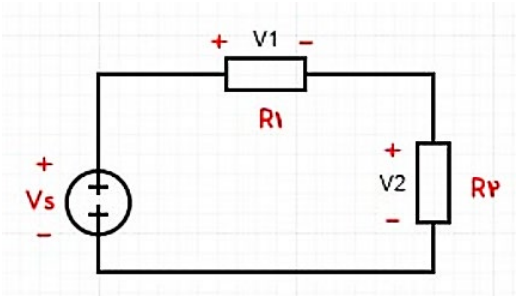
$$C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + \cdots + C_n.$$

مثال ۶: در مدار زیر مقدار مقاومت معادل از دو سر AB را بدست آورید.



تقسیم ولتاژ

اگر دو مقاومت سری به منبع ولتاژ وصل شوند ولتاژ منبع به نسبت مقدار مقاومت ها روی آنها تقسیم میشود.



$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} Vs$$

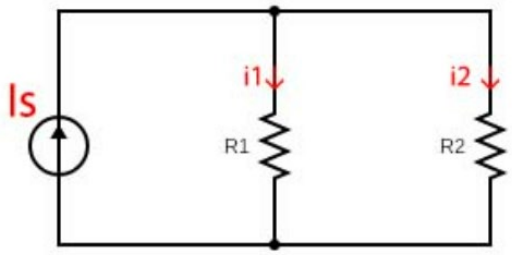
$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} Vs$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

یک کاربرد بسیار رایج مدار تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ، جایگزینی مقاومت‌های مقدار ثابت با حسگر است. حسگرهای مقاومتی، مانند حسگرهای نوری، حسگرهای دما، حسگرهای فشار یا فشارسنج‌ها، که با شرایط محیطی، مقدار مقاومت خود را تغییر می‌دهند؛ همه می‌توانند در یک شبکه‌ی تقسیم ولتاژ برای ارائه‌ی خروجی ولتاژ آنالوگ، مورداستفاده قرارگیرند. بایاس کردن ترانزیستورهای دوقطبی و ماسفت‌ها، یک کاربرد رایج دیگر، از تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ است.

تقسیم جریان

اگر دو مقاومت موازی به منبع جریان وصل شوند جریان منبع به نسبت عکس مقدار مقاومت ها روی آنها تقسیم میشود. یعنی مقدار بیشتر جریان از مسیر با مقاومت کمتر عبور میکند.



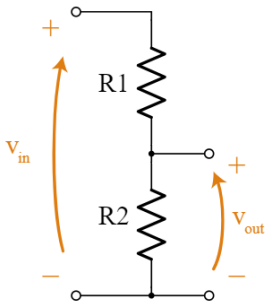
$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} Is$$

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} Vs$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

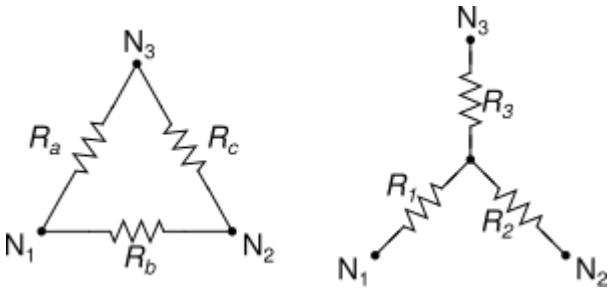
مثال ۷: برای تغذیه یک لامپ LED به ولتاژ ۳ ولت نیاز داریم، اگر فقط منبع ۱۲ ولت در اختیار داشته باشیم با استفاده از مدار زیر مقدار مقاومت ها را تعیین کنید.

ایراد چنین مداری چیست؟



اتصال ستاره و مثلث

علاوه بر اتصالات سری و موازی دو اتصال ستاره و مثلث هم وجود دارد. این نام از شکل نمودارهای مداری، که به ترتیب شبیه حروف Y و حرف یونانی Δ هستند مشتق شده است. با تبدیل آنها به یکدیگر مدار ساده تر و تحلیل آن سریعتر انجام میشود.



الف) تبدیل ستاره به مثلث

$$R_a = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3}{R_2}$$

$$R_b = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_3}$$

$$R_c = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_1}$$

الف) تبدیل مثلث به ستاره

$$R_1 = \frac{R_aR_b}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_2 = \frac{R_bR_c}{R_a + R_b + R_c}$$

$$R_3 = \frac{R_aR_c}{R_a + R_b + R_c}$$

مثال ۸: در مدار زیر جریان I را بدست آورید.