

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# مبانی برق

رشته‌های الکترونیک - الکتروتکنیک

زمینه‌ی صنعت

شاخه‌ی آموزش فنی و حرفه‌ای

شماره‌ی درس ۲۰۷۱

۶۲۱	مبانی برق / مؤلفان: فریدون قیطرانی ... [و دیگران] - تهران: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های
/۳۱	درسی ایران، ۱۳۹۰.
۲۱۴ م	۱۵۴ ص. : مصور. - (آموزش فنی و حرفه‌ای؛ شماره‌ی درس ۲۰۷۱)
۱۳۹۰	متون درسی رشته‌های الکترونیک - الکتروتکنیک، زمینه‌ی صنعت.
	برنامه‌ریزی و نظارت، بررسی و تصویب محتوا: کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های
	درسی رشته‌های الکترونیک - الکتروتکنیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزش‌های
	فنی و حرفه‌ای و کار دانش وزارت آموزش و پرورش.
	۱. برق. الف. قیطرانی، فریدون. ب. ایران. وزارت آموزش و پرورش. کمیسیون برنامه‌ریزی و
	تألیف کتاب‌های درسی رشته‌های الکترونیک - الکتروتکنیک. ج. عنوان. د. فروست.

همکاران محترم و دانش آموزان عزیز:

پیشنهادهای و نظرات خود را درباره‌ی محتوای این کتاب به نشانی  
تهران - صندوق پستی شماره‌ی ۴۸۷۴/۱۵ دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزش‌های  
فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایند.

پیام‌نگار (ایمیل) [info@tvoccd.sch.ir](mailto:info@tvoccd.sch.ir)

وب‌گاه (وب سایت) [www.tvoccd.sch.ir](http://www.tvoccd.sch.ir)

پیام‌نگار (ایمیل) کمیسیون تخصصی رشته‌ی الکترونیک

[nick@tvoccd.sch.ir](mailto:nick@tvoccd.sch.ir)

پیام‌نگار (ایمیل) کمیسیون تخصصی رشته‌ی الکترونیک

[tech@tvoccd.sch.ir](mailto:tech@tvoccd.sch.ir)

با توجه به ارائه نظرات هنرآموزان استان‌های اصفهان، آذربایجان غربی، ایلام، بوشهر،  
شهر تهران، کرمانشاه، مرکزی و همدان اصلاحات پیشنهادی آنان پس از بررسی و تأیید در کمیسیون‌های  
تخصصی رشته‌های الکترونیک - الکترونیک در کتاب لحاظ شده است.

## وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف: دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزش‌های فنی و حرفه‌ای و کاردانش

نام کتاب: مبانی برق - ۳۵۸/۱۸

مؤلفان: مهندس فریدون قیصرانی، مهندس عین‌الله احمدی، مهندس حسین مظفری، مهندس محمود همتانی و

مهندس مسعود تجلی‌پور

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع: اداره‌ی کل چاپ و توزیع کتاب‌های درسی

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره‌ی ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وب‌سایت: [www.chap.sch.ir](http://www.chap.sch.ir)

رسام: مریم دهقان‌زاده

صفحه‌آرا: صغری عابدی

طراح جلد: طاهره حسن‌زاده

ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران - کیلومتر ۱۷ جاده‌ی مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

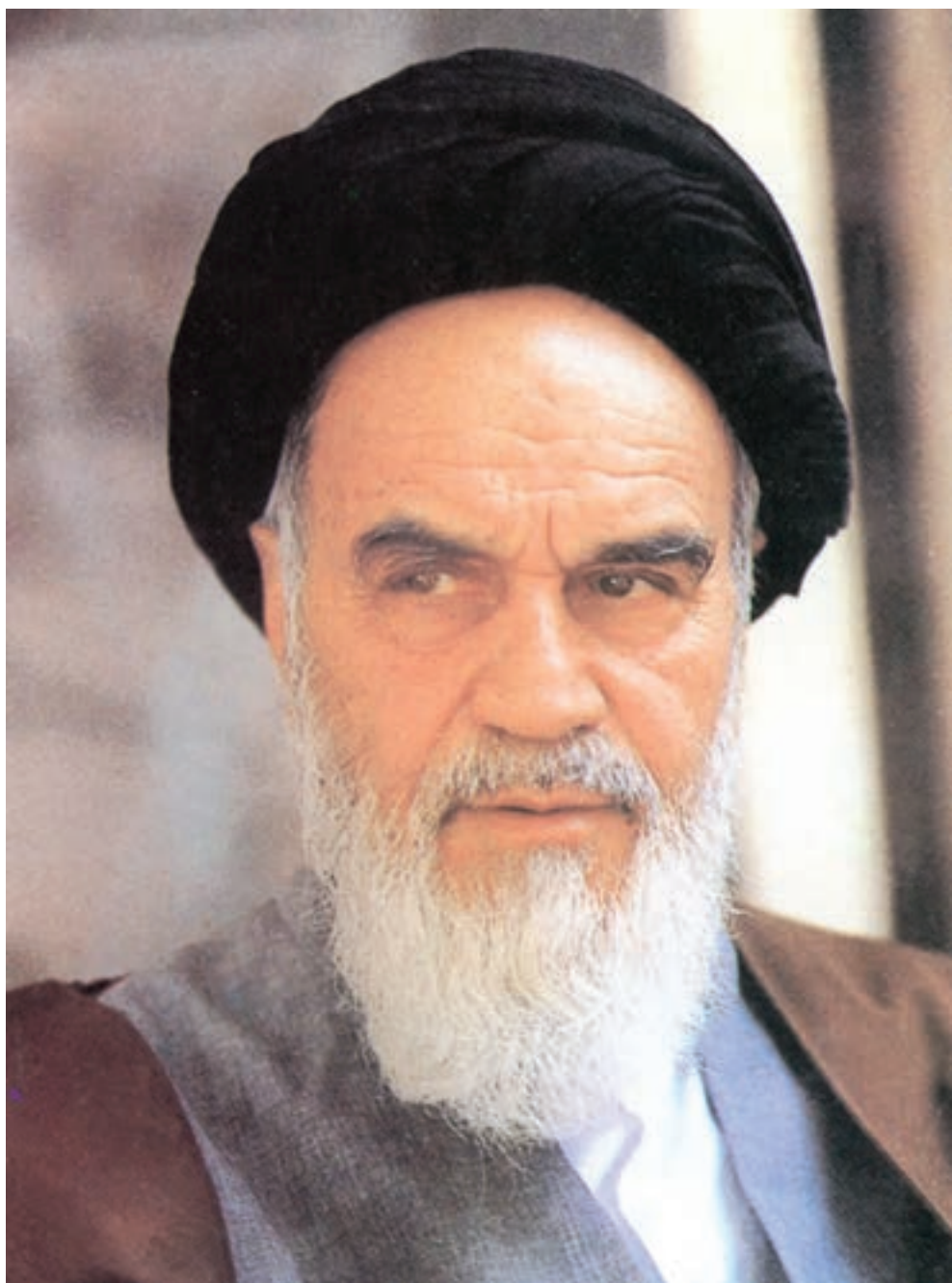
تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۴۴۵/۶۸۴

چاپخانه: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»

سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ یازدهم ۱۳۹۰

حق چاپ محفوظ است.

شابک ۴-۹۶۰-۰۵-۹۶۴ ISBN 964-05-0960-4



شما عزیزان کوشش کنید که از این وابستگی بیرون آید و احتیاجات کشور خودتان را برآورده سازید، از نیروی انسانی ایمانی خودتان غافل نباشید و از اتکای به اجانب پرهیزید.

امام خمینی «قدس سرّه الشریف»

# فهرست

سخنی با هنرآموزان محترم

	۱	فصل اول: الکتریسیته‌ی ساکن
	۱۵	فصل دوم: آشنایی با روش‌های تولید الکتریسیته
	۱۹	فصل سوم: الکتریسیته‌ی جاری
	۲۵	فصل چهارم: آثار جریان الکتریکی
	۲۸	فصل پنجم: مغناطیس و الکترومغناطیس
	۴۴	فصل ششم: مدار الکتریکی و اجزای آن
	۴۷	فصل هفتم: هدایت و مقاومت الکتریکی
	۵۵	فصل هشتم: قانون اهم
	۵۹	فصل نهم: کار و توان الکتریکی
	۶۶	فصل دهم: اتصال سری مقاومت‌های اهمی
	۸۳	فصل یازدهم: اتصال مقاومت‌ها به‌طور موازی
	۹۶	فصل دوازدهم: اتصال پیل‌ها
	۱۰۲	فصل سیزدهم: جریان متناوب
	۱۱۸	فصل چهاردهم: بوبین (سلف)
	۱۳۲	فصل پانزدهم: خازن در جریان مستقیم
	۱۴۷	فصل شانزدهم: خازن در جریان متناوب
	۱۵۴	منابع و مآخذ

## سخنی با هنرآموزان محترم

یکی از شاخص‌های پیشرفت صنعتی، تربیت نیروی انسانی متخصص در رده‌های مختلف فنی است. هر کشوری که بتواند هم‌زمان با رشد صنعتی و تکنیکی، نیروی فنی مورد نیاز خود را نیز تربیت کند، موفقیت بیش‌تری کسب خواهد کرد. هم‌زمان با اجرای نظام جدید آموزش متوسطه در زمینه‌ی صنعت، تغییرات و تحولات عمده‌ای در برنامه‌های درسی و آموزشی و نیز روش تألیف و تدوین کتاب‌های درسی به‌وجود آمد. از سال ۷۹ تاکنون با توجه به نظرات هنرآموزان محترم اصلاحاتی بر روی این کتاب انجام شده است که مهم‌ترین آن‌ها خلاصه‌سازی چهار فصل اول آن است. این کتاب در شانزده فصل تدوین شده است و تدوین‌کنندگان آن کوشیده‌اند تا محتوای کتاب با توانایی و درک هنرجویان کاملاً منطبق باشد. از آن‌جا که با وجود همه‌ی تلاش‌ها هیچ اثری خالی از اشکال نیست، از شما همکاران عزیز تقاضا داریم ما را از پیشنهادهای سازنده خود بهره‌مند سازید.

به منظور فراهم آوردن زمینه‌ی مناسب جهت تمرین بیش‌تر و درهم تنیدن فناوری اطلاعات (IT) با این موضوع درسی توصیه می‌شود هنرآموزان محترم از نرم‌افزارهای EWB، Edison، Multisim یا هر نرم‌افزار مناسب دیگری که در دسترس قرار دارد برای آموزش فصول مختلف مبانی برق استفاده نمایند. مدیران محترم هنرستان‌ها نیز در برنامه‌ریزی درسی هنرستان، قسمتی از زمان سایت رایانه را به این موضوع اختصاص دهند یا یک رایانه به همراه ویدئو پروژکتور برای کلاس‌های درس فراهم نمایند.

## هدف کلی درس

درک اصول الکتریسیته به منظور فراگیری موضوعات علمی و عملی برق

هنرجویان در دروس فیزیک ۱ (پایه اول دبیرستان) و علوم تجربی (پایه سوم راهنمایی) با مفاهیم زیر آشنا شده‌اند.

فیزیک ۱ (پایه اول دبیرستان)	علوم تجربی (پایه سوم راهنمایی)
<ul style="list-style-type: none"><li>- بار الکتریکی</li><li>- جسم رسانا و نارسانا</li><li>- پایداری بار الکتریکی</li><li>- القای بار الکتریکی</li><li>- اختلاف پتانسیل الکتریکی</li><li>- مولد</li><li>- مدار الکتریکی</li><li>- جریان الکتریکی و محاسبات آن</li><li>- مقاومت الکتریکی</li><li>- قانون اهم و محاسبات آن</li><li>- انرژی الکتریکی و محاسبات آن</li><li>- توان الکتریکی و محاسبات آن</li><li>- بهای انرژی الکتریکی و محاسبات آن</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- مدل‌های گوناگون برای اتم</li><li>- ذرات سازنده اتم</li><li>- پیوند میان اتم‌ها</li><li>- تشکیل مولکول‌ها و ترکیب مولکولی</li><li>- یون‌ها، ذراتی با بار الکتریکی</li><li>- کار و انرژی و محاسبه آن</li><li>- توان</li><li>- بار الکتریکی</li><li>- دو نوع نیرو، دو نوع بار الکتریکی</li><li>- القای بار الکتریکی</li><li>- رسانا، نارسانا</li><li>- اختلاف پتانسیل</li><li>- شدت جریان</li><li>- مقاومت الکتریکی</li><li>- قانون اهم</li><li>- آهنربا و اثر قطب‌های آن</li><li>- ساختن آهنربا</li><li>- القای مغناطیسی</li><li>- آهنربای الکتریکی</li></ul>

## الکتریسیته ی ساکن

### هدف های رفتاری

- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می رود :
- ۱- نظریه ی اتمی را در ارتباط با ماهیت الکتریسیته توضیح دهد.
  - ۲- ذرات اصلی اتم و ذرات باردار الکتریکی را نام ببرد.
  - ۳- قانون کولن را تعریف کند.
  - ۴- بار الکتریکی و واحد آن را تعریف کند.
  - ۵- روش های مختلف باردار کردن اجسام را نام ببرد.
  - ۶- خطرهای الکتریسیته ی ساکن را شرح دهد و چگونگی رفع هریک را بیان کند.
  - ۷- کاربردهای الکتریسیته ی ساکن را نام ببرد و ساختمان وسایلی را که با الکتریسیته ی ساکن کار می کنند، توضیح دهد.
  - ۸- اختلاف پتانسیل و میدان الکتریکی را توضیح دهد و مقدار آن ها را محاسبه کند.
  - ۹- تفاوت هادی ها، نیمه هادی ها و عایق ها را از نظر تعداد الکترون های آخرین لایه بیان کند و دلایل این تفاوت ها را توضیح دهد.
  - ۱۰- اختلاف فلزاتی چون نقره، طلا و مس را با توجه به هدایت الکتریکی آن ها بیان کند.

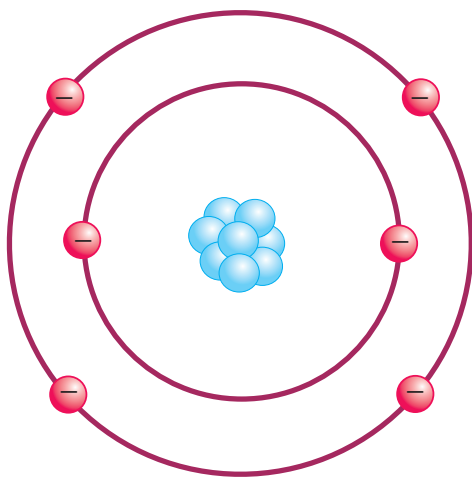
### مقدمه

امروزه انرژی الکتریکی بیش از انواع دیگر انرژی مورد استفاده قرار می گیرد. بدون انرژی الکتریکی کاربرد وسایل روشنایی، تلویزیون، تلفن و اغلب وسایل خانگی غیرممکن است. به علاوه، در بیش تر وسایل نقلیه انرژی الکتریکی نقش مهمی بازی می کند. به این ترتیب، می توان گفت انرژی الکتریکی تقریباً در همه جا به کار می رود.



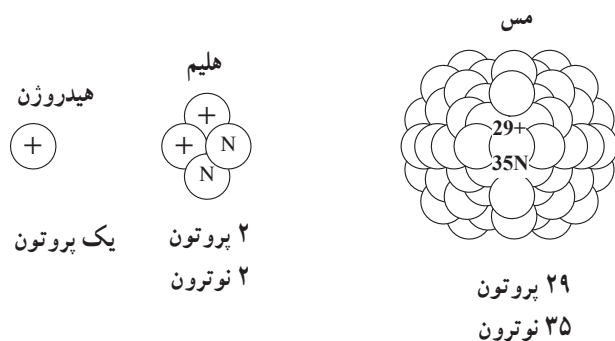
شکل ۱-۱ کاربردهای انرژی الکتریکی

و الکترون‌ها در مدارهایی به دور هسته گردش می‌کنند. شکل ۳-۱ ساختمان اتم کربن را نشان می‌دهد. هسته‌ی اتم کربن از شش پروتون با بار مثبت و شش نوترون (خنثی) تشکیل شده است و شش الکترون با بار منفی به دور هسته می‌چرخند.



شکل ۳-۱- ساختمان اتم کربن

**۱- هسته‌ی اتم:** قسمت مرکزی اتم، هسته نام دارد که پروتون و نوترون در درون آن قرار گرفته‌اند. تعداد پروتون‌های موجود در هسته باعث تفاوت دو عنصر می‌شود. اتم‌های هر عنصر تعداد معینی پروتون دارند؛ در صورتی که ممکن است تعداد نوترون‌ها با تعداد پروتون‌ها برابر نباشد.



شکل ۴-۱- هسته‌ی چند اتم

اگرچه الکتریسیته در قرون اخیر مورد استفاده قرار گرفته است ولی یونانی‌ها در حدود ۲۰۰۰ سال پیش آن را کشف کردند. آن‌ها بی‌بردند که وقتی ماده‌ای به نام کهربا را به ماده‌ی دیگری مالش دهند، با نیروی مرموزی باردار می‌شود و می‌تواند اجسامی مانند برگ خشک و براده‌های چوب را جذب کند. یونانی‌ها این کهربا را **الکترون** نام نهادند که کلمه‌ی الکتریسیته نیز از آن گرفته شده است.

در سال ۱۷۳۳ یک دانشجوی فرانسوی به نام شارل دوفه<sup>۱</sup> به این نکته پی برد که یک تکه شیشه‌ی باردار بعضی از اجسام باردار را جذب و اجسام باردار دیگر را دفع می‌کند. بنابراین، او چنین نتیجه گرفت که دو نوع الکتریسیته وجود دارد. در اواسط دهه‌ی ۱۷۰۰، **بنجامین فرانکلین** این دو نوع را الکتریسیته‌های مثبت و منفی نام نهاد. امروزه دانشمندان بر این عقیده‌اند که الکتریسیته از ذرات بسیار ریزی به نام **الکترون** و **پروتون** تولید می‌شود.



شکل ۲-۱- یکی از روش‌های تولید الکتریسیته

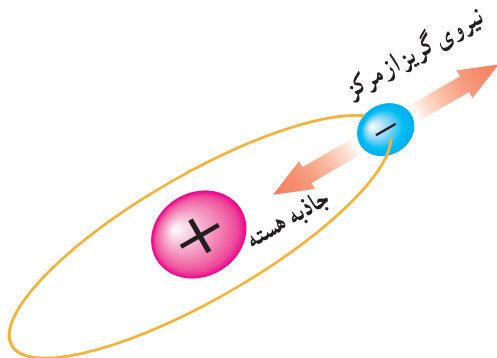
## ۱-۱- ساختمان اتم

هر اتم از سه نوع ذره تشکیل می‌شود: الکترون، پروتون و نوترون. پروتون‌ها و نوترون‌ها در مرکز یا هسته‌ی اتم قرار گرفته‌اند

الکترون‌ها در مدارهایی به دور هسته‌ی اتم حرکت می‌کنند و بارهای الکتریکی منفی دارند. خطوط نیروی وارد شده از هسته به صورت شعاعی و در تمام جهات به الکترون وارد می‌شوند.

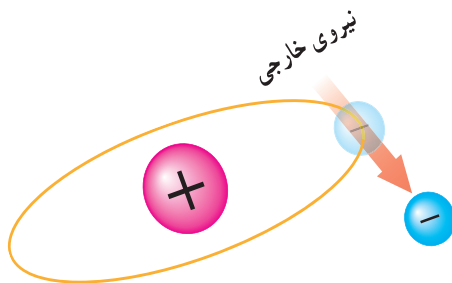
## ۱-۲- نظریه‌ی الکترونی

همان‌طور که گفتیم، الکتریسیته هنگامی به وجود می‌آید که الکترون‌ها از اتمشان خارج شوند. طبق شکل ۱-۷ الکترون‌ها با سرعت بسیار زیادی در مدار خود به دور هسته‌ی اتم گردش می‌کنند. چون سرعت الکترون‌ها زیاد است، نیروی گریز از مرکز زیادشان، آن‌ها را به ترک مدارشان وا می‌دارد ولی نیروی جاذبه‌ی مثبت هسته از این عمل جلوگیری می‌کند.



شکل ۱-۷- تعادل الکترون در مدار خود

طبق شکل ۱-۸ اگر یک نیروی خارجی خیلی قوی به اتم داده شود تا به این نیروی گریز از مرکز کمک کند، الکترون آزاد می‌شود.

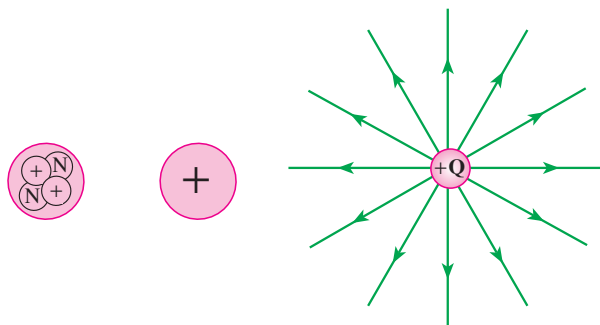


شکل ۱-۸- نیروی خارجی باعث آزادی الکترون می‌شود.

## ۲- پروتون: پروتون بسیار کوچک است و قطر آن $\frac{1}{3}$

قطر الکترون است. پروتون‌ها در عبور یا انتقال انرژی الکتریکی نقش فعالی ندارند آن‌ها بار الکتریکی مثبت دارند و بنابر قرارداد، خطوط نیروی الکتریکی به صورت شعاعی و به طور مستقیم در تمام جهات از پروتون خارج می‌شوند.

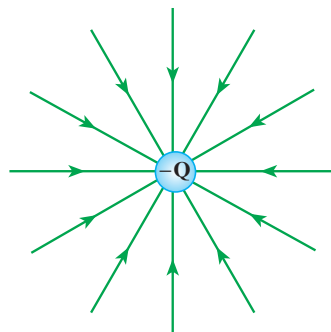
در شکل ۵-۱ هسته‌ی اتم شامل نوترون خنثی و پروتون مثبت است؛ بنابراین، هسته‌ی همه‌ی اتم‌ها همیشه مثبت است. خطوط نیرو به صورت شعاعی در تمام جهات از پروتون خارج می‌شوند.



شکل ۵-۱- خطوط نیروی الکتریکی پروتون

۳- نوترون: نوترون ذره‌ای است که اگر تجزیه شود، یک پروتون و یک الکترون حاصل می‌آید. در اتم تعداد بارهای منفی الکترون‌ها مساوی بار مثبت پروتون‌ها است. نوترون از نظر الکتریکی خنثی است و بنابراین، در ماهیت الکتریکی اتم‌ها چندان مهم تلقی نمی‌شود.

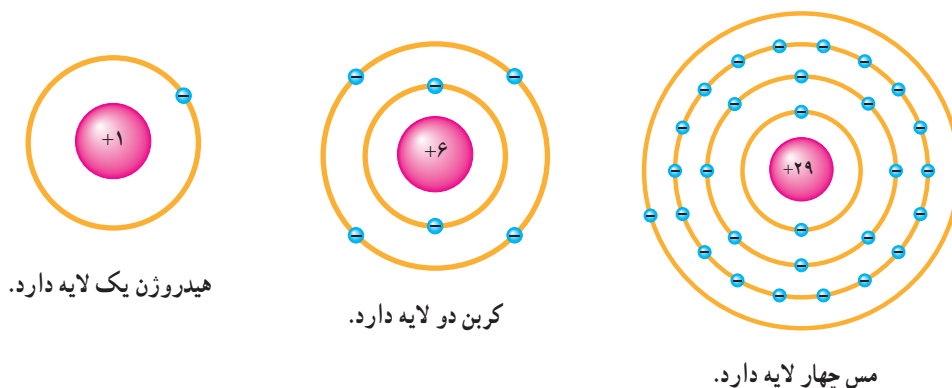
۴- الکترون: الکترون‌ها را به آسانی می‌توان حرکت داد. آن‌ها ذراتی هستند که در انتقال انرژی الکتریکی اثر فعالی دارند.



شکل ۶-۱- خطوط نیروی الکتریکی ناشی از الکترون

الکترون‌ها را معمولاً لایه (shell) می‌گویند. اتم‌های تمام عناصر شناخته شده می‌توانند تاهفت لایه داشته باشند. در شکل ۹-۱ لایه‌های عناصر مس، کربن و هیدروژن را می‌بینید.

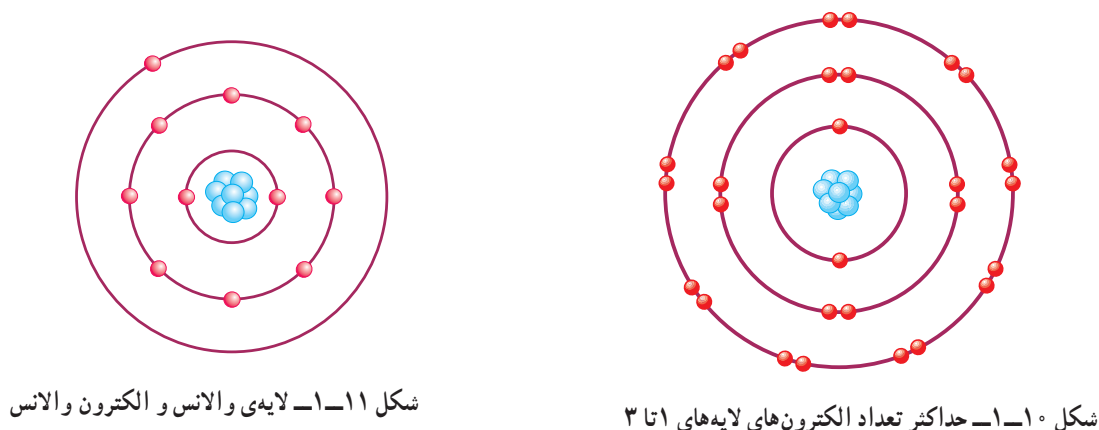
◀ **لایه‌ها:** الکترون‌های مدار نزدیک به هسته به سختی آزاد می‌شوند؛ زیرا به نیروی مثبت نگاه‌دارنده‌ی خود بسیار نزدیک‌اند. هرچه الکترون‌ها از هسته دورتر باشند، شدت این نیروی مثبت کم‌تر می‌شود. هرچه تعداد الکترون‌های یک اتم بیش‌تر باشد، مدارهای بیش‌تری وجود دارند. مسیر مداری



شکل ۹-۱- لایه‌های عناصر مس، کربن و هیدروژن

به‌دست آورد که در آن  $n$  شماره‌ی لایه است (شکل ۱۰-۱).  
 ▶ **لایه‌ی خارجی (طبقه‌ی والانس):** لایه‌ی خارجی هر اتمی نمی‌تواند بیش‌تر از ۸ الکترون داشته باشد. لایه‌ی خارجی یک اتم لایه‌ی والانس و الکترون‌های آن الکترون‌های والانس نام دارند (شکل ۱۱-۱).

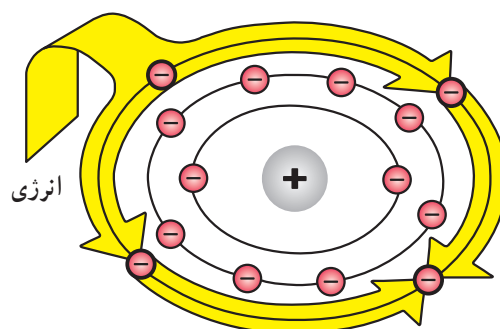
◀ **ظرفیت لایه:** هر لایه می‌تواند تعداد معینی الکترون را در خود جای دهد. نزدیک‌ترین لایه به هسته (لایه‌ی اول) نمی‌تواند بیش از دو الکترون داشته باشد. لایه‌ی دوم نمی‌تواند بیش‌تر از ۸ الکترون و لایه‌ی سوم بیش‌تر از ۱۸ الکترون داشته باشد. لایه‌ی چهارم نیز نمی‌تواند بیش‌تر از ۳۲ الکترون داشته باشد و الی آخر. تعداد الکترون‌های هر لایه را می‌توان از رابطه‌ی  $2n^2$



◀ **انرژی الکترون:** اگرچه بار منفی همه‌ی الکترون‌ها یکسان است ولی همه‌ی آن‌ها انرژی یکسانی ندارند. الکترون‌هایی که در مدار به هسته نزدیک‌اند، نسبت به الکترون‌های مدارهای دورتر انرژی کم‌تری دارند. هرچه مدار یک الکترون از هسته دورتر باشد، انرژی آن بیش‌تر است.

اگر به یک الکترون انرژی کافی داده شود، می‌تواند از مدار خود خارج گردد و به مدار بالاتری (بعدی) برود. پس اگر به الکترون والانس انرژی کافی داده شود، آن نیز از مدار خود خارج می‌گردد و چون مدار بالاتری وجود ندارد، از اتم جدا می‌شود و به‌صورت الکترون آزاد درمی‌آید.

در اثر آزاد شدن الکترون‌ها از اتمشان، الکتریسیته به‌وجود می‌آید. چون الکترون‌های والانس بیش‌از سایر الکترون‌ها از هسته دورند، و هم‌چنین بالاترین سطح انرژی را دارند، به آسانی آزاد می‌شوند. انرژی داده‌شده به لایه‌ی والانس بین الکترون‌های آن لایه تقسیم می‌شود. در نتیجه، به ازای مقدار معینی انرژی، هرچه الکترون‌های والانس موجود بیش‌تر باشد هر الکترون انرژی کم‌تری دریافت می‌کند.



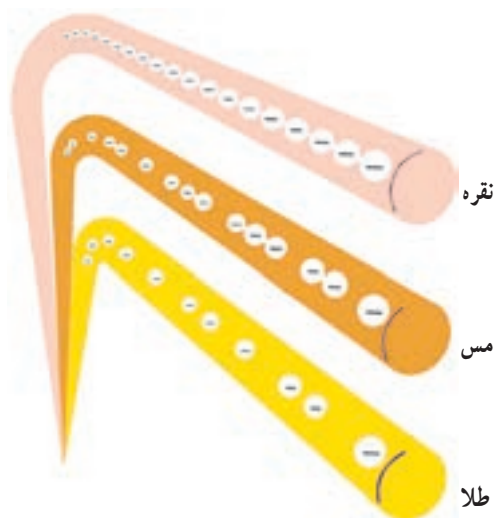
شکل ۱۲-۱ تقسیم انرژی خارجی به چهار الکترون والانس

### ۱-۳- هادی‌ها

لایه‌ی والانس می‌تواند تا ۸ الکترون والانس داشته باشد. چون انرژی اعمال شده بین الکترون‌های والانس تقسیم می‌شود، اتم‌هایی که الکترون‌های والانس کم‌تری دارند به‌راحتی می‌توانند الکترون‌های خود را آزاد کنند. به این دلیل که هر الکترون انرژی بیش‌تری برای خارج شدن از مدار خود دریافت می‌کند.

به ماده‌ای که الکترون‌هایش به‌راحتی می‌توانند آزاد شوند، هادی می‌گویند. اتم‌های هادی‌های خوب فقط ۱ یا ۲ الکترون والانس دارند. اجسامی که اتم‌هایشان فقط یک الکترون والانس دارند، بهترین هادی‌ها محسوب می‌شوند.

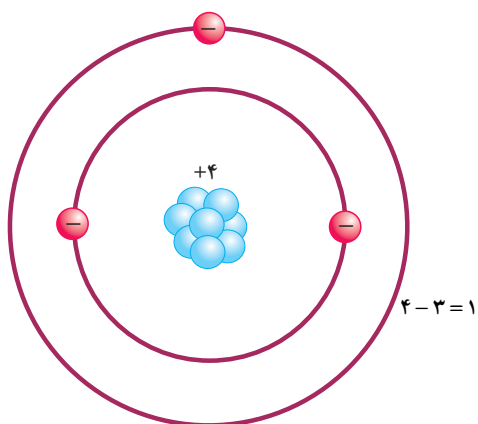
قابلیت هدایت بعضی فلزات از سایر فلزات بهتر است. برای مثال، با آن‌که اتم‌های مس و نقره و طلا هر یک فقط یک الکترون والانس دارند که به آسانی آزاد می‌شوند اما نقره بهترین هادی است و پس از آن مس و طلا قرار دارند. این بدان علت است که نقره در مقدار معینی ماده، نسبت به فلزات دیگر دارای اتم‌های بیش‌تری است و در نتیجه، قدرت آزادسازی الکترون‌های آزاد بیش‌تری را دارد.



شکل ۱۳-۱ مقایسه‌ی هادی‌های خوب

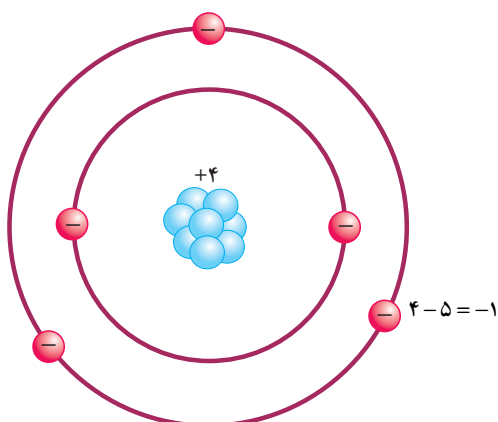
### ۱-۴- عایق‌ها

عایق‌ها موادی هستند که آزاد کردن الکترون‌های مدار آخر آن‌ها بسیار مشکل است. لایه‌ی والانس اتم‌های عایق، معمولاً ۸ الکترون دارند یا دارای ۴ الکترون یا بیش‌تر هستند. انرژی داده‌شده به چنین اتمی بین تعداد زیادی از الکترون‌ها تقسیم می‌شود. اتم‌هایی که ۷ الکترون والانس دارند، اغلب فعالانه می‌کوشند که لایه‌ی آخرشان را پر کنند. آن‌ها عایق‌های الکتریکی بسیار خوبی به‌شمار می‌روند.



شکل ۱۶-۱ یک یون مثبت

طبق شکل ۱۷-۱ چنانچه تعداد الکترون‌های اتمی از پروتون‌های آن بیش‌تر باشد، اتم بار منفی دارد و یون منفی ایجاد می‌کند.



شکل ۱۷-۱ یک یون منفی

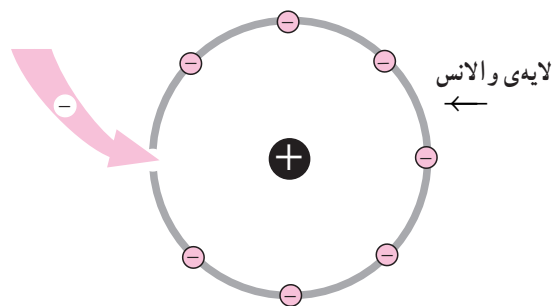
### ۱-۷ باردار شدن اجسام

اگر اتم‌های یک جسم خنثی الکترون‌های خود را از دست بدهند یا الکترون زیادی بگیرند، آن جسم باردار خواهد شد. باردار شدن اجسام از چند راه امکان‌پذیر است:

- ۱- باردار شدن اجسام از راه اصطکاک (مالش)
- ۲- باردار کردن اجسام از طریق تماس
- ۳- باردار کردن اجسام از طریق القا

### فکر کنید

هواپیماها هنگام حرکت دارای بار الکتریکی می‌شوند، برای تخلیه این بارها چه تدبیری به کار می‌توان برد؟



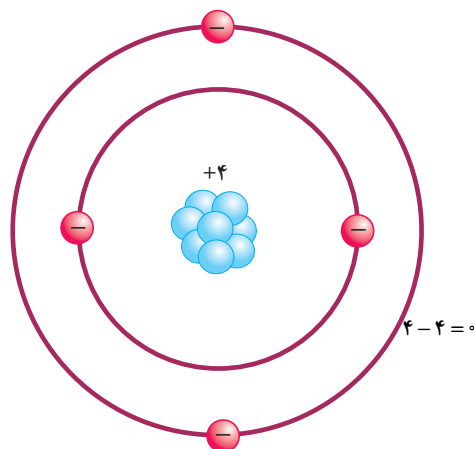
شکل ۱۴-۱ عایق خوب

### ۱-۵ نیمه هادی‌ها

لایه‌ی والانس هادی‌ها کم‌تر از ۴ الکترون و لایه‌ی والانس عایق‌ها بیشتر از ۴ الکترون دارند. به‌عناصری که اتم‌های آن ۴ الکترون والانس دارند، نیمه‌هادی می‌گویند. مهم‌ترین نیمه‌هادی‌ها عبارت‌اند از: ژرمانیم، سیلیکون (سیلیسیم)، کربن.

### ۱-۶ اتم‌های باردار

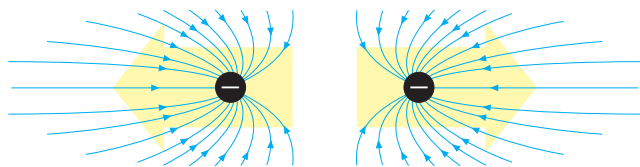
طبق شکل ۱۵-۱ به‌طور طبیعی در هر اتم تعداد الکترون‌ها و پروتون‌ها مساوی است. بنابراین، بارهای مساوی و مخالف مثبت و منفی یک‌دیگر را خنثی می‌کنند و اتم را از نظر الکتریکی خنثی نگه می‌دارند.



شکل ۱۵-۱ اتم خنثی

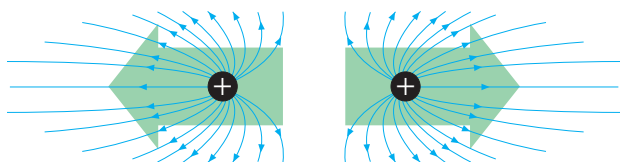
طبق شکل ۱۶-۱ اگر در اتمی تعداد الکترون‌ها از پروتون‌ها کم‌تر باشد، اتم بار مثبت دارد و یون مثبت ایجاد می‌کند.

طبق شکل ۱-۲۰ الکترون (-)، الکترون (-) دیگر را دفع می‌کند.



شکل ۱-۲۰ نیروی دافعه‌ی بین دو الکترون

طبق شکل ۱-۲۱ پروتون (+)، پروتون (+) را دفع می‌کند.



شکل ۱-۲۱ نیروی دافعه‌ی بین دو پروتون

پروتون‌ها مثبت هستند و باید یک‌دیگر را دفع کنند اما نوعی نیروی جاذبه درون هسته‌ای اتم وجود دارد که آن‌ها را در کنار هم نگه می‌دارد. این نیرو از نیروی دافعه‌ی پروتون‌ها قوی‌تر است و مانع از هم پاشیدن هسته‌ی اتم می‌شود.

## تحقیق کنید

هنگامی که هسته‌ی یک اتم می‌شکند یا متلاشی می‌شود انرژی بسیار زیادی آزاد می‌شود. به این انرژی آزاد شده انرژی هسته‌ای می‌گویند که پایه و اساس کار نیروگاه‌های برق هسته‌ای است. در یک فعالیت گروهی در مورد تولید انرژی الکتریکی با این انرژی تحقیق کرده و به کلاس گزارش دهید.

## ۱-۹ میدان‌های الکترواستاتیک

نیروهای جاذبه و دافعه‌ی دو جسم باردار از طریق خطوط نیروی الکترواستاتیکی که در اطراف جسم باردار وجود دارند، اعمال می‌شوند.

در یک جسم باردار منفی، خطوط نیروی الکترون‌های

## فکر کنید

نحوه کار دستگاه فتوکپی چگونه است؟

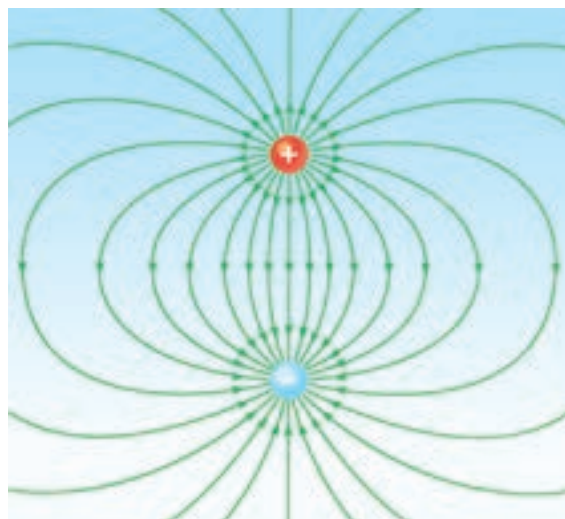


شکل ۱-۱۸- نمایی از یک دستگاه فتوکپی

## ۸-۱ قانون بارهای الکتریکی

بار منفی الکترون از نظر مقدار، مساوی ولی از نظر جهت خطوط نیرو، مخالف بار مثبت پروتون است. به بارهای الکترون و پروتون، **بارهای الکترواستاتیک** نیز می‌گویند.

خطوط نیروی هریک از این بارها میدان‌های الکترواستاتیک تولید می‌کنند. به علت اثر متقابل این دو میدان، ذرات باردار یک‌دیگر را جذب یا دفع می‌کنند. بر اساس قانون بارهای الکتریکی، ذراتی که بارهای همنام دارند، یک‌دیگر را دفع و ذراتی که بارهای مخالف دارند، هم‌دیگر را جذب می‌کنند. طبق شکل ۱-۱۹ پروتون (+)، الکترون (-) را جذب می‌کند.



شکل ۱-۱۹- نیروی جاذبه‌ی بین الکترون و پروتون

## ۱۰-۱- قانون کولن

کولن آزمایش‌های خود را در دو مرحله انجام داد؛ در مرحله‌ی نخست به دو کره‌ی ساکن و متحرک بارهای الکتریکی یکسان (مساوی و هم‌نام) داد و نیروی دافعه‌ی بین آن‌ها را در فاصله‌های مختلف اندازه‌گیری کرد. او نتیجه گرفت که این نیرو با عکس مجذور فاصله‌ی دو بار الکتریکی متناسب است؛ یعنی، وقتی که فاصله‌ی دو بار الکتریکی دو برابر شود، نیروی بین آن‌ها به  $\frac{1}{4}$  مقدار اولیه می‌رسد و هنگامی که فاصله‌ی بین دو بار الکتریکی سه برابر شود، نیروی بین آن‌ها به  $\frac{1}{9}$  مقدار نخستین می‌رسد.

در مرحله‌ی بعد، کولن بارهای متفاوتی را به دو کره داد و نیروهای آن‌ها را در فاصله‌ی ثابت اندازه‌گیری کرد. او نتیجه گرفت که نیروی جاذبه یا دافعه‌ای که میان کره‌ها به وجود می‌آید، به‌طور مستقیم با مقدار بار الکتریکی روی هریک از کره‌ها متناسب است و در نتیجه، با حاصل ضرب آن‌ها تناسب دارد. اگر دو بار الکتریکی را با  $q_1$  و  $q_2$  و فاصله‌ی بین آن‌ها را با  $d$  و نیرو را با  $F$  نمایش دهیم، قانون کولن به‌صورت رابطه‌ی زیر نوشته می‌شود:

$$F = K \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

$K$  ضریبی است که به واحدهای انتخاب شده و جنس محیطی بستگی دارد که دو جسم باردار در آن قرار گرفته‌اند. اگر اندازه‌گیری نیرو در خلأ صورت گیرد، در دستگاه بین‌المللی واحدها (SI) که در آن  $F$  برحسب نیوتن و  $q$  برحسب کولن و  $d$  برحسب متر است،  $K$  تقریباً برابر است با  $K = 9 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ .

اگر به هنگام محاسبه نیروی بین دو بار، بار مثبت را با علامت مثبت و بار منفی را با علامت منفی نشان دهیم، نیروی دافعه‌ی بین دو بار هم‌نام با علامت مثبت و نیروی جاذبه‌ی بین دو بار غیرهم‌نام با علامت منفی به‌دست می‌آید.

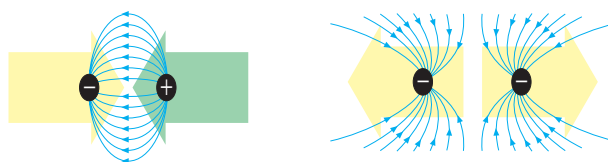
اضافی با یک‌دیگر جمع می‌شوند و میدان الکترواستاتیکی به‌وجود می‌آورند که جهت خطوط نیروی آن در تمام جهات از بیرون به طرف درون جسم است.

در جسم باردار مثبت، کمبود الکترون‌ها باعث می‌شود که خطوط نیروی پروتون‌های اضافی با هم جمع شوند و میدان الکترواستاتیکی تولید کنند که در آن خطوط نیرو در تمام جهات از درون جسم به طرف بیرون است.

## تحقیق کنید

با ساختمان و اصول کار الکتروسکوپ (برق‌نما) در درس فیزیک ۱ آشنا شدید، با دوستان خود تشکیل یک گروه داده و یک الکتروسکوپ بسازید.

میدان‌های الکترواستاتیک در هنگام جذب به طرف یک‌دیگر متمایل می‌شوند و در هنگام دفع با هم مخالفت می‌کنند. نیروی جذب و دفع به سه عامل بستگی دارد: (۱) مقدار باری که در هر جسم وجود دارد، (۲) فاصله‌ی بین دو جسم و (۳) جنس محیط بین دو جسم. هرچه بارهای الکتریکی اجسام بیش‌تر باشد، نیروی الکترواستاتیک بزرگ‌تر خواهد بود و هرچه دو جسم باردار به یک‌دیگر نزدیک‌تر باشند، نیروی الکترواستاتیک بین آن‌ها بیش‌تر خواهد بود. اگر از بارها کاسته شود یا دو جسم از یک‌دیگر دور شوند، نیروهای جاذبه و دافعه ضعیف‌تر خواهند شد. در قرن هجدهم یک دانشمند فرانسوی به نام **کولن** با بارهای الکترواستاتیک آزمایش‌هایی انجام داد و قانونی درمورد جاذبه و دافعه‌ی الکترواستاتیکی کشف کرد که به آن **قانون کولن** می‌گویند.



شکل ۲۲-۱- میدان‌های الکترواستاتیک

$$E = \frac{F}{q'}$$

در این رابطه  $F$  برحسب نیوتن ( $N$ )؛  $q'$  برحسب کولن ( $C$ ) و  $E$  برحسب نیوتن بر کولن ( $\frac{N}{C}$ ) است.

**مثال ۲:** در نقطه‌ای از یک میدان الکتریکی، بر بار الکتریکی مثبتی معادل  $10^{-5}$  کولن نیرویی برابر با  $2/^\circ$  نیوتن وارد می‌شود. شدت میدان الکتریکی در این نقطه چه قدر است؟

$$E = \frac{F}{q'} = \frac{2/^\circ}{10^{-5}} = 2 \times 10^4 \frac{N}{C}$$

شدت میدان الکتریکی مانند نیرو، کمیتی برداری است که اندازه و راستا دارد. راستای  $E$  و  $F$  همواره یکی است ولی نیروی وارد بر بار مثبت، هم جهت با میدان و نیروی وارد بر بار منفی، در خلاف جهت میدان است.

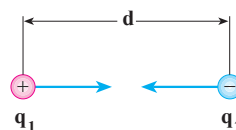
## ۱۲-۱. اختلاف پتانسیل الکتریکی

وقتی یک جسم رسانا که بار الکتریکی منفی دارد به زمین متصل می‌شود، الکترون‌ها (یعنی بارهای منفی) از آن جسم به زمین می‌روند. هم چنین، اگر یک جسم رسانا با بار الکتریکی مثبت به زمین اتصال پیدا کند، تعدادی الکترون از زمین به جسم منتقل می‌شود. حرکت الکترون‌ها و به عبارت دیگر انتقال الکتریسیته به این علت صورت می‌گیرد که بین جسم رسانا و زمین اختلاف پتانسیل وجود دارد. بنابراین، می‌توان اختلاف پتانسیل را عامل یا شرطی دانست که سبب جاری شدن الکتریسیته از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر می‌شود. با توجه به این واقعیت، می‌توان اختلاف پتانسیل را با اختلاف دما - که سبب انتقال گرما در یک جسم می‌شود - یا اختلاف فشار مایع بین دو ظرف به هم پیوسته - که سبب جاری شدن مایع بین دو ظرف می‌گردد - مقایسه کرد.

همان‌طور که اختلاف دما جهت انتقال گرما را در جسم مشخص می‌کند یا اختلاف فشار مایع جهت حرکت مایع را نشان می‌دهد، اختلاف پتانسیل الکتریکی هم جهت جریان یافتن الکتریسیته را تعیین می‌کند.

از رابطه‌ی  $F = K \frac{q_1 q_2}{d^2}$  فقط اندازه‌ی نیروی کولن

به دست می‌آید. راستای این نیرو همواره در امتداد خطی است که دو جسم را به هم وصل می‌کند و جهت نیرو به نوع بارهای الکتریکی دو جسم بستگی دارد. چنان که گفتیم، بارهای همنام یک‌دیگر را دفع و بارهای غیر همنام یک‌دیگر را جذب می‌کنند.



**مثال ۱:** نیروی بین دو بار الکتریکی مثبت که مقدار بار هر کدام یک کولن است، وقتی که فاصله‌ی آن‌ها یک کیلومتر باشد چه قدر است؟

$$q_1 = q_2 = 1C$$

$$d = 1000m \quad F = K \frac{q_1 q_2}{d^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 1}{(10^3)^2} = 9000N$$

نیروی  $9000$  نیوتن نیروی زیادی است. مقدار بارهای ساکن معمولاً از یک کولن بسیار کم‌ترند.

## ۱۱-۱. شدت میدان الکتریکی

نیرویی که در یک میدان الکتریکی بر واحد بار آزمون (بار مثبت) الکتریکی واقع در هر نقطه از این میدان وارد می‌شود، **شدت میدان الکتریکی** در آن نقطه نام دارد و آن را با  $E$  نمایش می‌دهند. بنابراین، اگر بار مثبت  $q'$  در نقطه‌ی معینی از میدان الکتریکی واقع شود و بر آن نیروی  $F$  اثر کند، شدت میدان الکتریکی در آن نقطه برابر خواهد بود با:

مثبت است. برعکس، اگر در این ارتباط الکتریکی، الکترون‌ها از جسم به زمین بروند پتانسیل جسم منفی است. بنابراین، پتانسیل اجسام باردار رسانا پس از اتصال به زمین صفر می‌شود.

**اندازه‌ی پتانسیل الکتریکی:** پتانسیل الکتریکی یک جسم باردار که آن را با  $U$  نمایش می‌دهیم، بنا به تعریف عبارت است از کاری که باید انجام گیرد تا واحد بار الکتریکی مثبت از زمین به جسم انتقال یابد. واحد پتانسیل الکتریکی ولت است؛ بنابراین، اگر برای انتقال بار مثبت  $q$  کار  $W$  لازم باشد، پتانسیل جسم براساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

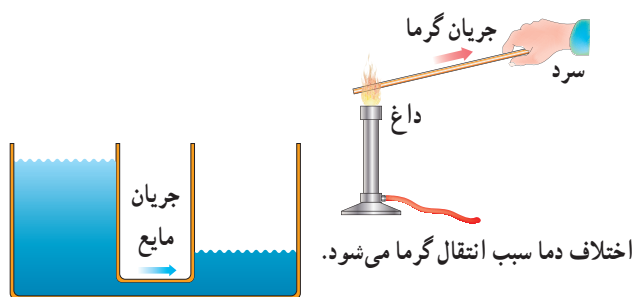
$$U = \frac{W}{q} \quad \begin{matrix} \text{(ژول)} \\ \text{(کولن)} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{(ولت)} \\ \text{(کولن)} \end{matrix}$$

**اختلاف پتانسیل بین دو جسم باردار:** اختلاف پتانسیل بین دو جسم باردار که پتانسیل آن‌ها  $V_1$  و  $V_2$  است، بنابه تعریف عبارت است از انرژی‌ای که باید مصرف شود تا واحد بار الکتریکی مثبت از یک جسم به جسم دیگر انتقال یابد. اگر این اختلاف پتانسیل را نیز با  $U$  نمایش دهیم، بنابه این تعریف خواهیم داشت:

$$U = V_2 - V_1$$

مثلاً وقتی می‌گوییم اختلاف پتانسیل میان دو قطب یک باتری اتومبیل ۱۲ ولت است، یعنی برای انتقال واحد بار الکتریکی (یعنی یک کولن) از یک قطب به قطب دیگر ۱۲ ژول انرژی مصرف یا آزاد می‌شود. اگر قطب منفی این باتری را به زمین وصل کنیم، پتانسیل آن صفر و پتانسیل قطب مثبت ۱۲+ ولت می‌شود. برعکس، اگر قطب مثبت باتری را به زمین متصل کنیم، پتانسیل این قطب صفر و پتانسیل قطب منفی ۱۲- ولت می‌شود. بنابراین، اختلاف میان دو قطب در هر حال ۱۲ ولت و ثابت است.

فرض می‌کنیم که دو قطب این باتری ۱۲ ولتی را مطابق شکل ۱-۲۵ به دو صفحه‌ی فلزی  $V_1$  و  $V_2$  وصل کرده‌ایم. اگر صفحه‌ی  $V_1$  را که دارای پتانسیل منفی است به زمین وصل کنیم، پتانسیل آن صفر می‌شود و پتانسیل صفحه‌ی  $V_2$  همان ۱۲+ ولت باقی می‌ماند. اگر بخواهیم در این حالت بار منفی

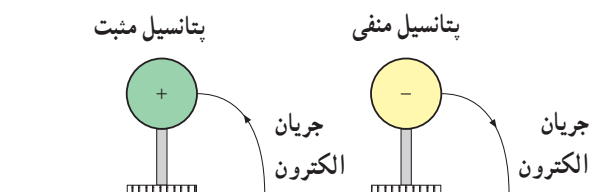


اختلاف فشار مایع را جابه‌جا می‌کند.

شکل ۱-۲۳- مقایسه‌ی اختلاف پتانسیل الکتریکی با اختلاف دما و اختلاف فشار در مایع

**زمین و پتانسیل الکتریکی صفر:** در اندازه‌گیری‌های پتانسیل الکتریکی لازم است مبدأ مقایسه‌ی مناسبی با پتانسیل الکتریکی صفر انتخاب شود. درست همان‌طور که در اندازه‌گیری دما، نقطه‌ی ذوب یخ به عنوان مبدأ مقایسه یا نقطه‌ی صفر قبول شده است، در عمل زمین را نیز به عنوان مبدأ مقایسه‌ای که پتانسیل الکتریکی آن صفر است، انتخاب کرده‌اند.

این انتخاب برای آسان شدن کار صورت گرفته است و معنایش این نیست که زمین بار الکتریکی ندارد. همان‌طور که نمی‌توان گفت یخ صفر درجه دارای انرژی داخلی نیست. درحقیقت، زمین بار منفی دارد ولی اندازه‌ی این بار منفی به قدری زیاد است که دادن مقداری بار الکتریکی به آن یا گرفتن بار از آن در بار الکتریکی‌اش، تأثیر محسوسی نخواهد داشت.



شکل ۱-۲۴- زمین در حکم پتانسیل صفر

**پتانسیل الکتریکی یک جسم باردار:** معمولاً پتانسیل اجسام باردار را نسبت به زمین می‌سنجند. در این سنجش، پتانسیل زمین را بنا به قرارداد، صفر در نظر می‌گیرند. هنگامی که یک جسم باردار به وسیله‌ی یک رشته سیم به زمین متصل می‌شود، اگر الکترون‌ها از زمین به سوی جسم جریان یابند پتانسیل جسم

حاصل ضرب نیرو در تغییر مکان برابر است؛ یعنی:  $W = Fd$   
 برای به دست آوردن هم‌ارز الکتریکی این معادله، کافی است روابط  
 $W = Uq$  و  $F = qE$  را به کار ببریم. بنابراین، اگر در رابطه‌ی  
 $W = Fd$  به جای  $W$  و  $F$  معادل آن‌ها را قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$Uq = qE \cdot d$$

$$E = \frac{U}{d}$$

در این رابطه،  $U$  اختلاف پتانسیل میان دو صفحه برحسب  
 ولت و  $d$  فاصله‌ی دو صفحه برحسب متر و  $E$  شدت میدان برحسب  
 $\frac{\text{ولت}}{\text{متر}}$  است. با توجه به واحد شدت میدان الکتریکی که قبلاً  
 تعریف شد، خواهیم داشت:

$$1 \frac{\text{نیوتن}}{\text{کولن}} = 1 \frac{\text{ولت}}{\text{متر}}$$

مثال ۳: بین دو صفحه‌ی موازی که به فاصله‌ی ۲ سانتی‌متر  
 از یک دیگر قرار دارند، اختلاف پتانسیل ۱۰۰۰ ولت برقرار شده است.  
 الف) شدت میدان الکتریکی بین دو صفحه را حساب کنید.  
 ب) اگر یک پروتون با بار مثبت:  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  بین  
 این دو صفحه قرار گیرد، چه نیرویی بر آن وارد می‌شود؟  
 — مقادیر داده شده عبارت‌اند از:  $d = 0.02 \text{ m}$  و

$$U = 1000 \text{ V} \text{ و } q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{1000}{0.02} = 50000 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 50000 \frac{\text{N}}{\text{C}} \quad (\text{الف})$$

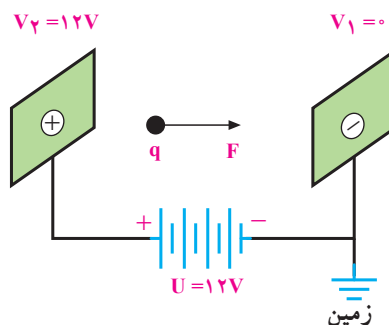
(ب)

$$F = Eq = 50000 \times 1.6 \times 10^{-19} = 8.0 \times 10^{-15} \text{ N}$$

### ۱۳-۱ خطرات الکتریسیته‌ی ساکن و چگونگی خنثی کردن آن

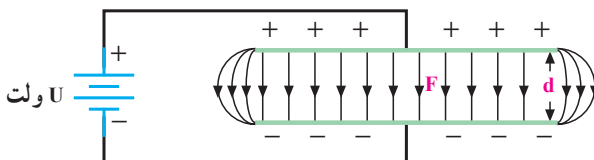
برقی که بین دو توده ابر باردار (از نوع مخالف) یا یک  
 توده ابر و زمین می‌جهد، در اصطلاح علمی **تخلیه‌ی الکتریکی**  
 نامیده می‌شود. این تخلیه‌ی الکتریکی (صاعقه) ممکن است  
 به ساختمان‌های بلند آسیب برساند.

$-q$  را از  $V_2$  به  $V_1$  انتقال دهیم، باید به اندازه‌ی  $W = U \cdot q$   
 انرژی مصرف کنیم. برعکس، اگر همین بار الکتریکی را از  $V_1$   
 به  $V_2$  برگردانیم، انرژی به مقدار  $W = U \cdot q$  آزاد خواهد شد.  
 در این مثال، اگر  $V_1$  و  $V_2$  با یک رشته سیم به هم  
 متصل شوند، الکترون‌ها به سوی  $V_2$  جریان می‌یابند و انرژی  
 آزاد شده به گرما تبدیل می‌شود.



شکل ۲۵-۱ وقتی بار الکتریکی  $q$  از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر که بین آن‌ها  
 اختلاف پتانسیل  $U$  موجود است انتقال می‌یابد، انرژی  $U \cdot q$  آزاد می‌شود.

**میدان الکتریکی یک نواخت:** میدان یک نواخت، میدانی  
 است که شدت و جهت آن در حجم محدودی از فضا ثابت باشد.  
 برای ایجاد چنین میدانی، می‌توانیم دو صفحه‌ی فلزی را که مطابق  
 شکل ۲۶-۱ به طور موازی در مقابل یک دیگر قرار گرفته‌اند، به دو  
 قطب یک باتری متصل کنیم. در این صورت، در فضای بین دو  
 صفحه میدان الکتریکی یک نواختی ایجاد می‌شود ولی در فضای  
 بیرون دو صفحه و در مجاورت لبه‌ی صفحه‌ها — همان‌طور که در  
 شکل دیده می‌شود — میدان الکتریکی یک نواخت نیست.



شکل ۲۶-۱ میدان الکتریکی یک نواخت

فرض کنید می‌خواهیم بار مثبت  $+q$  را از صفحه‌ی بالایی  
 به صفحه‌ی پایینی منتقل کنیم. انرژی لازم برای انجام این کار، با

## ۱۴-۱- کاربرد الکتریسیته‌ی ساکن

تاکنون تنها درمورد چگونگی خنثی کردن الکتریسیته‌ی ساکن سخن گفته‌ایم. اما الکتریسیته‌ی ساکن کاربردهای فراوانی نیز دارد.

**الف- دستگاه غبارگیر الکترواستاتیکی:** در این دستگاه هوای آلوده به ذرات معلق از میان یک میدان الکترواستاتیکی قوی عبور می‌کند و ذرات آن دارای بار منفی می‌شوند.

این ذرات باردار از میدان الکترواستاتیکی دیگری عبور داده می‌شوند، ذرات غبار که بار منفی گرفته‌اند جذب بارهای مثبت می‌شود و هوا از ذرات معلق تمیز می‌شود.

**ب- دستگاه رنگ‌پاش:** در این دستگاه جسمی که قرار است رنگ شود را مثبت باردار می‌کنند و رنگ را در رنگ‌پاش منفی باردار می‌کنند. رنگ باردار را با رنگ‌پاش به جسم می‌پاشند ذرات باردار رنگ جذب جسم می‌شوند و سطح آن به طور کاملاً یکنواخت با رنگ پوشیده می‌شود.



شکل ۲۷-۱- صاعقه

## تحقیق کنید

در مورد نحوه عملکرد برق‌گیر در ساختمان‌ها به صورت گروهی تحقیق کرده و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

در بیمارستان‌ها برای بیهوش کردن بیماران از ماده‌ای به نام اتر استفاده می‌شود. اتر ماده‌ای فرار است و بخار آن در فضای اتاق پخش می‌شود. اگر چرخ‌های تخت‌حامل بیمار لاستیکی باشد، بر اثر مالش این چرخ‌ها با پتو یا روکش بیمار ممکن است در آن‌ها الکتریسیته‌ی ساکن تولید شود و جرقه بزنند. همین جرقه باعث انفجار خواهد شد. امروزه برای جلوگیری از این خطر احتمالی زنجیر فلزی کوتاهی به بدنه‌ی فلزی تخت‌حامل بیمار آویزان می‌کنند که با سطح زمین تماس دارد. بارهای الکتریکی تولید شده از راه این زنجیر به زمین منتقل می‌گردد و در نتیجه، از تولید جرقه و بروز پیش‌آمد ناگوار جلوگیری می‌شود.

## فکر کنید

در بعضی از دستگاه‌های صنعتی برای به حرکت درآوردن بار (انتقال قدرت) از تسمه لاستیکی استفاده می‌شود. برای از بین بردن الکتریسیته ساکن تولید شده چه می‌کنند؟



الف) دستگاه رنگ‌پاش الکترواستاتیکی



ب) دستگاه غبارگیر الکترواستاتیکی

شکل ۲۸-۱- کاربردهایی از الکتریسیته‌ی ساکن

## تحقیق کنید

در مورد نحوه رنگ کردن بدنه خودروها به شیوه الکترواستاتیکی تحقیق و نتیجه‌ی آن را به کلاس گزارش کنید.



## پرسش

- ۱- چه ذراتی الکتریسیته تولید می کنند؟
- ۲- پروتون بار ..... و الکترون بار ..... دارد.
- ۳- اگر یک الکترون در نزدیکی یک پروتون باشد، آیا پروتون، الکترون را جذب می کند یا دفع؟
- ۴- چرا پروتون های داخل هسته با نیروی کافی یک دیگر را دفع نمی کنند تا هسته منهدم شود؟
- ۵- سه راه برای باردار کردن یک جسم را نام ببرید.
- ۶- آیا نیروی دافعه ی بین دو الکترون با فاصله ی کم بیش تر است یا با فاصله ی زیاد؟ اگر فاصله ی بین یک پروتون و یک الکترون دو برابر شود، اندازه ی نیروی جاذبه در مقایسه با نیروی قبلی چه قدر است؟
- ۷- قانون کولن را شرح دهید.
- ۸- چرا به عقب بدنه ی فلزی تانکرهای حمل سوخت زنجیر کوتاهی که با سطح زمین تماس دارد، آویزان می کنند؟
- ۹- لایه چیست و دور هر اتم چند لایه وجود دارد؟
- ۱۰- الکترون آزاد یا والانس چیست؟
- ۱۱- آیا عنصری که شش الکترون والانس دارد، هادی خوبی است؟ دو الکترون والانس چه طور؟
- ۱۲- شدت میدان الکتریکی را شرح دهید.
- ۱۳- اختلاف پتانسیل الکتریکی را تعریف کرده و واحد اندازه گیری آن را بیان کنید.
- ۱۴- چرا هنگام تمیز کردن صفحه ی تلویزیون با پارچه ی خشک، پُرزهای پارچه به صفحه ی تلویزیون می چسبند؟
- ۱۵- چرا هنگام بیرون آوردن لباس از بدن، جرقه هایی در لباس زده می شود؟
- ۱۶- شیر آب سرد را کمی باز کنید تا باریکه ای از آب تشکیل شود. با یک شانه پلاستیکی چند بار سر خود را شانه بزنید شانه را به باریکه آب نزدیک کنید چه اتفاقی می افتد؟ چرا؟

## تمرین

- ۱- دو بار نقطه ای مثبت و مساوی، هریک برابر  $10^{-4}$  کولن به فاصله ی دو متر از یک دیگر قرار دارند. نیروی بین آن ها چند نیوتن است؟
- ج)  $22/5N$
- ۲- اندازه و نوع نیروی بین یک بار منفی ۵ میکروکولنی و یک بار مثبت ۲ میکروکولنی را که به فاصله ی ۹ سانتی متر از یک دیگر قرار دارند، تعیین کنید.
- ج)  $11/11N$

۳- دو بار همنام وقتی به فاصله‌ی  $d$  از یک‌دیگر واقع شوند، نیروی معین  $F$  را به هم وارد می‌کنند.  
 الف) اگر فاصله‌ی دو بار را نصف، دوبرابر یا سه برابر کنیم،  $F$  به چه نسبتی تغییر خواهد کرد؟  
 ب) اگر در فاصله‌ی ثابت  $d$  اندازه‌ی یکی از بارهای الکتریکی را نصف یا دوبرابر یا سه برابر کنیم،  $F$  به چه نسبتی تغییر می‌کند؟  
 ۴- بار مثبت  $5 \times 10^{-7}$  کولنی وقتی در نقطه‌ای از یک میدان الکتریکی قرار گیرد، نیرویی برابر  $4 \times 10^{-4}$  بر آن وارد می‌شود. شدت میدان الکتریکی را در این نقطه حساب کنید.

$$\text{ج) } E = 8 \times 10^4 \frac{N}{C}$$

۵- شدت میدان الکتریکی در یک میدان یک‌نواخت (یعنی میدانی که شدت آن ثابت و خطوط نیروی آن موازی و هم‌جهت است) برابر  $1000 \frac{N}{C}$  است. اندازه‌ی نیروی وارد بر یک الکترون را وقتی که در این میدان قرار می‌گیرد، حساب کنید. بار الکتریکی الکترون را  $1/6 \times 10^{-19}$  بگیرید.

$$\text{ج) } F = 1/6 \times 10^{-16} N$$

۶- بار الکتریکی  $q$  در میدان الکتریکی یک‌نواخت به شدت  $20 \frac{N}{C}$  قرار گرفته و نیرویی برابر  $3 \times 10^{-4} N$  بر آن وارد شده است. مقدار بار  $q$  چند کولنی بوده است؟

$$\text{ج) } q = 1/5 \times 10^{-5} C$$

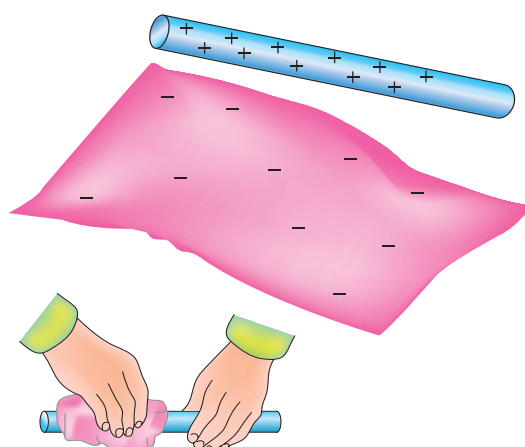
۷- اگر یک الکترون که بار الکتریکی آن در حدود  $1/6 \times 10^{-19} e$  کولن است، از نقطه‌ی  $A$  به نقطه‌ی  $B$  که اختلاف پتانسیل میانی آن دو نقطه یک ولت است برود، کار حاصل از انتقال آن چند ژول است؟

$$\text{ج) } W = 1/6 \times 10^{-19} \text{ ژول}$$

## آشنایی با روش های تولید الکتریسته

### هدف های رفتاری

- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می رود :
- ۱- روش های تولید الکتریسته را نام ببرد.
  - ۲- هر یک از روش های تولید الکتریسته را شرح دهد.
  - ۳- مورد استفاده ی هر یک از روش های تولید الکتریسته را نام ببرد.



پس از مالش دادن یک میله ی شیشه ای به پارچه ی ابریشمی، آن ها دارای بار الکتریکی می شوند.

شکل ۱-۲ الکتریسته ی مالشی (تریبو الکتریک)

در فصل اول، در مورد چگونگی خارج کردن الکترون ها از مدارهایشان سخن گفتیم ولی در مورد چگونگی انجام این کار توضیح ندادیم. این کار را به روش های زیر می توان انجام داد.

### ۱-۲ الکتریسته ی حاصل از اصطکاک (مالش)

هنگامی که پارچه ی ابریشمی را با یک میله ی شیشه ای یا یک میله ی کائوچویی را به پارچه ی پشمی مالش دهیم، بار الکتریکی تولید می شود. به این بارها **الکتریسته ی ساکن** می گویند. الکتریسته ی ساکن هنگامی به وجود می آید که جسمی الکترون هایش را به جسم دیگر منتقل کند. بر اثر مالش، انرژی حرارتی بر اتم های سطح خارجی به وجود می آید که موجب آزاد کردن الکترون های والانس می شود. به این **اثر تریبو الکتریک** (TRIBOELECTRIC) نیز می گویند.

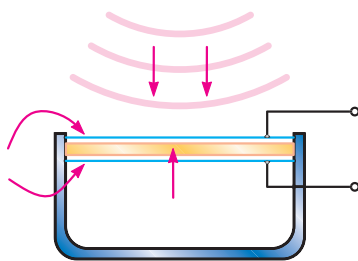
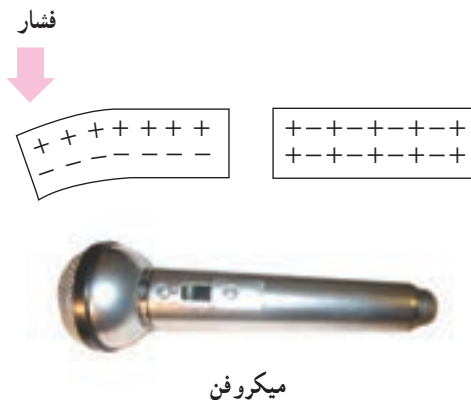
## ۲-۲- الکتریسیته حاصل از فعل و انفعالات شیمیایی

و آن‌ها را خنثی می‌کنند. در این حالت، محلول از نظر بارهای مثبت غنی‌تر است. یون‌های مثبت هیدروژن الکترون‌های آزاد میله‌ی مسی را جذب و محلول را دوباره خنثی می‌کنند ولی در این حالت، میله‌ی مسی کمبود الکترون خواهد داشت. در نتیجه، به‌طور مثبت باردار خواهد شد.

## ۲-۳- الکتریسیته حاصل از فشار مکانیکی

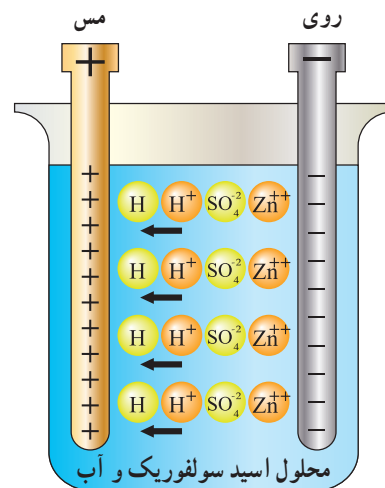
هنگامی که به بعضی اجسام فشار وارد می‌کنیم، الکترون‌های آن‌ها در جهت نیرو از مدار خارج می‌شوند. در نتیجه، الکترون‌ها یک طرف جسم را ترک می‌کنند و در طرف دیگر آن جمع می‌شوند. بنابراین، در دو جهت مخالف جسم بارهای مثبت و منفی به‌وجود می‌آیند.

به‌اثر فشار برای تولید بارهای الکتریکی، **اثر پیزوالکتریک<sup>۱</sup>** می‌گویند. پیزو یک کلمه‌ی یونانی به معنای فشار است. این اثر بیش‌تر در مورد کریستال‌ها و بعضی سرامیک‌های مخصوص خود را نشان می‌دهد. کریستال‌های پیزوالکتریک در بعضی میکروفون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۳- اثر پیزوالکتریک

مواد شیمیایی با فلزات مخصوصی ترکیب می‌شوند و واکنش‌هایی شیمیایی را ایجاد می‌کنند که باعث انتقال الکترون‌ها و تولید بارهای الکتریکی می‌گردد. باتری معمولی از این راه الکتریسیته تولید می‌کند. این پدیده بر قوانین الکتروشیمی مبتنی است. برای مثال، می‌توان باتری تر را نام برد. اسید سولفوریک هنگامی که در یک ظرف شیشه‌ای با آب (به عنوان الکترولیت) مخلوط می‌شود، به دو ماده‌ی شیمیایی - هیدروژن (H) و سولفات ( $\text{SO}_4$ ) - تجزیه می‌گردد. به علت طبیعت ترکیبات شیمیایی، اتم‌های هیدروژن یون‌های مثبت ( $\text{H}^+$ ) و اتم‌های سولفات یون‌های منفی ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) دارند. تعداد بارهای مثبت و منفی مساوی‌اند و در نتیجه، کل محلول از نظر بار الکتریکی خنثی است. پس از آن، هنگامی که میله‌های مسی یا روی را به داخل محلول وارد می‌کنیم، با محلول ترکیب می‌شوند.



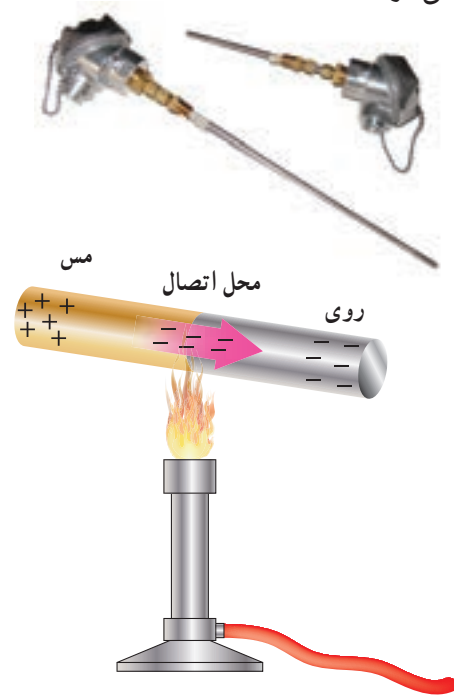
شکل ۲-۲- ساختمان یک نوع باتری تر

فلز روی با یون‌های سولفات ترکیب می‌شود. چون این اتم‌ها منفی‌اند، یون‌های مثبت ( $\text{Zn}^{++}$ ) از میله‌ی فلزی روی خارج می‌شوند. در اثر خارج شدن یون‌های مثبت از میله‌ی روی، میله دارای الکترون‌های اضافی می‌شود. پس به‌طور منفی باردار می‌گردد. یون‌های روی با یون‌های سولفات ترکیب می‌شوند

## ۲-۴- تولید الکتریسیته به وسیله حرارت

همان‌طور که در فصل قبل گفته شد، بعضی از اجسام الکترون از دست می‌دهند و بعضی دیگر الکترون جذب می‌کنند. در نتیجه بین دو جسم غیرمشابه هنگام اتصال، انتقال الکترون صورت می‌گیرد. فلزات فعال در درجه حرارت معمولی اتاق نیز می‌توانند الکترون آزاد کنند.

بارهایی که در درجه حرارت اتاق تولید می‌شوند، کم هستند؛ ولی اگر محل اتصال دو فلز (مثلاً روی و مس) را حرارت دهیم، انرژی بیشتری تولید می‌شود و الکترون‌های بیشتری آزاد می‌گردند. به روش تولید الکتریسیته به وسیله حرارت **ترموالکتریک** گفته می‌شود. هرچه حرارت داده شده بیش‌تر باشد، بار بیشتری تولید می‌شود. هنگامی که حرارت قطع شود، فلزها سرد می‌شوند و بارها از بین می‌روند. به اتصال این دو فلز **ترموکوپل** می‌گویند. هنگامی که چندین ترموکوپل به یک‌دیگر متصل شوند، یک **ترموپیل** (باتری حرارتی) به وجود می‌آید. از ترموکوپل برای اندازه‌گیری درجه حرارت در کوره‌ها استفاده می‌شود.

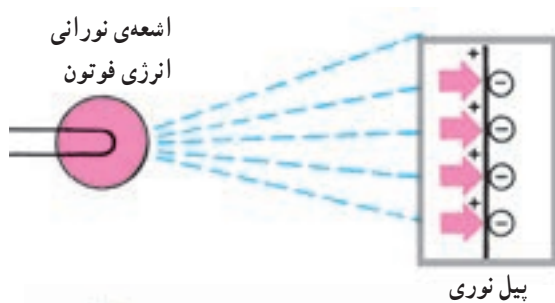


حرارت باعث انتقال الکترون از مس به روی می‌شود.

شکل ۲-۴- ترموالکتریک (الکتریسیته حرارتی) و یک نمونه واقعی آن

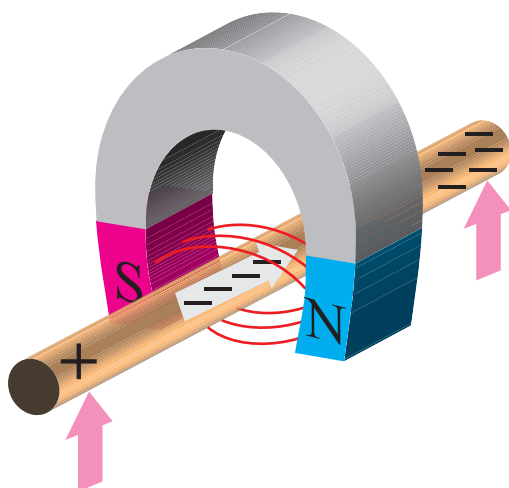
## ۲-۵- الکتریسیته حاصل از نور

نور نوعی انرژی است که از ذرات حامل انرژی به نام فوتون به وجود می‌آید. هنگامی که فوتون‌های یک شعاع نوری با جسمی برخورد می‌کنند، انرژی خود را از دست می‌دهند. در بعضی اجسام، انرژی فوتون‌ها باعث آزادی الکترون‌ها می‌شود. انرژی نورانی تابیده شده به یکی از دو صفحه متصل به هم، باعث تخلیه الکترون از یکی به دیگری می‌شود. در نتیجه، مانند باتری در دو صفحه بارهای مخالف ایجاد می‌شود (شکل ۲-۵) که به آن اثر فوتوولتیک<sup>۱</sup> می‌گویند.



شکل ۲-۵- سلول‌های خورشیدی که براساس اثر فوتوولتیک کار می‌کنند.

## ۶-۲- الکتریسیته‌ی حاصل از مغناطیس



از نیروی میدان مغناطیسی برای حرکت الکترون‌ها می‌توان استفاده کرد. هنگامی که یک هادی خوب مانند مس را در داخل میدان مغناطیسی یک آهنربا حرکت دهیم میدان مغناطیسی آن قدر انرژی دارد که اتم‌های مس، الکترون‌های والانسشان را آزاد کنند و در سیم در یک جهت به حرکت درآیند. به الکتریسیته‌ای که توسط نیروی میدان مغناطیسی حاصل شده است **الکتریسیته‌ی مغناطیسی** گفته می‌شود. اساس تولید الکتریسیته در ژنراتورهای الکتریکی این روش است.

شکل ۶-۲- الکتریسیته‌ی ناشی از مغناطیس



پرسش

- ۱- چه عاملی باعث خارج شدن الکترون‌ها از مدارهایشان می‌شود؟
- ۲- اثر وارد شدن فشار به کریستال برخی میکروفون‌ها چیست؟
- ۳- اثر تریبوالکتریک چیست؟
- ۴- در ترموالکتریک، به محل اتصال دو فلز ..... حرارت داده می‌شود.
- ۵- تفاوت بین ترموکوپل و ترموپیل چیست؟
- ۶- الکتریسیته‌ی حاصل از مغناطیس را بیان کنید.
- ۷- ژنراتور الکتریکی براساس ..... کار می‌کند.

## الکتریسته ی جاری

### هدف های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می رود :

- ۱- چگونگی حرکت الکترون ها و مفهوم سرعت حرکت الکترون ها را بیان کند.
- ۲- مفهوم جریان الکتریکی و تفاوت میان سرعت الکترون ها و سرعت انتقال اثر را شرح دهد.
- ۳- واحد کمیت های جریان و ولتاژ را تعریف کند و محاسبات لازم را انجام دهد.
- ۴- مدار باز و مدار بسته را تشریح کند.

### ۳-۱- الکترون آزاد

اغلب الکترون های والانس به طور مداوم ولی بدون ترتیب، مدارهایشان را عوض می کنند و سرگردان و بی مقصدند؛ یعنی، هیچ یک از الکترون های والانس مختص یک اتم نیستند بلکه همه ی اتم ها الکترون های والانسشان را به اشتراک می گذارند و بدین ترتیب به یک دیگر متصل می شوند. این گونه پیوند، **پیوند فلزی** نام دارد و الکترون های سرگردان و بی مقصد الکترون آزاد نامیده می شوند. بنابراین، الکترون های آزاد در یک سیم مسی به طور اتفاقی مدارهای خود را تغییر می دهند و این عمل مداوم است. بدین ترتیب، هر اتم همیشه الکترونی دارد که در حال جابه جا شدن است در نتیجه، هیچ بار الکتریکی ای حاصل نمی شود ولی هادی مقدار زیادی الکترون آزاد دارد.



الکترون آزاد

شکل ۳-۱- حرکت تصادفی الکترون های آزاد

### ۳-۲- حرکت الکترون

برای این که جریان الکتریکی تولید شود، همه ی الکترون های آزاد در سیم مسی باید در یک جهت حرکت کنند. این عمل را می توان با قرار دادن بارهای الکتریکی در ابتدا و انتهای سیم مسی انجام داد. بدین ترتیب که یک بار منفی در یک سر، و بار مثبت در سر دیگر قرار گیرد.

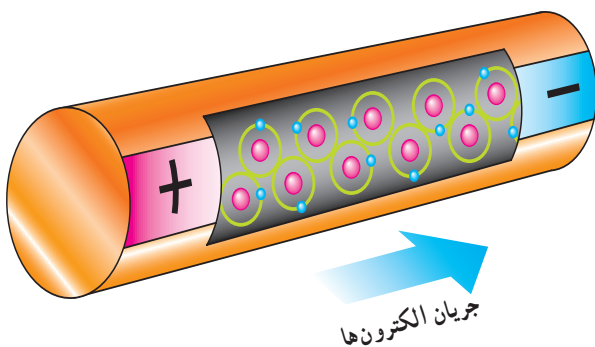
در شکل ۳-۲ الکترون های آزاد به وسیله ی بارهای منفی دفع و به وسیله بارهای مثبت جذب شده اند و در نتیجه، مدارهای آن ها عوض شده و به طرف بارهای مثبت جذب شده اند. بار الکتریکی الکترون ها منفی است؛ پس به وسیله ی بارهای منفی اعمالی دفع و به وسیله ی بارهای مثبت اعمالی جذب می شوند. به همین علت نمی توانند به مداری تغییر مکان دهند که باعث حرکت آن ها در خلاف جهت نیروی بارهای الکتریکی شود. در عوض، مدارهایشان را چنان تغییر می دهند که حرکتشان در جهت بار مثبت باشد. بدین لحاظ، جریان الکتریکی در جهت بار منفی به طرف بار مثبت برقرار می شود.

کیلومتر در ثانیه حرکت می‌کند و این مسافت را در کسری از ثانیه طی می‌کند.

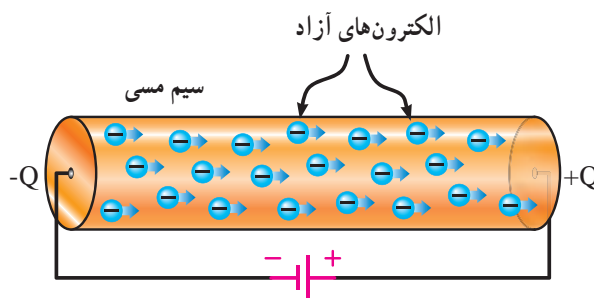
### ۳-۵- ضربان‌های الکترونی

جریان الکتریکی در واقع ضربان انرژی الکتریکی‌ای است که یک الکترون هنگام تغییر مدارش به الکترون دیگری انتقال می‌دهد. چون اتم‌ها خیلی به هم نزدیک‌اند و مدارهایشان روی هم قرار می‌گیرد؛ بنابراین، الکترونی که آزاد می‌شود، برای ورود به مدار تازه لازم نیست مسافت زیادی را طی کند. الکترون درست در لحظه‌ای که به مدار تازه وارد می‌شود بار منفی‌اش بر بار منفی الکترونی که در آن مدار وجود دارد اثر می‌گذارد و انرژی خود را به الکترون بعدی منتقل می‌کند تا آن را آزاد سازد. این عمل در آنی صورت می‌گیرد و همه‌ی الکترون‌ها نیز عیناً همین عمل را انجام می‌دهند. بدین ترتیب، با این که الکترون به آرامی حرکت می‌کند، ضربان انرژی الکتریکی که در اتم‌ها انتقال می‌یابد سرعت زیادی دارد که برابر  $299340$  کیلومتر در ثانیه است. به این الکترون‌های آزاد **حامل‌های جریان** می‌گویند.

ضربان انرژی الکتریکی در الکترون‌ها بسیار شبیه به انتقال ضربه در یک ردیف طولانی از گلوله‌های فلزی است. در شکل ۳-۵ هنگامی که در یک سر ردیف گلوله‌ها، ضربه‌ای به یک گلوله وارد شود، این نیروی ضربه‌ای به هر یک از گلوله‌ها انتقال می‌یابد تا این که گلوله‌ی آخر آزاد گردد. این عمل چنان به سرعت انجام می‌گیرد که تقریباً در همان لحظه‌ای که به گلوله‌ی اول ضربه زده می‌شود، گلوله‌ی آخر رها می‌شود.



شکل ۳-۴- ضربان‌های الکترونی



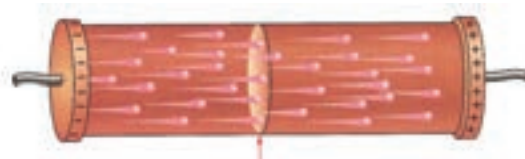
انرژی داده شده به مدار

شکل ۳-۲- حرکت الکترون‌ها

### ۳-۳- جریان الکتریکی

برای این که بتوانیم از انرژی الکتریکی برای انجام کار استفاده کنیم، الکتریسیته باید جاری باشد. این عمل وقتی صورت می‌گیرد که الکترون‌های آزاد در جهت معینی به حرکت درآیند و جریان الکتریکی تولید گردد.

هنگامی که تعداد زیادی الکترون‌های آزاد در یک سیم در یک جهت حرکت کنند، می‌گوییم جریان الکتریکی از سیم عبور می‌کند.



سطح فرضی سیم

شکل ۳-۳- جریان الکتریکی

### ۳-۴- عبور جریان

گاهی اوقات برای سادگی حرکت الکترون‌های آزاد را جریان الکتریکی می‌نامیم ولی صحیح‌تر این است که حرکت الکترون‌های آزاد را علت جریان الکتریکی بدانیم این موضوع با مقایسه سرعت یک الکترون با سرعت جریان روشن می‌شود.

الکترون آزادی که تحت تأثیر بارهای الکترواستاتیک به حرکت درمی‌آید، باید با نیروهای مداری اتمی مخالفت کند. در نتیجه، سرعت آن بسیار کم می‌شود و به حدود چند سانتی‌متر در ثانیه می‌رسد. اگر قرار بود که الکترون‌های آزاد در سیمی به طول  $30$  کیلومتر حرکت کنند، بیش از  $30$  روز طول می‌کشید اما می‌دانیم که جریان الکتریکی با سرعت نور یعنی  $300000$

نیروی ضربه زننده



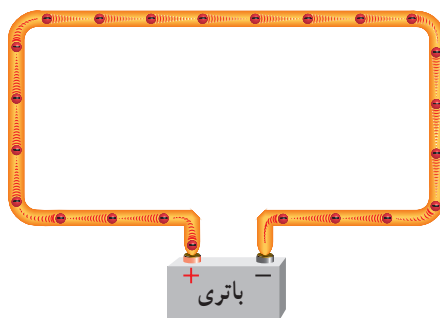
شکل ۳-۵ انتقال ضربه در گلوله‌های فلزی

### ۳-۶ شدت جریان الکتریکی

هنگامی که الکترون‌ها در جهت معینی حرکت کنند، جریان الکتریکی از مدار عبور می‌کند. بنابراین، اثر الکترون‌ها با یک دیگر جمع می‌شود و انرژی آزاد شده می‌تواند کار انجام دهد. هرچه تعداد الکترون‌های آزادی که در یک جهت حرکت می‌کنند بیش‌تر باشد، شدت جریان بیش‌تر است و مقدار انرژی بیش‌تری برای انجام دادن کار خواهیم داشت.

### ۳-۷ مدار کامل (بسته)

برای این که جریان الکتریکی برقرار شود، الکترون‌های آزاد باید به طور مداوم در جریان باشند، بدین لحاظ باید از منابع ولتاژ برای دادن بارهای مخالف به دو سر سیم استفاده شود. در این صورت، الکترون‌ها در قطب منفی سیم دفع شده و در طرف قطب مثبت به داخل منبع جذب می‌شوند. به ازای هر الکترونی که جذب منبع می‌شود، الکترون دیگری توسط طرف منفی منبع به سیم وارد می‌شود. در نتیجه، تا هنگامی که منبع ولتاژ تولید بار می‌کند، عبور جریان در سیم ادامه می‌یابد. چنین فرایندی یک مدار کامل (بسته) را تشکیل می‌دهد.



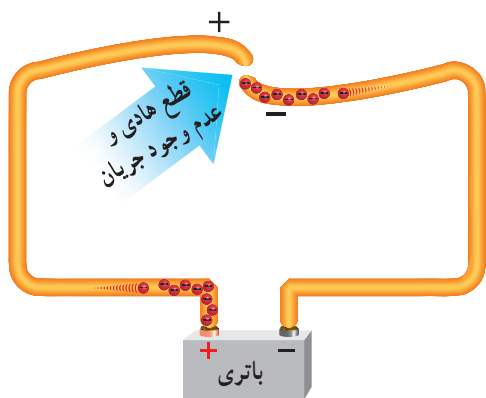
شکل ۳-۶ مدار کامل (بسته)

**قرارداد:** قبل از کشف حرکت الکترون‌ها (که منشأ جریان الکتریکی است) چنین تصور می‌شد که جریان از پتانسیل بیش‌تر

(مثبت) به طرف پتانسیل کم‌تر (منفی) برقرار می‌شود. پس، جهت جریان انرژی الکتریکی را نیز از قطب مثبت به طرف قطب منفی در نظر می‌گرفتند. اکنون ما با این که می‌دانیم حرکت الکترون‌ها از قطب منفی به طرف قطب مثبت است اما طبق همان قرارداد قدیمی در خارج از منبع، جهت جریان را از قطب مثبت به طرف قطب منفی در نظر می‌گیریم.

### ۳-۸ مدار باز

طبق شکل ۳-۷ اگر در یک مدار بسته سیم قطع شود، الکترون‌ها در انتهایی از سیم که به قطب منفی باتری متصل است، جمع می‌شوند و الکترون‌های آزاد انتهایی دیگر سیم به قطب مثبت جذب می‌گردند؛ بنابراین، بین دو سر قطع شدگی اختلاف بار به وجود می‌آید که با اختلاف بار الکتریکی منبع برابر است. در نتیجه، جریانی از مدار عبور نمی‌کند. به چنین مداری، **مدار باز** می‌گویند.



شکل ۳-۷ مدار باز

### ۳-۹ حالت اتصال کوتاه

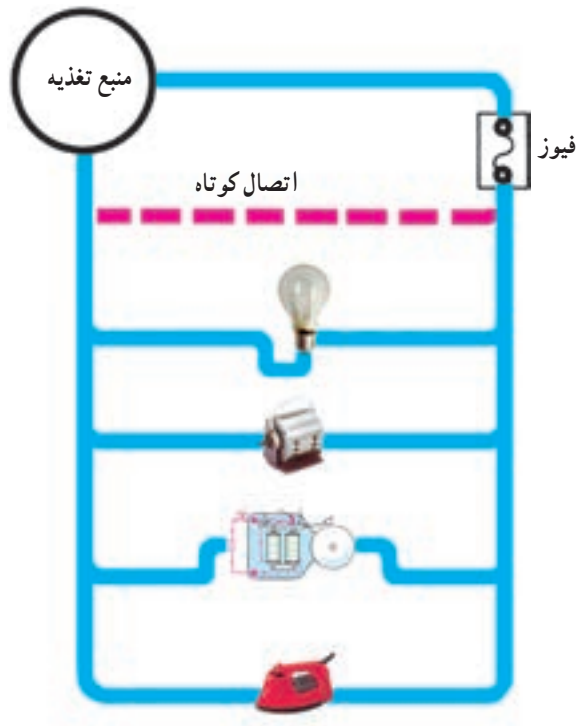
هنگامی که یک سیم هادی مستقیماً به دو ترمینال یک باتری یا ژنراتور متصل می‌شود، مدار **اتصال کوتاه** ایجاد می‌گردد و جریانی بیش‌تر از آنچه باتری یا ژنراتور می‌تواند تغذیه کند، از سیم می‌گذرد. ممکن است باتری یا ژنراتور بسوزد و سیم خیلی داغ شود. به همین دلیل، از فیوزهای محافظ استفاده می‌کنند. هنگامی که جریان زیادی از سیم عبور کند، این فیوزها

عمل کرده و مدار باز می شود.

از سیم در دستگاه های الکتریکی برای جاری شدن جریان استفاده می شود تا این دستگاه ها را به کار اندازد. برای مثال، یک رشته سیم جریان را حمل می کند تا فیلامان لامپ گرم شود و نور به وجود آید یا انرژی الکتریکی لازم برای به راه افتادن موتور تأمین شود، زنگی به صدا درآید یا اتو گرم شود.

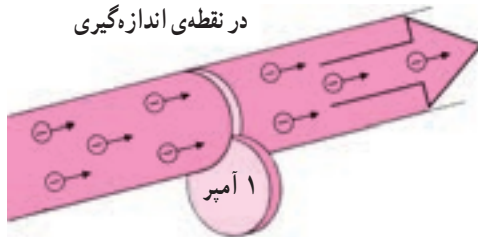
شکل ۸-۳ کاربردهای مختلف الکتریسیته ی جاری را

نمایش می دهد.



شکل ۸-۳ کاربردهای الکتریسیته ی جاری

نشان داد که در آن  $q$  مقدار الکتریسیته بر حسب کولن،  $I = \frac{q}{t}$  زمان بر حسب ثانیه و  $I$  شدت جریان بر حسب آمپر است. نام این واحد - یعنی آمپر - از نام یک فیزیک دان ایتالیایی قرن هجدهم به نام آندره ماری آمپر گرفته شده است.



$$1 \text{ آمپر} = \frac{\text{یک کولن}}{\text{یک ثانیه}} = \frac{6/28 \times 10^{18}}{1} = 6/28 \times 10^{18} \text{ e}$$

شکل ۹-۳- تعریف آمپر

مثال ۱: اگر  $12/56 \times 10^{18}$  الکترون در مدت ۲ ثانیه در جهت مشخص از سیمی بگذرد، شدت جریان عبوری از سیم چه قدر است؟

$$q = \frac{12/56 \times 10^{18}}{6/28 \times 10^{18}} = 2 \text{ کولن}$$

$$I = \frac{q}{t} = \frac{2}{2} = 1 \text{ A}$$

### ۱۱-۳- اجزا و اضعاف واحدهای اصلی الکتریکی

در مباحث الکتریکی اغلب؛ مقدار عددی کمیت های مختلف به همراه واحد آن ها بیان می شود. در برخی موارد ممکن است واحد مربوطه با ضریبی کوچک تر (اجزا) و یا بزرگ تر (اضعاف) از واحد اصلی بیان شود. برای تبدیل هر کمیت به واحد اصلی لازم است تا از مقادیر عددی نمایش داده شده در جدول ۱-۳ استفاده کرد.

### ۱۰-۳- واحد اندازه گیری شدت جریان (آمپر)

تعداد الکترون هایی که از یک نقطه ی مدار می گذرند، مقدار جریان عبوری از مدار را تعیین می کنند. اگر از یک نقطه ی سیم در یک ثانیه ۱ کولن الکتریسیته ( $6/28 \times 10^{18}$  الکترون) در جهت مشخص بگذرد، می گوئیم شدت جریان عبوری ۱ آمپر است. بنابراین تعریف رابطه ی شدت جریان را می توان به صورت

### جدول ۳-۱- اجزا و اضعاف واحدهای اصلی

حرف اختصاری	نام ضریب	شکل نمایی ضریب	مقدار ضریب
T	ترا	$10^{12}$	۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
G	گیگا	$10^9$	۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
M	مگا	$10^6$	۱۰۰۰۰۰۰۰
k	کیلو	$10^3$	۱۰۰۰
h	هکتو	$10^2$	۱۰۰
da	دکا	$10$	۱۰
	واحد اصلی	$10^0$	۱
d	دسی	$10^{-1}$	۰/۱
c	سنتی	$10^{-2}$	۰/۰۱
m	میلی	$10^{-3}$	۰/۰۰۱
$\mu$	میکرو	$10^{-6}$	۰/۰۰۰۰۰۱
n	نانو	$10^{-9}$	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱
p	پیکو	$10^{-12}$	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱

$$R = 2/2 \times 10^3 = 2200$$

مثال ۴: ولتاژ نشان داده شده در بین دو سیم شکل (۳-۱۲) معادل چند میلی‌ولت است؟



شکل ۳-۱۲

$$V = 230 \times 10^3 = 230000 \text{ V}$$

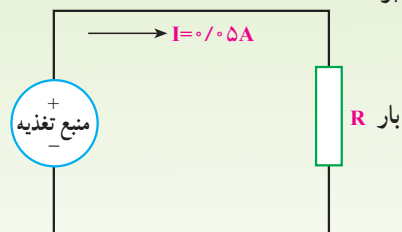
$$V = 230000 \div 10^3 = 230000 \times 10^{-3}$$

$$= 23 \times 10^4 \times 10^{-3} = 23 \times 10^1$$

$$V = 230000000 \text{ mV}$$

مثال ۲: شدت جریان عبوری از مدار شکل (۳-۱۰) معادل

چند میلی‌آمپر است؟



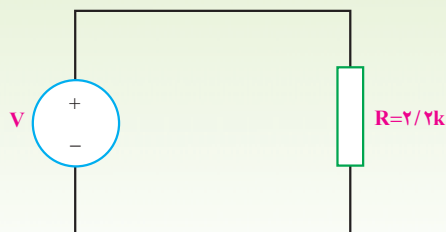
شکل ۳-۱۰

$$I = 0.05 \times 10^3 = 5 \times 10^{-2} \times 10^3$$

$$I = 50 \text{ mA}$$

مثال ۳: مقاومت R در مدار شکل (۳-۱۱) معادل چند

اهم است؟



شکل ۳-۱۱



- ۱- جریان الکتریکی را تعریف کنید.
- ۲- پیوند فلزی چیست؟
- ۳- آیا مدار الکترون‌های اتم‌های مختلف در یک سیم با یک‌دیگر تداخل می‌کنند؟
- ۴- ضربان الکترون‌ها چیست و چرا با سرعت الکترون تفاوت دارد؟
- ۵- چگونه فیوز از عبور جریان زیاد در مدار جلوگیری می‌کند؟
- ۶- آیا الکترون‌ها تحت تأثیر یک ولتاژ، با سرعت نور از اتمی به اتم دیگر می‌روند؟

## آثار جریان الکتریکی

### هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنجار انتظار می‌رود:

- ۱- آثار جریان الکتریکی را نام ببرد.
- ۲- هر کدام از این آثار را با ذکر مثال‌هایی توضیح دهد.

یک نمونه از کاربرد الکترولیز، آبکاری برقی است. اگر آب با سولفات مس ( $\text{SO}_4\text{Cu}$ ) همراه باشد، سولفات مس به یون‌های مثبت مس ( $\text{Cu}^{++}$ ) و یون‌های منفی سولفات ( $\text{SO}_4^{--}$ ) تجزیه می‌شود. یون‌های مس به سمت الکترود منفی می‌روند و الکترون جذب می‌کنند ولی چون مس فلز است، به الکترود خواهد چسبید. پس از مدتی، الکترود به طور کامل در لایه‌ای از مس پوشیده خواهد شد. از این طریق می‌توان با نقره و طلا نیز آبکاری کرد.

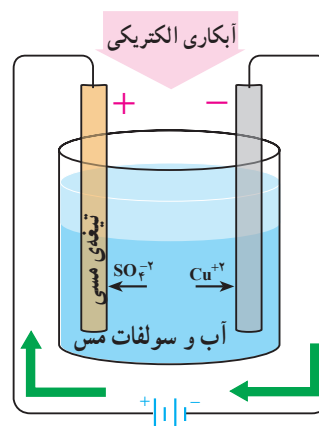
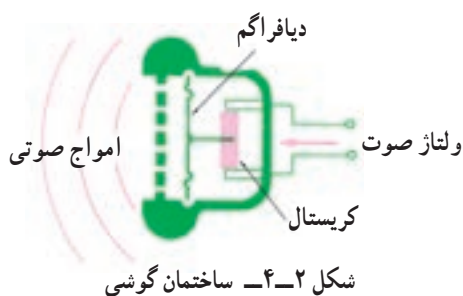
جریان الکتریکی، واکنش‌های شیمیایی، فشار، گرما، نور و مغناطیس تولید می‌کند. در فصل دوم دیدیم که همین آثار می‌توانند برای تولید انرژی الکتریکی به کار روند.

### ۱-۴- تولید واکنش‌های شیمیایی از طریق جریان الکتریکی

بار الکتریکی نیروی اصلی است که باعث پیوند شیمیایی ترکیبات می‌شود؛ به همین دلیل، برای ایجاد اثرات شیمیایی می‌توان از جریان الکتریکی یا اختلاف پتانسیل الکتریکی استفاده کرد. در الکتروشیمی به این پدیده **الکترولیز** می‌گویند.

### ۲-۴- تولید فشار به وسیله‌ی جریان الکتریکی

همان‌طور که نیرو یا فشار در بعضی از کریستال‌ها خمش یا چرخش ایجاد می‌کند، اختلاف پتانسیل الکتریکی نیز باعث خمش یا چرخش در کریستال می‌شود و نیرو تولید می‌گردد. در شکل ۲-۴ وقتی ولتاژ صوتی به کریستال‌های گوشه‌ای داده می‌شود، کریستال‌ها ارتعاش می‌کنند و دیافراگم را می‌لرزانند. در نتیجه‌ی این امر، صدا از طریق گوشه‌ی شنیده می‌شود.



شکل ۱-۴- آبکاری برقی با استفاده از الکترولیز

### ۳-۴- تولید گرما به وسیله‌ی جریان الکتریکی

جریان الکتریکی هنگام عبور از سیم، در آن مقداری گرما تولید می‌کند. این بدان علت است که مقداری انرژی مصرف می‌شود تا جریان از سیم عبور کند و این انرژی به صورت گرما ظاهر می‌شود. چون عبور جریان از یک هادی خوب آسان‌تر است، نتیجه می‌گیریم که در آن حرارت کم‌تری تولید می‌شود. شکل ۳-۴ موارد استفاده‌ی اثر حرارتی الکتریسیته را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۴ موارد استفاده‌ی اثر حرارتی الکتریسیته

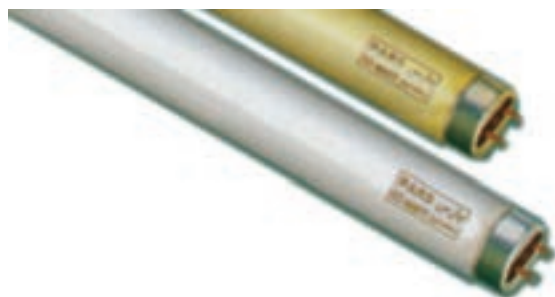


لامپ معمولی

### ۴-۴- تولید نور به وسیله‌ی جریان الکتریکی

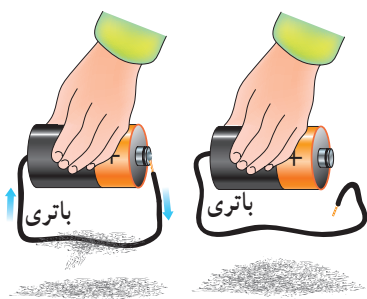
وقتی که از هادی‌های ضعیف جریانی عبور می‌کند، داغ می‌شوند و این گرما را به صورت نور قرمز یا سفید ظاهر می‌کنند. در نتیجه، به علت گرما و التهاب، درخشش و روشنایی تولید می‌شود که اساس کار لامپ رشته‌ای است. نور را می‌توان بدون حرارت زیاد نیز توسط جریان الکتریکی تولید کرد.

بسیاری از گازها به هنگام هدایت جریان یونیزه می‌شوند و تابش‌های نوری تولید می‌کنند. نئون، آرگون و بخار جیوه را می‌توان به عنوان مثال نام برد. موارد استفاده‌ی آن را نیز در



فلورسانس

شکل ۴-۴ دو نوع لامپ برای تبدیل جریان الکتریکی به نور



شکل ۵-۴- تولید خاصیت مغناطیس توسط جریان الکتریکی

## ۵-۴- تولید مغناطیس به وسیله‌ی جریان الکتریکی

هر هادی که جریان الکتریکی از آن بگذرد، مانند یک مغناطیس عمل می‌کند. به این خاصیت، **خاصیت مغناطیسی** می‌گویند.

در شکل ۵-۴ هنگامی که جریان الکتریکی از سیم عبور کند، سیم مانند مغناطیس عمل می‌کند و براده‌های آهن را جذب می‌نماید. در صورت قطع شدن سیم، خاصیت مغناطیسی سیم از بین می‌رود و براده‌ها می‌افتند.



پرسش

- ۱- پنج اثر جریان الکتریکی را نام ببرید.
- ۲- آبکاری برقی چیست؟
- ۳- یک هادی خوب حرارت بیش‌تری تولید می‌کند یا یک هادی ضعیف؟ فلزی را نام ببرید که با عبور جریان الکتریکی از آن حرارت زیادی تولید کند.
- ۴- لامپ معمولی چگونه نور تولید می‌کند؟
- ۵- در لامپ‌های نئون از یک ..... به عنوان هادی استفاده شده است.
- ۶- گوشی کریستالی براساس چه قانونی کار می‌کند؟ کدام وسایل دیگر نیز بر مبنای این قانون کار می‌کنند؟
- ۷- خاصیت مغناطیسی تولید شده توسط الکتریسیته چیست؟

## مغناطیس و الکترومغناطیس

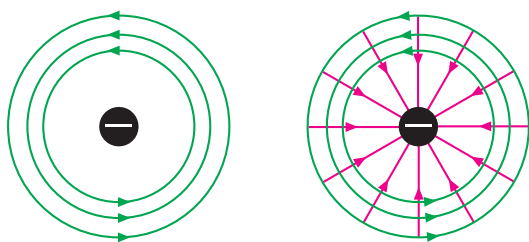
### هدف‌های رفتاری

- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :
- ۱- میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی بار الکتریکی الکترون را شرح دهد.
  - ۲- مولکول مغناطیسی را شرح دهد.
  - ۳- اجسام مغناطیسی را نام ببرد.
  - ۴- روش‌های ساختن یک مغناطیس و از بین بردن خاصیت مغناطیسی یک آهن‌ربا را شرح دهد.
  - ۵- خطوط میدان و میدان مغناطیسی را تعریف کند.
  - ۶- پوشش مغناطیسی را شرح دهد.
  - ۷- الکترومغناطیس را تعریف کند.
  - ۸- اثر الکترومغناطیس را در یک سیم بیان کند.
  - ۹- چگونگی تعیین جهت میدان در یک سیم و بوبین را بیان کند.
  - ۱۰- اثر الکترومغناطیس در دو سیم جریان‌دار را شرح دهد.
  - ۱۱- اثر الکترومغناطیس را در یک حلقه شرح دهد.
  - ۱۲- اثر الکترومغناطیس را در بوبین شرح دهد و دلیل قوی‌تر شدن میدان مغناطیسی بوبین با هسته‌ی مغناطیسی را توضیح دهد.
  - ۱۳- کاربردهای مغناطیس را نام ببرد و ساختمان ساده‌ی هر یک از وسایلی را که با مغناطیس کار می‌کنند، به‌طور مختصر توضیح دهد.

### ۱-۵- سنگ آهن مغناطیسی

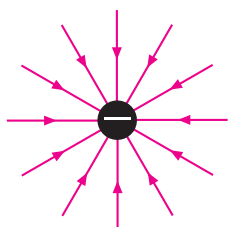
را مغناطیس خواندند. بعدها کشف شد که اگر این سنگ را به‌وسیله‌ی یک نخ آویزان کنند، به‌خودی‌خود جنوب و شمال را مشخص می‌کند. به همین دلیل، آن را سنگ راهنما یا آهن‌ربا نامیدند. پس آهن‌ربا در اصل یک مغناطیس طبیعی است.

در حدود دو هزار سال پیش یونانیان قدیم سنگ آهن مغناطیسی را کشف کردند. چون این سنگ‌ها آهن را جذب کردند و در ناحیه‌ی مگزی یا در آسیای صغیر پیدا شده بود، آن‌ها



میدان مغناطیسی

میدان الکترومغناطیس



میدان الکتریسیته‌ی ساکن

شکل ۵-۲- میدان الکترومغناطیسی



شکل ۵-۱- سنگ آهن طبیعی

## ۵-۲- میدان الکترومغناطیسی

نیروهای الکتریکی و مغناطیسی به یکدیگر مربوط اند ولی کاملاً با هم تفاوت دارند. نیروهای مغناطیسی و نیروهای الکترواستاتیک تا هنگامی که حرکتی وجود نداشته باشد، بر یکدیگر بی‌اثرند ولی در صورتی که میدان نیروی هر یک از آن‌ها متحرک باشد، اثرات متقابل برهم می‌گذارند. چون الکترون کوچک‌ترین جزء هر اتم است، برای تشریح رابطه‌ی بین الکتریسیته و مغناطیس نظریه‌ای به وجود آمده است که به آن نظریه‌ی **الکترومغناطیس** می‌گویند.

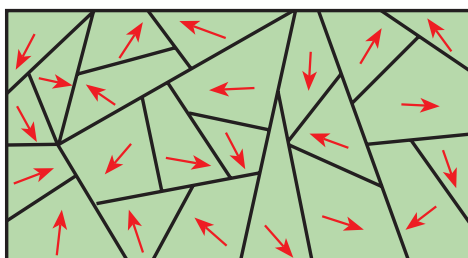
می‌دانیم که الکترون دارای بار منفی است. این بار خطوط نیروی الکتریکی‌ای تولید می‌کند که از تمام جهات به الکترون وارد می‌شوند. بار گردنده نیز به علت حرکت وضعی، در اطراف خود میدان مغناطیسی تولید می‌کند. این میدان به صورت دایره‌ای هم مرکز در دور الکترون نشان داده می‌شود. در هر نقطه، خطوط نیروی الکتریکی و خطوط نیروی مغناطیسی بر یکدیگر عمودند. به ترکیب این دو میدان، **میدان الکترومغناطیسی** می‌گویند.

## ۵-۳- مولکول مغناطیسی

عناصر آهن، نیکل، کبالت و کادمیم تنها انواع فلزات مغناطیسی طبیعی هستند ولی چون همه‌ی عناصر الکترون دارند، این سؤال پیش می‌آید که چرا همه‌ی اجسام خاصیت مغناطیسی (آهن‌ربایی) ندارند. پاسخ این است که هر جفت الکترون در مدارها دارای گردش وضعی مخالف یکدیگرند. لذا میدان‌های مغناطیسی مخالف هم ایجاد می‌کنند که یکدیگر را خنثی می‌سازند. ممکن است این فکر پیش آید که فقط اجسامی که تعداد الکترون‌هایشان فرد است، خاصیت مغناطیسی دارند. پاسخ این است که اگر این اتم‌ها می‌توانستند به صورت مجزا باشند، این فکر درست بود ولی هنگامی که اتم‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا مولکول تشکیل دهند، خود را به صورتی درمی‌آورند که ۸ الکترون والانس داشته باشند و در نتیجه‌ی چرخش‌های وضعی الکترون‌ها در اغلب اجسام، میدان مغناطیسی هم‌دیگر را خنثی می‌کنند. در شکل ۵-۳ با حرکت وضعی جفت الکترون‌ها اثر مغناطیسی آن‌ها خنثی می‌شود.

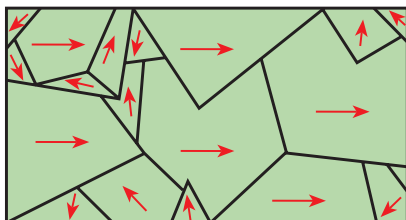
از جمله‌ی این مواد آهن و آلیاژهای آهن هستند که به آن‌ها **مواد فرو مغناطیسی** می‌گویند. فرو در یونانی به معنی آهن است.

اجسام مغناطیسی مولکول‌های مغناطیسی دارند. پس ظاهراً باید همیشه مانند مغناطیس عمل کنند ولی چنین نیست. این بدان علت است که در شرایط عادی، مولکول‌های مغناطیسی به‌طور پراکنده و نامرتب در جسم قرار دارند و در نتیجه، میدان‌های مغناطیسی مولکول‌ها یک‌دیگر را خنثی می‌کنند؛ بنابراین، فلز خاصیت مغناطیسی ندارد. در شکل ۵-۵ مولکول‌های مغناطیسی یک فلز مغناطیس نشده را مشاهده می‌کنید.



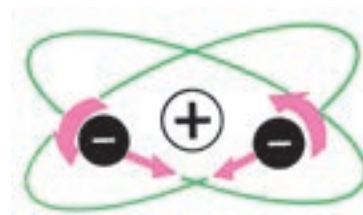
شکل ۵-۵ فلز مغناطیس نشده

اگر همه‌ی مولکول‌های مغناطیسی به‌طور هم‌جهت قرار بگیرند، میدان‌های مغناطیسی آن‌ها با یک‌دیگر جمع شده و در این صورت فلز مغناطیس می‌شود. اگر فقط بعضی از مولکول‌ها هم‌جهت باشند، میدان مغناطیسی ضعیفی تولید می‌شود. بنابراین، میزان مغناطیس شدن یک جسم مغناطیسی را می‌توان کم و زیاد کرد. شکل ۵-۶ مولکول‌های مغناطیسی منظم شده در یک فلز مغناطیس شده را نشان می‌دهد.



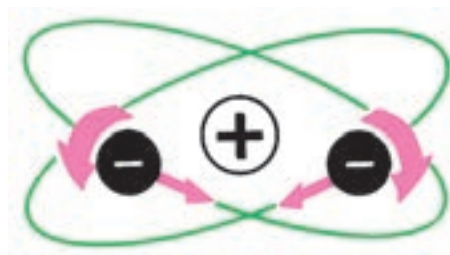
شکل ۵-۶ فلز تقریباً مغناطیس شده

اجسام غیر مغناطیسی: برخی از اجسام تقریباً خاصیت مغناطیسی ندارند. این اجسام را **اجسام غیر مغناطیسی** می‌نامند؛ مانند روی و چوب. اجسام غیر مغناطیسی به دو گروه پارامغناطیس و دیامغناطیس تقسیم می‌شوند.



شکل ۵-۳ اتم غیر مغناطیس

بنا به دلایلی، این حالت در فلزات گفته شده در بالا وجود ندارد. هنگامی که اتم‌های این فلزات با یک‌دیگر ترکیب می‌شوند، به صورت یون درمی‌آیند و الکترون‌های والانشان را طوری به اشتراک می‌گذارند که بسیاری از میدان‌های مغناطیسی حاصل از چرخش‌های وضعی الکترون‌ها یک‌دیگر را خنثی نمی‌کنند، بلکه به هم اضافه می‌شوند. این عمل باعث به‌وجود آمدن ذرات مغناطیسی در فلز می‌شود. به ذرات مغناطیسی، **مولکول‌های مغناطیسی** نیز می‌گویند. مولکول‌های مغناطیسی عیناً مانند مغناطیس‌های کوچک عمل می‌کنند. اگر چه آهن، نیکل و کبالت تنها اجسام مغناطیسی طبیعی هستند ولی با به‌کارگیری روش‌های مخصوص می‌توان ترکیباتی ساخت و به آن‌ها خاصیت آهن‌ربایی داد. در شکل ۵-۴ در مولکول‌های مغناطیسی حرکت وضعی الکترون‌ها طوری است که میدان‌های مغناطیسی یک‌دیگر را خنثی نمی‌کنند؛ بنابراین، مولکول خاصیت مغناطیسی دارد.



شکل ۵-۴ اتم مغناطیسی

## ۵-۴- خواص مغناطیسی اجسام

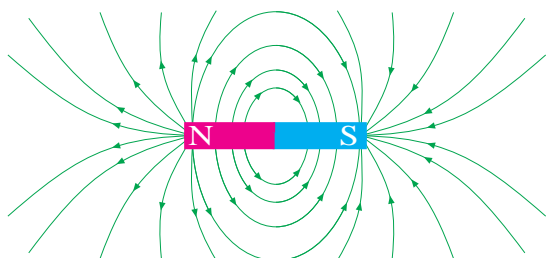
اجسام در طبیعت از نظر خواص مغناطیسی به دو دسته تقسیم می‌شوند: الف - اجسام مغناطیسی، ب - اجسام غیر مغناطیسی.

اجسام مغناطیسی: اجسامی که خواص آهن‌ربایی از خود نشان می‌دهند، دارای خاصیت مغناطیسی یا آهن‌ربایی هستند.

تحت تأثیر میدان مغناطیسی آهن ربا نیست و دوباره به طرف قطب شمال زمین جذب می شود. فضایی را که در آن آهن ربا بر اجسام مغناطیسی دیگر اثر می گذارد، **میدان مغناطیسی** می گویند.

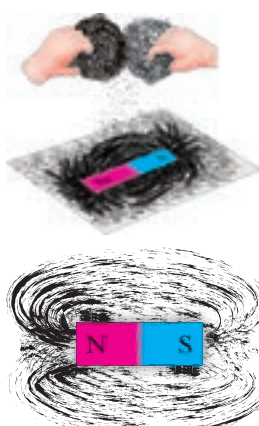
## ۵-۶ - خطوط نیرو (فلو - شار)

میدان مغناطیسی یک آهن ربا از خطوط نیرویی تشکیل شده است که بنا به قرارداد، از قطب N بیرون می آیند، در فضا امتداد می یابند و به قطب S وارد می شوند. این خطوط نیرو یک دیگر را قطع نمی کنند و مرتباً از آهن ربا دور می شوند. هر چه خطوط نیرو به یک دیگر نزدیک تر و تعدادشان بیش تر باشد، میدان مغناطیسی قوی تر است. خطوط نیرو یا شار مغناطیسی را با (فی) نشان می دهند.



شکل ۵-۸ - نمودار خطوط نیروی مغناطیسی

وجود خطوط نیرو با پاشیدن براده های آهن بر یک سطح صاف و قرار دادن آهن ربایی در زیر آن معلوم می شود. براده های آهن به طور مرتب در طول خطوط نیرو قرار می گیرند و جهت گیری میدان را نشان می دهند. به این خطوط نیرو **فلو** نیز می گویند.

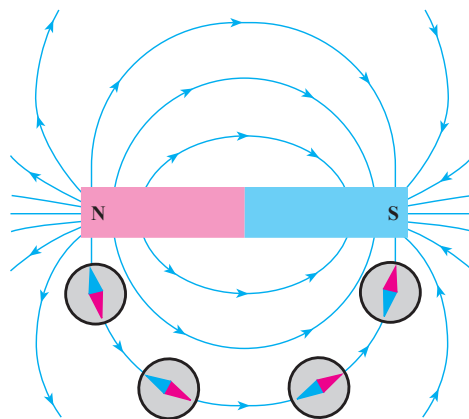


شکل ۵-۹ - براده های ریز آهن نشانگر خطوط قوای مغناطیسی

هرگاه چند ماده ی غیر مغناطیسی را به یک آهن ربای بسیار قوی نزدیک کنیم، برخی از آن ها به آرامی جذب و برخی دیگر به آرامی دفع می شوند. البته این جذب و دفع ها ممکن است آن قدر ضعیف و کند باشد که به چشم دیده نشود. موادی که فقط به مقدار خیلی جزئی جذب آهن ربا می شوند، به مواد پارامغناطیسی موسوم اند؛ مانند چوب، اکسیژن، آلومینیم و پلاتین. موادی که فقط به مقدار خیلی جزئی از آهن ربا دفع می شوند، مواد دیامغناطیس نامیده می شوند؛ مانند روی، نمک، طلا و جیوه.

## ۵-۵ - میدان مغناطیسی

با توجه به جذب و دفع قطب های مغناطیسی، می توان چنین نتیجه گرفت که نیروهای خارج شده از قطب های مغناطیسی باعث این اثر می شوند. البته این رویداد فقط در قطب ها اتفاق نمی افتد، بلکه نیروی مغناطیسی مغناطیس را در یک میدان دربرمی گیرند. این پدیده را طبق شکل ۵-۷ می توان هنگام حرکت قطب نما در اطراف یک آهن ربا مشاهده کرد. در هر موقعیت، در دور آهن ربا یک انتهای عقربه ی قطب نما در جهت قطب مخالف آهن ربا قرار می گیرد.

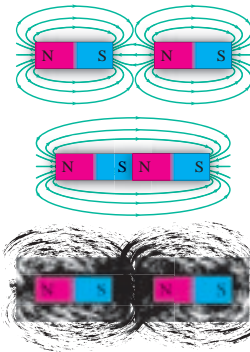


شکل ۵-۷ - میدان مغناطیسی آهن ربا

هم چنین، با قرار دادن قطب نما در فاصله های دورتر از آهن ربا می توان مشاهده کرد که این میدان مغناطیسی دورتر از آهن ربا نیز وجود دارد. چنان چه قطب نما را به آرامی از آهن ربا دور کنیم، به نقطه ای خواهیم رسید که عقربه ی قطب نما دیگر

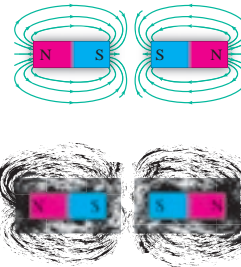
## ۵-۷ اثر متقابل میدان‌های مغناطیسی

هنگامی که دو مغناطیس در مجاورت هم قرار گیرند، میدان‌های مغناطیس آن‌ها بر یک‌دیگر اثر می‌کنند. اگر خطوط نیرو هر دو در یک جهت باشند، یک‌دیگر را جذب می‌کنند و به هم می‌رسند. به همین دلیل است که قطب‌های ناهمنام یک‌دیگر را جذب می‌کنند.



شکل ۵-۱۰ - نیروهای جاذبه بین دو قطب غیرهمنام

اگر خطوط نیرو در جهت‌های مخالف باشند، نمی‌توانند با هم ترکیب شوند و چون نمی‌توانند یک‌دیگر را قطع کنند، نیروهای مخالف بر یک‌دیگر وارد می‌کنند. به همین دلیل است که قطب‌های همنام یک‌دیگر را دفع می‌کنند. این اثر متقابل خطوط نیرو را به وسیله‌ی براده‌های آهن نیز می‌توان نشان داد.



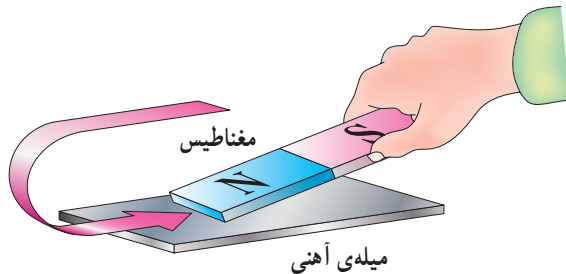
شکل ۵-۱۱ - نیروهای دافعه بین دو قطب همنام

## ۵-۸ روش‌های به‌وجود آوردن خاصیت مغناطیسی آهن‌ربا (آهن‌رباهای مصنوعی)

جسم آهنی (فرومغناطیسی) را می‌توان با منظم کردن مولکول‌های مغناطیسی‌اش مغناطیسی کرد. بهترین راه انجام این عمل، وارد کردن نیروی مغناطیسی است. این نیرو بر میدان

مغناطیسی هر مولکول اثر کرده و همه‌ی آن‌ها را در یک جهت منظم می‌کند. ساخت آهن‌رباهای مصنوعی به دو روش امکان‌پذیر است: (۱) مالش مغناطیسی، (۲) جریان الکتریکی.

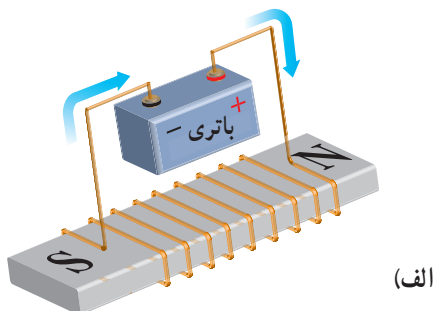
۱- مالش مغناطیسی: هنگامی که جسم مغناطیس شده به سطح یک آهن مغناطیس نشده (طبق شکل ۵-۱۲) مالش داده شود، میدان مغناطیسی، مولکول‌های آهن را مرتب می‌کند و آهن مغناطیس می‌شود.



شکل ۵-۱۲ - مغناطیس کردن فلز در اثر مالش مغناطیس

۲- جریان الکتریکی: اگر سیمی را به دور یک قطعه آهن مغناطیس نشده بپیچیم و دو سر آن را به یک منبع ولتاژ DC وصل کنیم، جریان الکتریکی میدان مغناطیسی تولید می‌کند و باعث منظم شدن مولکول‌های مغناطیسی آهن می‌شود. شکل ۵-۱۳ چگونگی تولید قطعه‌ی مغناطیسی به وسیله‌ی جریان الکتریکی DC<sup>۱</sup> را نمایش می‌دهد.

اگر یک جسم مغناطیس شده خاصیت مغناطیسی خود را برای مدت طولانی حفظ کند، به آن **مغناطیس دائمی** می‌گویند و اگر خاصیت مغناطیسی خود را به سرعت از دست بدهد، **مغناطیس موقتی** نام دارد. آهن سخت و فولاد مغناطیس‌های دائمی خوبی هستند. آهن نرم برای مغناطیس‌های موقتی به کار برده می‌شود.

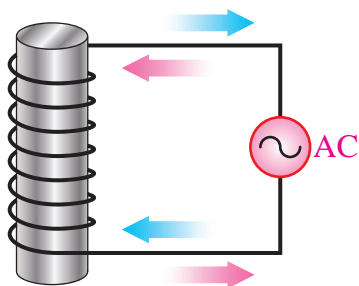




شکل ۱۵-۵- خنثی کردن اثر مغناطیسی یک آهن ربا به وسیله گرما

### ۳- جریان الکتریکی متناوب (AC): اگر مغناطیس را

در میدانی مغناطیسی قرار دهیم که جهت آن به سرعت تغییر می کند، نظم مولکول ها به هم می خورد؛ زیرا مولکول ها می خواهند از میدان پیروی کنند. میدان مغناطیسی متغیر را می توان به وسیله ی یک جریان متناوب تولید کرد. این مطلب را در آینده توضیح خواهیم داد.



شکل ۱۶-۵- خنثی کردن اثر مغناطیسی توسط جریان متناوب (AC)

### ۱۰-۵- پوشش مغناطیسی

خطوط نیروی مغناطیسی می توانند از اجسام - حتی آن هایی که خواص مغناطیسی نیز ندارند - بگذرند. البته بعضی از اجسام در مقابل عبور خطوط نیرو (فلو) مقاومت می کنند. به این خاصیت (مقاومت در برابر عبور خطوط نیرو) **رلوکتانس** می گویند. اجسام مغناطیسی در مقابل عبور خطوط نیرو رلوکتانس خیلی کمی دارند. در نتیجه، خطوط فلو به وسیله ی یک جسم مغناطیسی حتی با طی کردن مسیری طولانی جذب می شوند. این خاصیت باعث می شود که بتوانیم اجسام را به وسیله ی پوششی از ماده ی مغناطیسی در مقابل خطوط فلو محافظت کنیم. از این



(ب)

شکل ۱۳-۵- کاربرد جریان DC برای تولید مغناطیس

### ۹-۵- روش های از بین بردن خاصیت مغناطیسی آهن ربا

برای از بین بردن خاصیت مغناطیسی یک آهن ربا باید مولکول های مغناطیسی آن را دوباره به صورت نامرتب درآوریم تا میدان هایشان در خلاف جهت یک دیگر قرار گیرد. این عمل به سه روش انجام می گیرد: ۱- ضربه ی سخت، ۲- گرما، ۳- جریان الکتریکی متناوب.

۱- ضربه ی سخت: اگر به یک آهن ربا ضربه ی سختی وارد کنیم، نیروی وارد شده مولکول ها را به شدت تکان می دهد و باعث به هم خوردن نظم و ترتیب آن ها می شود. گاهی اوقات لازم است ضربه را چند بار وارد کنیم.

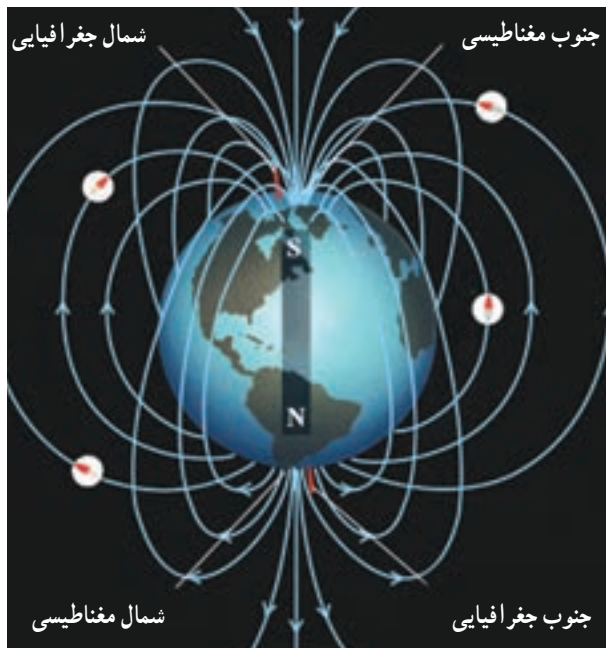


شکل ۱۴-۵- خنثی کردن اثر مغناطیسی آهن ربا با زدن ضربه

۲- گرما: اگر آهن ربا را گرم کنیم، انرژی حرارتی باعث نوسان مولکول های مغناطیسی می شود و ترتیبشان را به هم می زند.

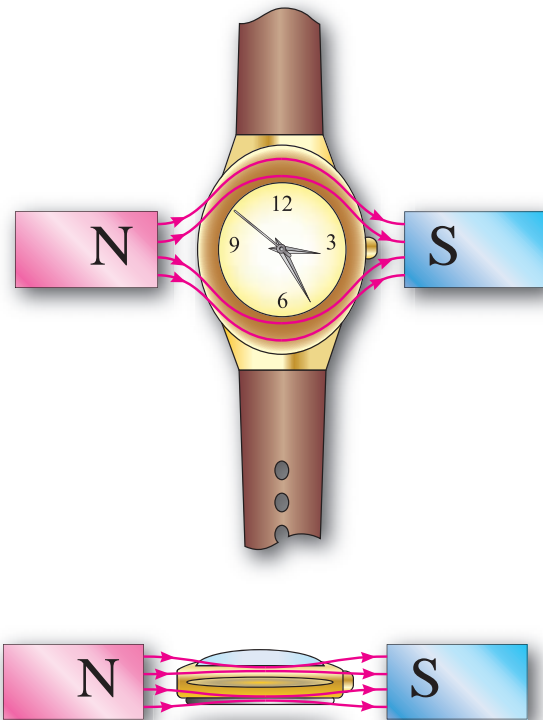
## ۵-۱۱ - میدان مغناطیسی زمین

زمین جرمی چرخنده است (حرکت وضعی دارد) و در اطراف خود میدان مغناطیسی تولید می‌کند. در واقع، در مرکز آن مغناطیسی قرار گرفته که قطب S آن در نزدیکی قطب شمال جغرافیایی و قطب N آن در نزدیکی قطب جنوب جغرافیایی است.



شکل ۵-۱۸ - میدان مغناطیسی زمین

روش برای ساختن ساعت‌های ضد مغناطیس استفاده می‌کنند.



شکل ۵-۱۷ - پوشش مغناطیسی



## برای هنرجویان علاقه‌مند

امروزه مغناطیس، حضوری چشم‌گیر در تشخیص پزشکی ایفا می‌کند. در ارتباط با اثر میدان مغناطیسی بر روی موجودات زنده به‌ویژه انسان گزارش تهیه و به کلاس ارائه دهید.

شکل ۵-۱۹ - دستگاه تصویربرداری MRI

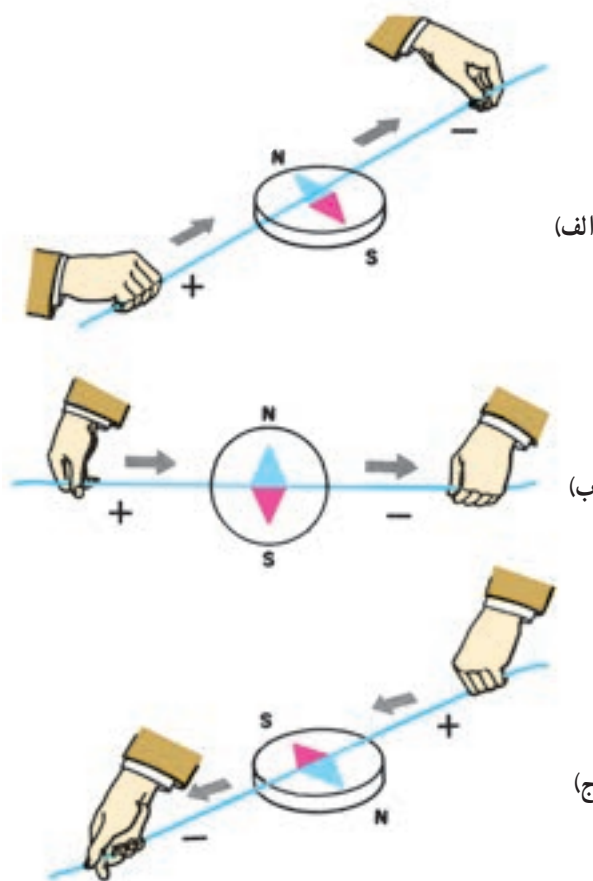
## ۱۲-۵- میدان مغناطیسی ناشی از سیم حامل جریان

چون الکترون‌ها به علت حرکت وضعی در اطراف خود میدان مغناطیسی تولید می‌کنند، چنین به نظر می‌آید که انباشتن الکترون‌های اضافی در جسم می‌تواند میدان مغناطیسی تولید کند ولی الکترون‌ها با چرخش‌های وضعی مخالف هم آثار مغناطیسی یک‌دیگر را خنثی می‌کنند. در نتیجه، الکتروسیته‌ی ساکن دارای میدان مغناطیسی نیست ولی هنگامی که با اعمال ولتاژی به دو سر سیم‌ها جریان الکتریکی در آن برقرار می‌شود، الکترون‌های جهت گرفته نمی‌توانند با چرخش‌های وضعی مخالفت کنند و اثر مغناطیسی یک‌دیگر را خنثی نمایند. بر عکس، چون همه در یک جهت حرکت می‌کنند، میدان‌های مغناطیسی آن‌ها با هم جمع می‌شوند. در سال ۱۸۱۹، **هانس کریستین اُرستد** کشف کرد که سیم حامل جریان در اطراف خود میدان مغناطیسی تولید می‌کند که این میدان بر عقربه‌ی قطب‌نما اثر می‌گذارد.

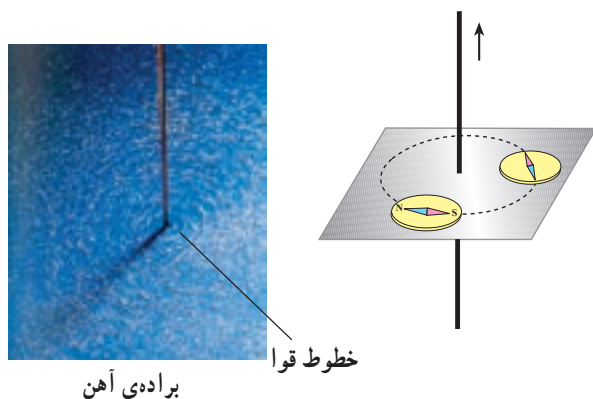
چون میدان مغناطیس به دور یک الکترون حلقه‌ای را به وجود می‌آورد، میدان‌های مغناطیسی اطراف الکترون‌های جهت گرفته در یک سیم با یک‌دیگر تشکیل حلقه‌هایی به دور سیم می‌دهند. هر یک از این حلقه‌ها را یک خط نیرو یا یک **ماکسول** و  $10^8$  خط نیرو را یک **وبر (wb)** می‌نامند.

طبق شکل ۲۰-۵ چنان‌چه موقعیت سیم را تغییر دهیم، عقربه‌ی قطب‌نما با جهت خطوط نیرو منطبق می‌شود. عقربه‌ی قطب‌نما همیشه عمود بر سیم حامل جریان قرار می‌گیرد. وقتی جهت جریان را تغییر دهیم، عقربه‌ی قطب‌نما تغییر جهت می‌دهد. اثر الکترومغناطیس بر یک سیم: جهت میدان مغناطیسی همواره به جهت جریانی که از سیم می‌گذرد، بستگی دارد. برای تعیین جهت میدان مغناطیسی، می‌توان از قطب‌نما و قانون دست راست استفاده کرد. طبق شکل ۲۱-۵ چنان‌چه قطب‌نما را در اطراف سیم حرکت دهیم، همیشه قطب N عقربه‌ی قطب‌نما جهت میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.

وقتی موقعیت سیم را تغییر دهیم، عقربه قطب‌نما نیز متناسب با آن می‌چرخد.



شکل ۲۰-۵- میدان مغناطیسی ناشی از سیم حامل جریان

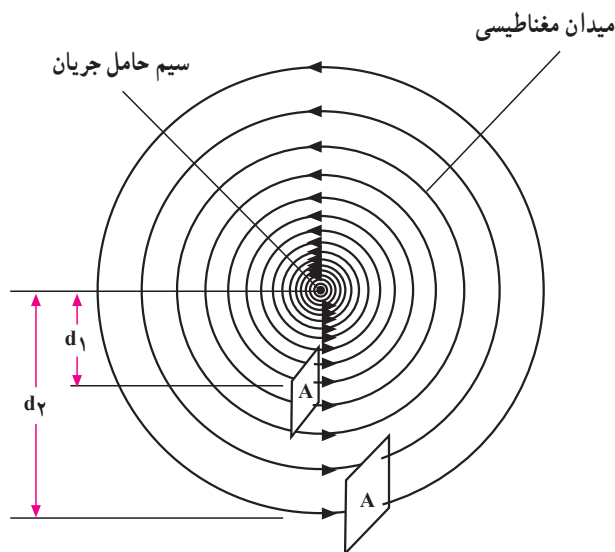


براده‌ی آهن

شکل ۲۱-۵- تعیین جهت میدان مغناطیسی اطراف سیم با استفاده از قطب‌نما

**چگالی (تراکم) خطوط نیرو:** هر چه جریانی که از سیم می‌گذرد بیش‌تر شود، میدان مغناطیسی حاصل قوی‌تر خواهد بود. همان‌طور که در میدان مغناطیسی آهن‌ربا دیدید، خطوط نیرو در نزدیکی آهن‌ربا به هم نزدیک‌ترند. این خطوط نیرو در نزدیکی سیم نیز به هم نزدیک‌ترند و هر چه بیش‌تر از سیم دور شوند، از یک‌دیگر فاصله می‌گیرند. در نتیجه، میدان در نزدیکی سیم قوی‌تر می‌شود و هر چه از مرکز سیم دور‌تر می‌شویم، تراکم خطوط ضعیف‌تر می‌شود.

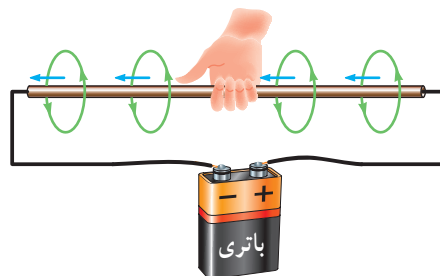
برای مشخص کردن شدت میدان مغناطیسی در هر نقطه از اطراف سیم حامل جریان، چگالی میدان مغناطیسی را تعریف می‌کنند. بنا به تعریف، **چگالی میدان** عبارت است از تعداد خطوط نیرویی که از واحد سطح عبور می‌کند. طبق شکل ۵-۲۴ تعداد خطوط نیرو در واحد سطح با فاصله‌ی آن تا مرکز سیم، نسبت عکس و با شدت جریان عبوری، نسبت مستقیم دارد.



شکل ۵-۲۴ - تراکم خطوط نیرو اطراف سیم حامل جریان

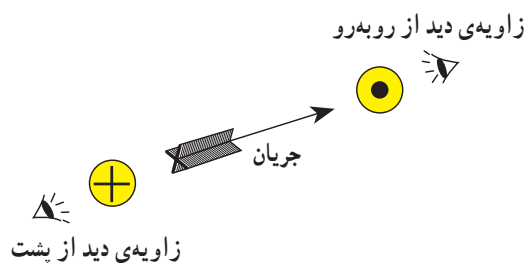
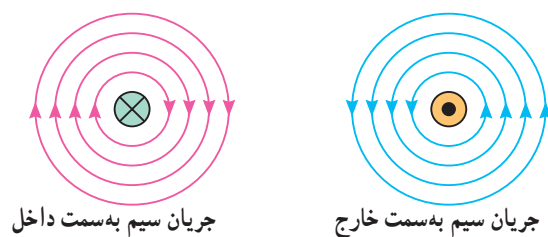
**اثر متقابل میدان‌های مغناطیسی بر یک‌دیگر:** اگر دو سیم را که جریان‌هایی در جهت‌های عکس یک‌دیگر از آن‌ها می‌گذرند به هم نزدیک کنیم، میدان‌های مغناطیسی آن‌ها یک‌دیگر را دفع می‌کنند؛ زیرا جهت خطوط نیرویشان عکس یک‌دیگر است. چون خطوط نیرو نمی‌توانند یک‌دیگر را قطع کنند، میدان‌ها باعث دور شدن سیم‌ها از هم می‌شوند.

برای تعیین جهت میدان مغناطیسی می‌توان از قانون دست راست نیز استفاده کرد. چنان‌چه طبق شکل ۵-۲۲ انگشت‌های دست راست را به دور سیم بپیچیم، به‌طوری که انگشت شست در جهت جریان قرار بگیرد، بسته‌شدن بقیه‌ی انگشتان جهت میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.

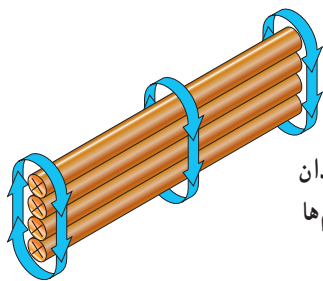


شکل ۵-۲۲ - تعیین جهت میدان مغناطیسی با استفاده از قانون دست راست

طبق شکل ۵-۲۳ از این پس برای تعیین جهت میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان، مقطع سیم را - که دایره است - نشان می‌دهیم. در صورتی که جهت جریان در مقطع سیم از طرف ناظر به طرف صفحه‌ی کاغذ باشد، با علامت (x) و اگر از طرف مقطع سیم به طرف ناظر باشد، با علامت (.) نمایش داده می‌شود. طبق قانون دست راست در مورد (x) جهت میدان موافق عقربه‌ی ساعت و در مورد (.) مخالف حرکت عقربه‌ی ساعت خواهد بود.



شکل ۵-۲۳ - جهت میدان مغناطیسی



شکل ۲۷-۵ قوی تر کردن میدان مغناطیسی از طریق افزایش سیم‌ها

اثر الکترومغناطیسی در یک حلقه: اگر سیمی را به صورت حلقه درآوریم و از آن جریان الکتریکی عبور دهیم، خطوط نیروی مغناطیسی اطراف سیم همه طوری مرتب خواهند شد که از یک طرف به حلقه وارد و از طرف دیگر خارج می‌شوند. در مرکز حلقه، خطوط نیرو متمرکز می‌شوند و یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورند.

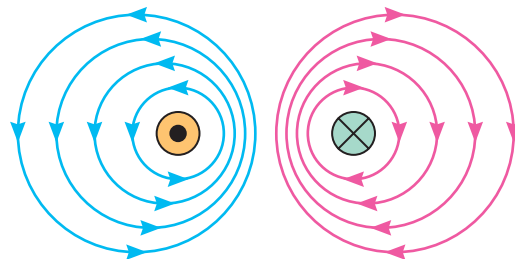
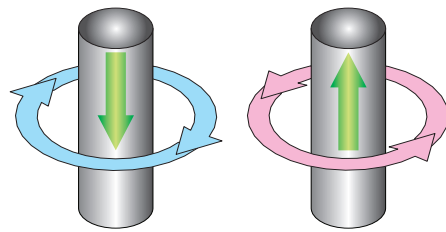
در نتیجه‌ی این عمل قطب‌های مغناطیسی به وجود می‌آیند. به طوری که قطب شمال در طرفی از حلقه قرار دارد که خطوط نیرو از آن خارج می‌شوند و قطب جنوب در طرفی از حلقه قرار دارد که خطوط نیرو به آن وارد می‌شوند.



شکل ۲۸-۵ میدان مغناطیسی حاصل در یک حلقه

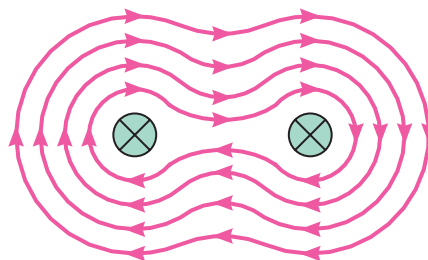
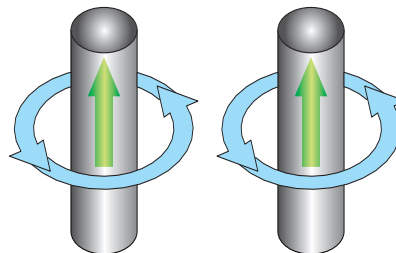
چگالی میدان مغناطیسی در مرکز حلقه بیش‌تر است. هم چنین هر قدر شدت جریان عبوری بیش‌تر باشد، تراکم خطوط نیرو قوی‌تر خواهد بود.

اثر الکترومغناطیس در یک بوبین: اگر سیمی در یک جهت به صورت حلقوی پیچیده شود، یک بوبین تشکیل می‌دهد. اگر از این بوبین جریانی عبور کند، میدان‌های مغناطیسی حلقه‌ها به یک‌دیگر اضافه می‌شوند و میدان مغناطیسی بوبین قوی‌تر می‌شود. هر چه تعداد حلقه‌ها بیش‌تر باشد و حلقه‌ها به صورت فشرده کنار هم پیچیده شوند، میدان‌های مغناطیسی بیش‌تری به یک‌دیگر اضافه می‌شوند و در نتیجه، میدان مغناطیسی بوبین قوی‌تر خواهد بود.



شکل ۲۵-۵ نیروی دافعه بین دو سیم جریان‌دار غیر هم جهت

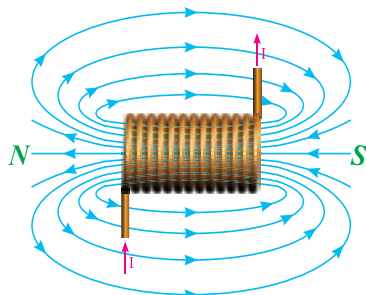
هنگامی که دو سیم را که جریان‌های هم جهت دارند به یک‌دیگر نزدیک کنیم، میدان‌های مغناطیسی آن‌ها به هم ملحق می‌شوند. در نتیجه، سیم‌ها به یک‌دیگر نزدیک می‌شوند و میدان مغناطیسی قوی‌تری تولید می‌کنند.



شکل ۲۶-۵ نیروی جاذبه بین دو سیم جریان‌دار هم جهت

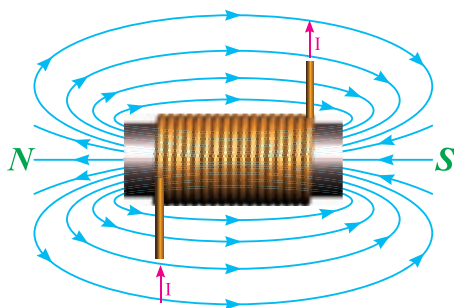
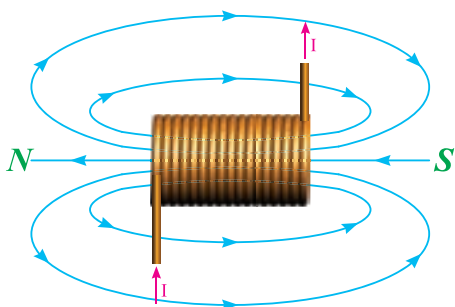
چنانچه سه یا چهار سیم را طوری کنار هم قرار دهیم که جهت جریان در همه‌ی آن‌ها یکسان باشد، میدان مغناطیسی قوی‌تر خواهد شد.

پیچیده شده باشند، میدان‌های بیش‌تری به یک‌دیگر اضافه می‌شوند که این عمل باعث قوی‌تر شدن میدان مغناطیسی می‌شود. به عبارت دیگر، چگالی میدان مغناطیسی با طول بوبین ( $L$ ) نسبت عکس دارد.



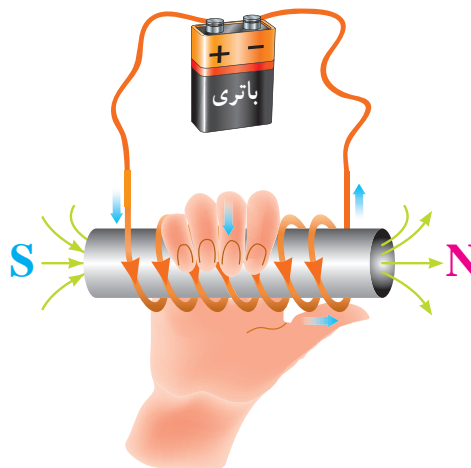
شکل ۳۱-۵ اثر فشردگی سیم‌ها بر چگالی میدان

۴- چنان‌چه هسته‌ی آهنی را در داخل بوبین قرار دهیم، میدان مغناطیسی بوبین قوی‌تر می‌شود. آهن نرم جسم مغناطیسی است که رلوکتانس کمی دارد و باعث می‌شود که خطوط نیرو بیش‌تر در مقایسه با هوا در آن متمرکز شود. هر چه خطوط نیرو در هسته بیش‌تر متمرکز شوند، میدان مغناطیسی قوی‌تر است.



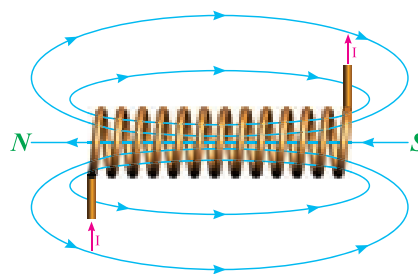
شکل ۳۲-۵ اثر هسته‌ی آهنی بر چگالی میدان

برای تعیین قطب‌های یک بوبین از قانون دست راست استفاده می‌شود. طبق شکل ۲۹-۵ چنان‌چه انگشت‌هایتان را در جهت جریان و حلقه‌های بوبین به دور بوبین حلقه کنید انگشت شست در جهت قطب N قرار می‌گیرد.



شکل ۲۹-۵ تعیین دو قطب یک بوبین با قانون دست راست

چگالی خطوط نیرو در مرکز بوبین به عوامل زیر بستگی دارد :  
۱- هر چه تعداد حلقه‌های بوبین بیش‌تر باشد، میدان مغناطیسی حلقه‌ها با هم جمع می‌شوند و میدان مغناطیسی قوی‌تری خواهیم داشت. بنابراین، تراکم خطوط نیرو با تعداد حلقه‌های بوبین ( $N$ ) نسبت مستقیم دارد.



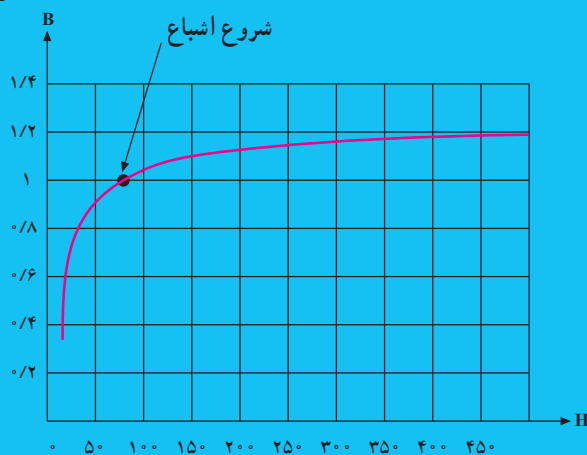
شکل ۳۰-۵ اثر تعداد حلقه‌ها بر چگالی میدان

۲- هر چه شدت جریان عبوری از بوبین نیز بیش‌تر باشد، میدان مغناطیسی قوی‌تر می‌شود؛ بنابراین، چگالی میدان مغناطیسی (تراکم خطوط نیرو) با شدت جریان ( $I$ ) نسبت مستقیم دارد.  
۳- اگر حلقه‌های بوبین به صورت خیلی فشرده کنار هم

## برای هنرجویان علاقه‌مند

## چگالی میدان مغناطیسی

برحسب وبر بر مترمربع



شدت میدان مغناطیسی برحسب آمپر - دور بر متر

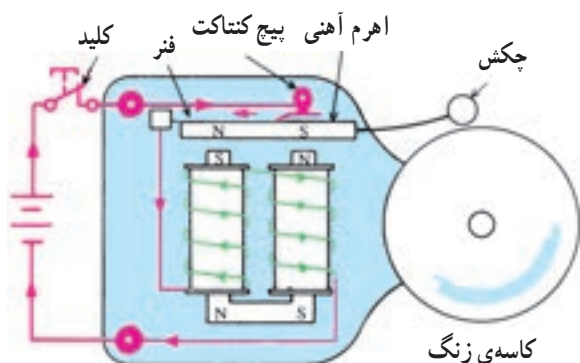
شکل ۳۳-۵ - منحنی مشخصه‌ی یک ماده‌ی فرومغناطیسی

## منحنی مشخصه‌ی مواد فرومغناطیسی: در یک بوبین

با هسته‌ی آهنی که طول بوبین ثابت است، افزایش تعداد حلقه‌ها یا شدت جریان (یا هر دو) باعث افزایش نیروی محرکه‌ی مغناطیسی و نهایتاً افزایش تراکم خطوط نیرو خواهد شد. این امر تا جایی ادامه خواهد یافت که همه‌ی مولکول‌های مغناطیسی هسته منظم شوند و پس از آن، هر چه شدت جریان زیاد شود، تراکم خطوط نیرو ثابت خواهد ماند. نقطه‌ی آغاز این حالت را **نقطه‌ی اشباع مغناطیسی** می‌نامند؛ زیرا مولکول مغناطیسی دیگری باقی نمانده است که منظم شود. تغییرات تراکم خطوط نیرو برحسب شدت میدان مغناطیسی، منحنی مشخصه‌ی هسته‌ی بوبین نامیده می‌شود. در شکل ۳۳-۵ منحنی مشخصه‌ی یک ماده‌ی فرومغناطیسی را مشاهده می‌کنید.

می‌شوند.

هنگامی که اهرم به طرف پایین نوسان می‌کند، فنر از اتصال پیچی جدا می‌شود. این عمل مدار را باز می‌کند. در نتیجه، جریان از حرکت باز می‌ایستد، الکترومغناطیس‌ها انرژی خود را از دست می‌دهند و دیگر اهرم را جذب نمی‌کنند. فنر اهرم را دوباره به محل قبلی‌اش برمی‌گرداند و به همین دلیل، اتصال فتری و پیچ دوباره باعث بسته شدن مدار می‌شوند. در نتیجه، این عمل تکرار می‌گردد.



شکل ۳۴-۵ - زنگ الکترومغناطیسی DC

## ۱۳-۵- کاربرد مغناطیس

مصرف‌کننده‌های الکتریکی از قبیل لامپ روشنایی و بخاری برقی توسط عبور جریان الکتریکی فعال می‌شوند و کار مفید انجام می‌دهند اما مصرف‌کننده‌های دیگری وجود دارند که عبور جریان از آن‌ها باعث خاصیت مغناطیسی می‌شود و نیروی حاصل از مغناطیس تولید کار می‌کند. در این جا به شرح چند وسیله‌ی الکتریکی که با خاصیت مغناطیسی کار می‌کنند، می‌پردازیم.

### ۱- زنگ الکترومغناطیسی DC: در زنگ

الکترومغناطیسی از عمل میدان مغناطیسی برای به نوسان درآوردن یک اهرم استفاده می‌کنند. این اهرم به چکشی متصل است که پی‌درپی به کاسه‌ی زنگ می‌خورد. هنگامی که شستی بسته می‌شود، باتری جریان الکتریکی را از طریق اتصال پیچی به یک فنر می‌فرستد ولی قبل از این که جریان به قطب منفی باتری باز گردد، توسط یک تکه سیم از بوبین‌های الکترومغناطیسی می‌گذرد. الکترومغناطیس‌ها پس از دریافت انرژی اهرم را به پایین جذب می‌کنند و باعث برخورد چکش با کاسه‌ی زنگ

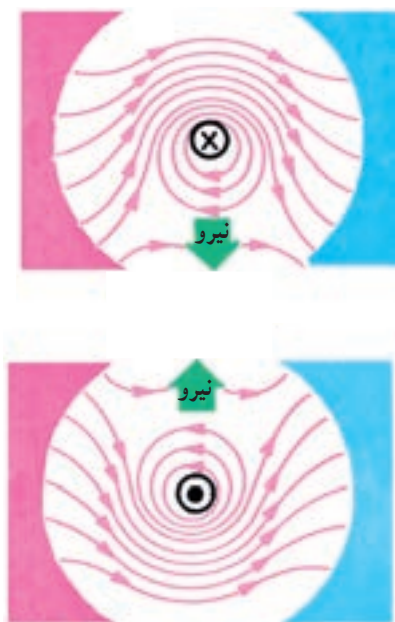
به الکترومغناطیسی که اهرم را به کار می‌اندازد تا کنتاکت‌ها را قطع و وصل کند، **رله** می‌گویند.

### تحقیق کنید

در مورد رله‌های به کار رفته در صنعت برق تحقیق کرده و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

### ۳- موتور الکتریکی ساده: اگر یک سیم حامل جریان

را در داخل یک میدان مغناطیسی قرار دهیم، میدان مغناطیسی اثری مخالف بر سیم حامل جریان وارد می‌کند. سیم حامل جریان در اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند. این میدان شکل خطوط نیرویی را که بین دو قطب مغناطیسی وجود دارد، تغییر می‌دهد. خطوط نیروی تغییر شکل داده سعی دارند خود را به وضعیت قبل از ورود سیم حامل جریان درآورند. در نتیجه، نیروی دافعه‌ای بر سیم وارد می‌کنند. بدین ترتیب، سیم به محلی رانده می‌شود که خطوط نیرو از بقیه‌ی جاها ضعیف‌ترند. جهت نیروی دافعه به جهت جریان و جهت خطوط نیرو بستگی دارد. در صورتی که هر کدام از کمیت‌ها تغییر جهت پیدا کنند، جهت نیروی دافعه نیز تغییر خواهد کرد اما اگر جهت هر دو کمیت با هم عوض شود، جهت نیرو تغییر نخواهد کرد.

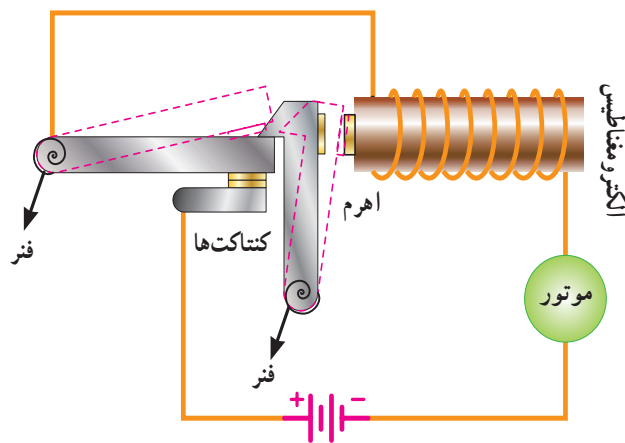


شکل ۳۶-۵ اثر میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان

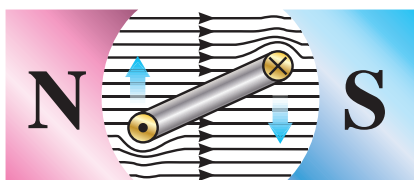
الکترومغناطیس‌ها انرژی دریافت می‌کنند و آن را به سرعت از دست می‌دهند و باعث نوسان اهرم به بالا و پایین می‌شوند. چکش نیز نوسان می‌کند و به‌طور مداوم به کاسه‌ی زنگ می‌خورد.

### ۲- کلید مغناطیسی قطع مدار: کلید قطع مدار برای

این منظور در مدارها به کار می‌رود تا مانند فیوز از مدار در مقابل اتصال کوتاه یا اضافه بار محافظت کند. با این تفاوت که فیوز می‌سوزد اما کلید قطع مدار جریان را قطع می‌کند که البته می‌توان آن را دوباره وصل کرد. طبق شکل ۳۵-۵ مسیر جریان از باتری شروع می‌شود و از کنتاکت‌هایی که توسط یک اهرم بسته شده‌اند می‌گذرد. پس از آن، جریان از طریق یک الکترومغناطیس به موتور می‌رود و دوباره به باتری باز می‌گردد. تا هنگامی که جریان خیلی زیادی عبور نکند، میدان ایجاد شده توسط الکترومغناطیس آن قدر قوی نیست که بتواند اهرم را جذب کند ولی اگر جریان خیلی زیادی عبور کند - مثلاً هنگامی که موتور ترمز می‌کند یا اتصال کوتاه می‌شود - میدان الکترومغناطیسی خیلی قوی می‌شود و اهرم را به طرف خود می‌کشد. این عمل به فتر امکان می‌دهد که بازوی اتصال را قطع و کنتاکت‌ها را باز کند. در نتیجه، مدار قطع می‌شود، الکترومغناطیس انرژی‌اش را از دست می‌دهد و اهرم به حالت اول برمی‌گردد. در این حالت، بازوی اتصال توسط فنر خارج نگاه داشته شده است. هنگامی که مشکل برطرف شود، بازوی اتصال مدار را می‌توان به حالت اول درآورد و از آن مجدداً استفاده کرد.



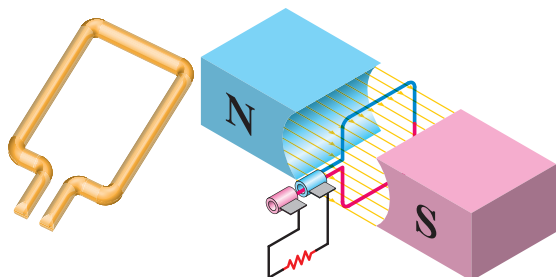
شکل ۳۵-۵ کلید مغناطیسی قطع مدار



جهت نیروی دافعه را به سهولت می‌توان از قانون دست چپ پیدا کرد.

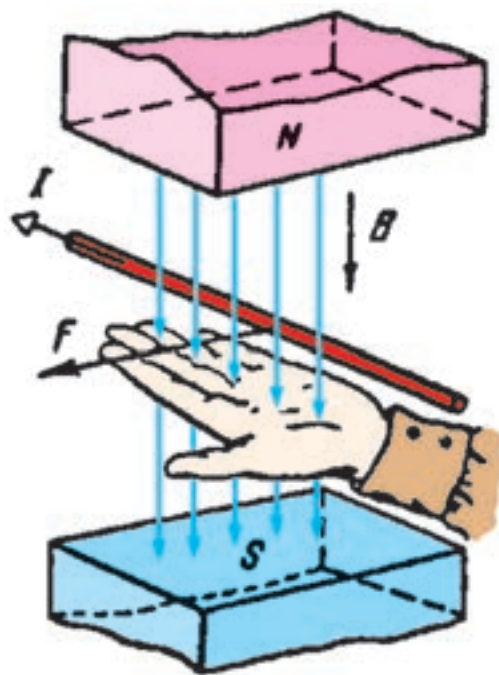
### قانون دست چپ

اگر دست چپ را طوری باز کنیم که خطوط نیرو به کف دست بریزند (B) و جهت جریان در سیم حامل جریان (I) در جهت سایر انگشتان باشد، جهت نیروی وارد شده (F) در جهت انگشت شست خواهد بود.



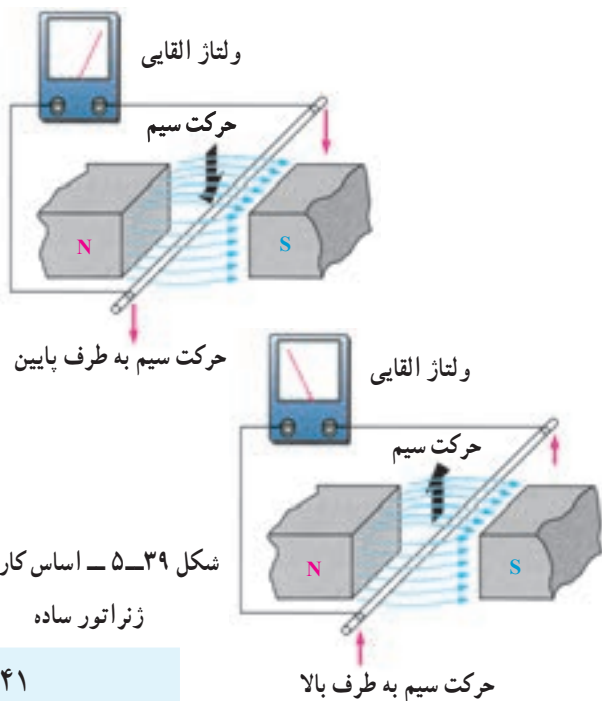
شکل ۳۸-۵ تولید گشتاور در موتور الکتریکی

۴- ژنراتور ساده: طبق شکل ۳۹-۵ اگر یک هادی را در داخل میدان مغناطیسی آهن‌ربا حرکت دهیم، انرژی مغناطیسی آهن‌ربا باعث حرکت الکترون‌ها در یک جهت و تجمع آن‌ها در یک طرف هادی می‌شود. این روند را **تولید نیروی محرکه‌ی القایی** می‌گویند. حال اگر به دو سر سیم میلی‌ولت متری را وصل کنیم، مشاهده می‌شود که با حرکت سیم به طرف پایین، عقربه‌ی میلی‌ولت‌متر در یک جهت و با حرکت سیم به طرف بالا عقربه در جهت مخالف حرکت می‌کند. نتیجه می‌گیریم که با تغییر جهت حرکت سیم، جهت نیروی محرکه‌ی القایی تغییر می‌کند. این مطلب در مورد تغییر جهت خطوط نیرو نیز صادق است.



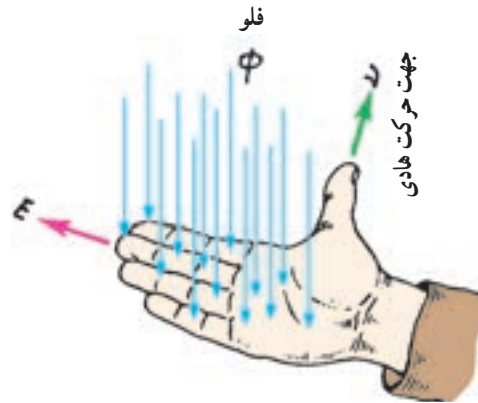
شکل ۳۷-۵ قانون دست چپ

اگر طبق شکل ۳۸-۵ سیم را به صورت کلاف درآوریم و آن را درون میدان مغناطیسی قرار دهیم، وقتی از کلاف جریان عبور کند اثر متقابل میدان‌های مغناطیسی باعث می‌شود که یک سمت آن به طرف بالا و سمت دیگر به طرف پایین حرکت کند؛ به عبارت دیگر، به کلاف جفت نیرو وارد می‌شود و تولید گشتاور می‌کند. این فرآیند، اساس کار موتورهای الکتریکی است که در درس ماشین‌های الکتریکی به‌طور مفصل درباره‌ی آن توضیح خواهیم داد.



شکل ۳۹-۵ اساس کار یک ژنراتور ساده

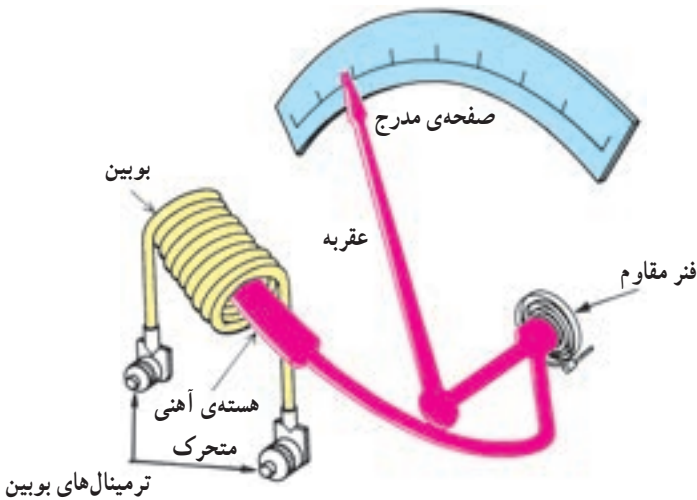
برای به دست آوردن جهت نیروی محرکه‌ی القایی از قانون دست راست استفاده می‌شود. طبق شکل ۵-۴۰ اگر کف دست راست را طوری باز کنیم که خطوط نیرو به کف دست بریزند، در صورتی که جهت حرکت سیم در جهت انگشت شست باشد، جهت نیروی محرکه‌ی القایی در جهت سایر انگشتان خواهد بود.



شکل ۵-۴۰ - قانون دست راست

۵ - دستگاه اندازه‌گیری الکتریکی: در دستگاه‌های اندازه‌گیری بسیار ساده برای اندازه‌گیری جریان عبوری از یک سیم پیچ (بوبین) و یک هسته‌ی متحرک استفاده می‌کنند. هرگاه جریانی از بوبین بگذرد، میدان مغناطیسی‌ای ایجاد می‌کند که هسته را به طرف خود جذب می‌کند. انتهای دیگر هسته به فنری متصل است که سعی دارد آن را به عقب بکشد. مسافتی را که هسته طی می‌کند، به شدت میدان مغناطیسی بستگی دارد.

شدت میدان مغناطیسی به وسیله‌ی مقدار جریانی که از بوبین می‌گذرد تعیین می‌شود. در نتیجه، هر چه جریان بیش‌تر باشد، هسته بیش‌تر به داخل بوبین کشیده می‌شود. در روی محور گردنده یک عقربه سوار شده است که در طول یک صفحه‌ی مدرج برای نشان دادن مقدار جریان اندازه‌گیری شده منحرف می‌شود.



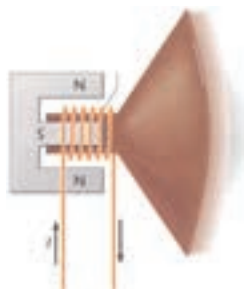
شکل ۵-۴۱ - دستگاه اندازه‌گیری الکتریکی

۶ - آهن‌ربای صنعتی: از کاربردهای دیگر مغناطیس می‌توان آهن‌ربای صنعتی را نام برد. شکل ۵-۴۲ یک نمونه آهن‌ربای صنعتی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴۲

**تحقیق کنید** ..... در مورد ساختمان بلندگو و طرز کار آن تحقیق کرده و به کلاس گزارش دهید.



شکل ۵-۴۳



- ۱- ذرات یا مولکول‌های مغناطیسی را تعریف کنید.
- ۲- میدان الکترومغناطیسی چیست؟
- ۳- خطوط فلو را تعریف کنید.
- ۴- تفاوت بین مغناطیس‌های دائمی و موقتی چیست؟
- ۵- جهت میدان مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان را کدام قانون تعیین می‌کند؟
- ۶- بوبین یا سلونوئید چیست؟ در مورد میدان مغناطیسی چه عملی را انجام می‌دهد؟
- ۷- قانون دست راست را برای سلونوئید بیان کنید.
- ۸- چرا در الکترومغناطیس‌ها هسته به کار می‌برند؟ آیا هرگز از هسته‌های فولادی استفاده می‌کنند؟
- ۹- عوامل مؤثر در مقدار نیروی محرکه‌ی مغناطیسی چیست؟
- ۱۰- منظور از نقطه‌ی اشباع چیست؟
- ۱۱- قانون دست چپ در موتور را شرح دهید.
- ۱۲- تفاوت کلید قطع‌کننده‌ی مغناطیسی و فیوز چیست؟
- ۱۳- چگونه دستگاه اندازه‌گیری شدت جریان را اندازه می‌گیرد؟
- ۱۴- قانون دست راست در ژنراتور را شرح دهید.
- ۱۵- ساختمان زنگ اخبار الکترومغناطیسی DC را شرح دهید.

## مدار الکتریکی و اجزای آن

### هدف‌های رفتاری

- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود:
- ۱- یک مدار کامل الکتریکی را رسم کند.
- ۲- اجزای اصلی مدار الکتریکی را نام ببرد و وظیفه‌ی هر یک را توضیح دهد.
- ۳- منابع جریان مستقیم و متناوب را توضیح دهد.



دینام دوچرخه



چراغ قوه ۳ ولت



باتری خودرو

### ۱-۶- مدار الکتریکی

انرژی الکتریکی هنگامی کارآمد است که بتوان آن را عملاً مورد استفاده قرار داد. برای استفاده‌ی عملی از این انرژی، باید آن را مهار کرد یا به انواع دیگر انرژی‌ها تبدیل نمود. اصطلاحاً مسیر بسته (مسیر کامل) جریان الکتریکی **مدار الکتریکی** نام دارد.

### ۲-۶- اجزای مدار الکتریکی

اجزای اصلی هر مدار الکتریکی به طور کلی عبارت‌اند

از:

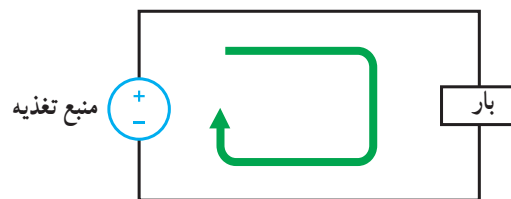
**الف - منبع تغذیه (مولد):** منبع ولتاژ از راه‌های مختلف از جمله واکنش‌های شیمیایی و مغناطیسی انرژی الکتریکی تولید می‌کند. برای مصرف این انرژی باید بین قطب‌های مولد اختلاف پتانسیل (ولتاژ) به وجود آید. ولتاژ را با واحدی به نام ولت اندازه‌گیری می‌کنند. قطب‌های یک منبع ولتاژ جهت جریان الکتریکی را تعیین می‌کنند و مقدار ولتاژ، میزان شدت جریان عبوری از مدار را مشخص می‌کند. در شکل ۱-۶ انواع منابع ولتاژ DC را مشاهده می‌کنید.

شکل ۱-۶- انواع منابع ولتاژ DC

## I — منابع و مدار جریان مستقیم (DC)<sup>۱</sup>

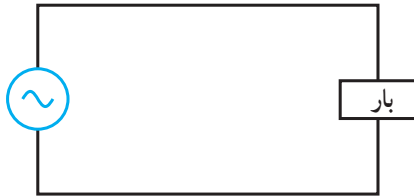
به منابع ولتاژی که جهت جریان الکتریکی در مدار خارجی آن‌ها از قطب مثبت به طرف قطب منفی است، منابع ولتاژ مستقیم می‌گویند و مدار آن‌ها را مدار جریان مستقیم می‌نامند. برای سادگی، جریان مستقیم را با علامت اختصاری DC نشان می‌دهند. از این پس از مولدهای DC، جریان DC، ولتاژ DC و مدار DC صحبت خواهیم کرد.

منابع تغذیه که اغلب در مدارهای جریان مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از: ژنراتورهای DC، منبع تغذیه الکترونیکی و باتری. صرف نظر از ساختمان داخلی مولدهای جریان مستقیم، عمل مدارهای جریان مستقیم یکسان است. شکل ۶-۲ منبع DC و مدار جریان مستقیم را به همراه بار نمایش می‌دهد.



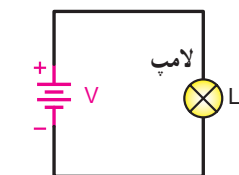
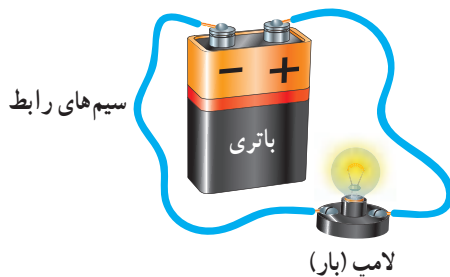
شکل ۶-۲ — مدار جریان مستقیم

AC نمایش می‌دهند. ولتاژی که در منازل برای تغذیه وسایل خانگی و روشنایی از آن استفاده می‌شود، ولتاژ متناوب است. شکل ۶-۳ منبع AC و مدار AC را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۳ — مدار جریان متناوب

**ب — سیم‌های رابط:** برای این که جریان الکتریکی در یک مدار برقرار شود، لازم است مدار کاملی برای عبور جریان از قطب مثبت مولد به قطب منفی وجود داشته باشد. تشکیل این مدار با اتصال سیم‌های رابط قطب مثبت به بار الکتریکی مورد نظر و از آن جا به قطب منفی منبع ولتاژ، عملی می‌شود. شکل ۶-۴ یک مدار کامل و بسته را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۴ — مدار بسته

در صورتی که مدار در نقطه‌ای قطع شود، جریان الکتریکی برقرار نمی‌گردد. چنین مداری را در اصطلاح مدار باز می‌گویند. شکل ۶-۵ مدار باز را نشان می‌دهد.

## II — منابع و مدار جریان متناوب (AC)<sup>۲</sup>

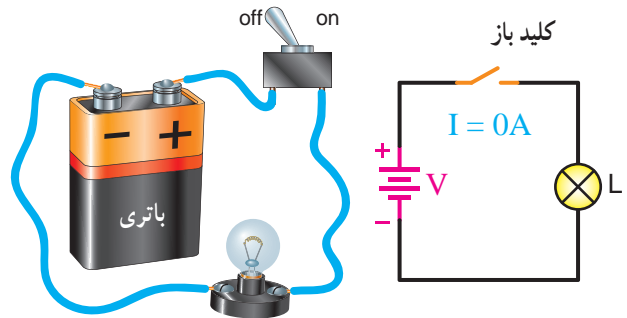
هنگامی که جهت (پلاریته‌ی) قطب‌های یک مولد به‌طور متناوب تغییر کند، جهت جریان نیز به‌طور متناوب تغییر خواهد کرد. این نوع جریان را جریان متناوب می‌گویند و به اختصار، به صورت

<sup>۱</sup> — DC=Direct Current

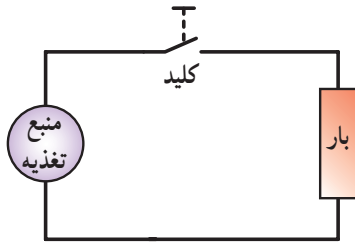
<sup>۲</sup> — AC=Alternative Current

### ۶-۳- کلید

در صورتی که قصد قطع و وصل مدار (کنترل مصرف کننده) الکتریکی را داشته باشیم، لازم است تا مسیر عبور جریان الکتریکی را قطع یا وصل کنیم که معمولاً این کار توسط کلید انجام می گیرد. کلید از اجزای اصلی مدار به حساب نمی آید (شکل ۶-۶).



شکل ۶-۵- مدار باز



شکل ۶-۶- مدار شامل کلید

### ج- مصرف کننده الکتریکی : در یک مدار ساده،

مصرف کننده وسیله ای است که انرژی الکتریکی را به انرژی های دیگر تبدیل می کند. مصرف کننده ی (بار) الکتریکی ممکن است انرژی الکتریکی را به انرژی های نورانی، گرمایی یا صوتی تبدیل کند یا فقط برای مهار مقدار انرژی حاصل از مولد به کار رود.



پرسش

- ۱- سه جزء اصلی یک مدار الکتریکی را نام ببرید.
- ۲- منظور از مدار باز و بسته چیست؟
- ۳- آیا می توان در یک مدار شامل باتری، اتصالات و مصرف کننده، باتری را بار الکتریکی دانست؟ توضیح دهید.
- ۴- بین باتری، ژنراتور جریان مستقیم و یک منبع تغذیه ی الکترونیکی چه وجه مشترکی وجود دارد؟
- ۵- منظور از بار الکتریکی در یک مدار چیست؟

## هدایت و مقاومت الکتریکی

### هدف‌های رفتاری

- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود:
- ۱- مفهوم مقاومت الکتریکی را با مقاومت ذرات گاز در حین حرکت در لوله مقایسه کند.
- ۲- واحد مقاومت الکتریکی را براساس مشخصات فیزیکی آن تعریف کند.
- ۳- مفهوم مقاومت مخصوص و هدایت مخصوص هادی را تعریف کند.
- ۴- رابطه‌ی پیدا کردن مقاومت الکتریکی هادی‌ها را بر حسب مشخصات فیزیکی  $R = \rho \frac{l}{A}$  بنویسد.
- ۵- واحدهای مربوط به هر یک از پارامترهای موجود در فرمول  $R = \rho \frac{l}{A}$  را بیان کند.
- ۶- با استفاده از فرمول  $R = \rho \frac{l}{A}$  مقاومت فلزاتی را که مشخصات آن‌ها داده می‌شود، حساب کند.
- ۷- مقاومت چند عنصر رایج، در صنعت برق را محاسبه کند.
- ۸- چگونگی تأثیر تغییرات دما بر مقاومت را توضیح دهد.
- ۹- ضریب حرارتی را تعریف کند.
- ۱۰- رابطه‌ی تأثیر حرارت بر مقاومت الکتریکی  $R_t = R_0(1 + \alpha t)$  را به کار ببرد.
- ۱۱- با استفاده از فرمول  $R_t = R_0(1 + \alpha t)$  مقاومت چند هادی رایج را بر حسب تغییرات دما محاسبه کند.
- ۱۲- ابرسانا را شرح دهد و کاربرد آن را بیان کند.

### ۷-۱- هدایت الکتریکی مخصوص

به یک اندازه الکترون آزاد ندارند؛ به همین دلیل، عملکرد هادی‌ها نیز در مدارها مختلف است. اگر با یک منبع ولتاژ که ولتاژش ثابت باشد، میزان هدایت الکتریکی فلزات مختلف (همه با طول یک متر و سطح مقطع یک میلی‌متر مربع) را آزمایش کنیم، می‌بینیم فلزی که الکترون‌های آزاد بیشتری دارد، شدت جریان بیشتری را از خود عبور می‌دهد. نسبت

همه‌ی اجسام، جریان الکتریکی را به یک اندازه هدایت نمی‌کنند. هادی‌ها اجسامی هستند که جریان را به راحتی عبور می‌دهند و عایق‌ها برعکس، از عبور جریان جلوگیری می‌کنند. علت این امر آن است که هادی‌ها مقدار زیادی الکترون آزاد دارند. اکثر فلزات هادی‌های خوبی هستند. البته همه‌ی فلزات

مثال ۱: اگر هدایت مخصوص مس  $\frac{m}{mm^2}$  ۵۶ باشد، هدایت مخصوص آلومینیم چه قدر است؟

$$\frac{\kappa_{Al}}{\kappa_{Cu}} = \frac{0.625}{1} \Rightarrow \frac{\kappa_{Al}}{56} = \frac{0.625}{1}$$

$$\Rightarrow Al = 56 \times 0.625 \quad \boxed{\kappa_{Al} = 35}$$

### ۷-۳- مقاومت الکتریکی مخصوص

هدایت مخصوص نشانگر سهولت عبور جریان الکتریکی از یک جسم است. هرچه هدایت مخصوص بیش تر باشد، جسم جریان الکتریکی بیش تری را عبور می دهد. با همین استدلال، هدایت مخصوص کوچک تر نمایان گر آن است که جریان الکتریکی به سختی از جسم عبور می کند. به عبارت دیگر، اجسام با هدایت مخصوص کم در مقابل عبور جریان، مقاومت یا مخالفت زیادتری می کنند. هر جسمی که هدایت مخصوص آن زیاد باشد، مقاومت مخصوص اش کم است و برعکس، جسمی که مقاومت مخصوص اش زیاد باشد، دارای هدایت مخصوص کمی است. مقاومت مخصوص را با حرف یونانی  $\rho$  (رو) نمایش می دهند و رابطه ی آن با هدایت مخصوص چنین است:  $\rho = \frac{1}{\kappa}$ . بنا به تعریف، مقاومت سیمی به طول یک متر و سطح مقطع یک میلی متر مربع را **مقاومت الکتریکی مخصوص** می نامند.

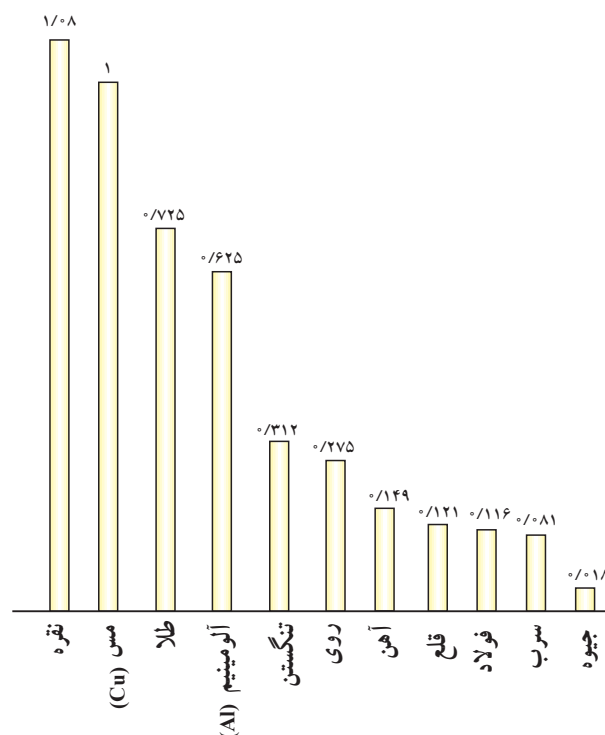
### ۷-۴- مقایسه ی مقاومت مخصوص فلزات

دیدیم که هدایت مخصوص فلزات مختلف طبق نمودار ۷-۱ نسبت به مس سنجیده می شود. همین کار را در مورد مقاومت مخصوص نیز می توان انجام داد. نمودار ۷-۲ مقاومت مخصوص نسبی سایر فلزات را نسبت به فلز مس نمایش می دهد.

شدت جریان عبوری از یک فلز به ولتاژ منبع را هدایت الکتریکی مخصوص آن فلز می گویند. به عبارتی دیگر و براساس مشخصات فیزیکی یک سیم می توان گفت قابلیت هدایت سیمی به طول یک متر و سطح مقطع یک میلی مترمربع را **هدایت الکتریکی مخصوص** می نامند و آن را با حرف یونانی  $\kappa$  (کاپا) نمایش می دهند.

### ۷-۲- مقایسه ی هدایت مخصوص فلزات

فلز نقره الکترون های آزاد زیادی دارد؛ بنابراین، در مقایسه با سایر فلزات از هدایت مخصوص بیش تری برخوردار است. مس بعد از نقره هادی خوبی است، نسبت به آن ارزان تر است و کاربرد بیش تری دارد. بدین جهت، هدایت مخصوص سایر فلزات را نسبت به فلز مس می سنجند. در نمودار ۷-۱ هدایت مخصوص نسبی سایر فلزات را در مقایسه با فلز مس مشاهده می کنید.



نمودار ۷-۱- هدایت مخصوص فلزات مختلف نسبت به مس

## ۶-۷- عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی یک سیم

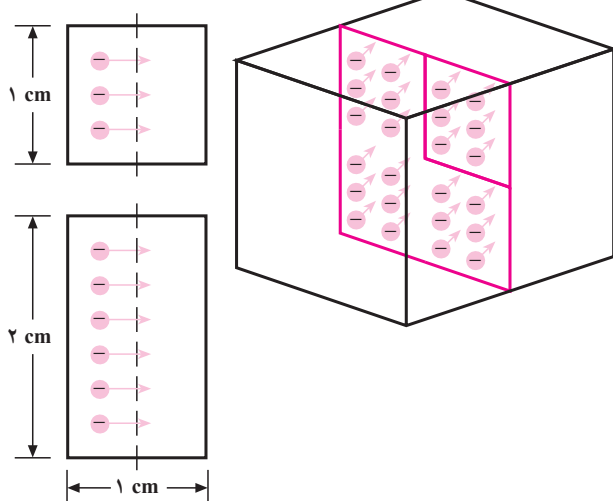
عبور جریان الکتریکی از هادی‌ها از بسیاری جهات شبیه عبور گاز از یک لوله است. اگر این لوله پر از پشم فلزی یا ماده‌ی متخلخلی باشد، این شباهت بیش‌تر می‌شود. اتم‌های تشکیل‌دهنده‌ی سیم هادی از عبور الکترون‌ها جلوگیری می‌کنند؛ همان‌طور که الیاف پشم فلزی مانع عبور مولکول‌های گاز می‌شوند. حال می‌خواهیم ببینیم که مقاومت هادی‌ها به غیر از جنس فلز به چه عوامل دیگری بستگی دارد.

### تأثیر سطح مقطع هادی بر مقاومت الکتریکی: مقدار

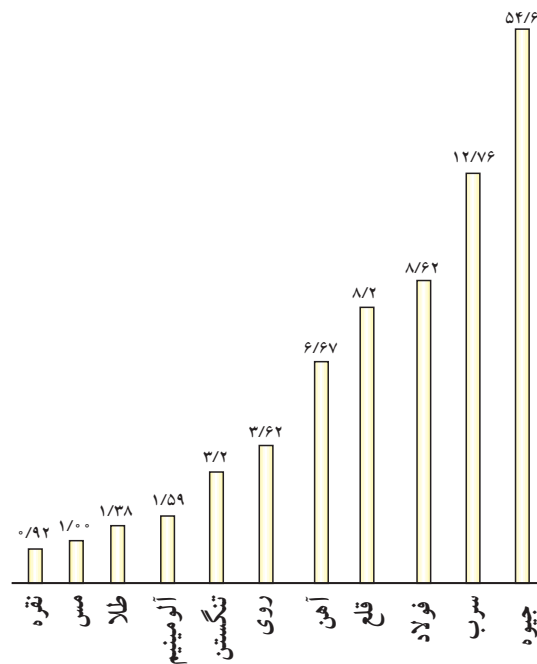
جریان الکتریکی به تعداد الکترون‌های آزاد موجود در سیم بستگی دارد؛ بنابراین، با ضخیم کردن سیم می‌توانیم تعداد الکترون‌های آزاد را بیش‌تر کنیم تا مقدار بیش‌تری جریان الکتریکی بتواند از آن عبور کند.

یک قطعه مس به ارتفاع ۲ و عرض ۱ سانتی‌متر در محل اندازه‌گیری جریان الکتریکی دو برابر قطعه مسی به ارتفاع ۱ و عرض ۱ سانتی‌متر الکترون‌های آزاد قابل دسترسی دارد. پس مس به ارتفاع دو برابر، دوبار بیش‌تر جریان را هدایت می‌کند. چنان‌چه پهنای قطعه مسی که به کار می‌برید دو برابر باشد، قابلیت هدایت آن دو برابر و مقاومت آن نصف می‌شود (شکل ۲-۷).

نقطه‌ی اندازه‌گیری جریان



شکل ۲-۷- تأثیر سطح مقطع در مقاومت

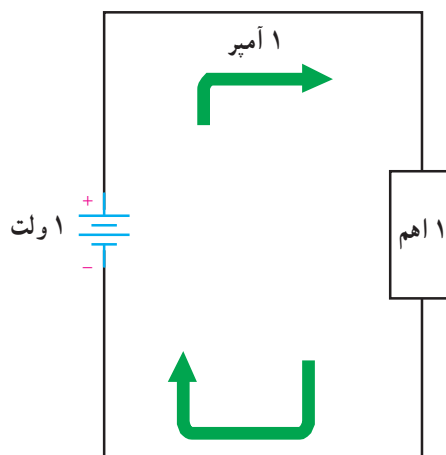


نمودار ۲-۷- مقاومت مخصوص فلزات مختلف نسبت به مس

## ۵-۷- واحد مقاومت

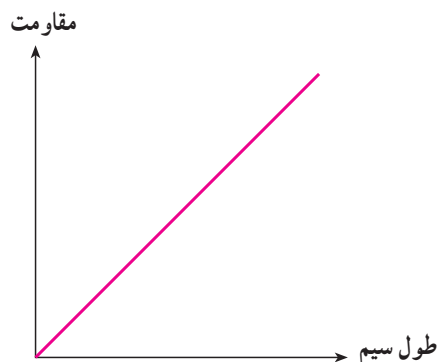
در حدود سال‌های ۱۸۰۰ یک دانشمند آلمانی به نام گئورگ سیمون اهم آزمایش‌هایی در مورد مدارها و هادی‌ها انجام داد و نکات مهمی را در مورد ماهیت مقاومت الکتریکی کشف کرد. برای قدردانی از این شخص، واحد مقاومت به نام او **اهم** نامیده شده است.

یک اهم مقاومت هادی‌ای است که تحت اختلاف پتانسیل یک ولت، شدت جریانی معادل یک آمپر از آن عبور کند. واحد مقاومت را با علامت ( ) نمایش می‌دهند.



شکل ۱-۷- تعریف اهم

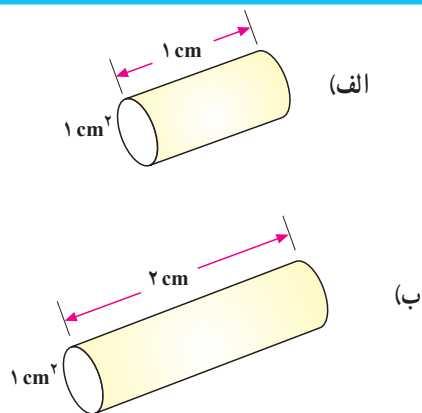
شکل ۷-۵ تغییرات مقاومت برحسب طول هادی را نشان می‌دهد. طبق این نمودار هر قدر طول هادی زیاد شود، مقاومت افزایش می‌یابد.



شکل ۷-۵- نمودار تغییرات مقاومت به طول سیم

رابطه‌ی کلی مقاومت الکتریکی هادی: همان‌طور که قبلاً گفتیم، اگر طول یک سیم ( $L$ ) را زیاد کنیم، مقاومت آن زیاد می‌شود و برعکس، اگر طول سیم را کم کنیم، مقاومت آن کم می‌شود.

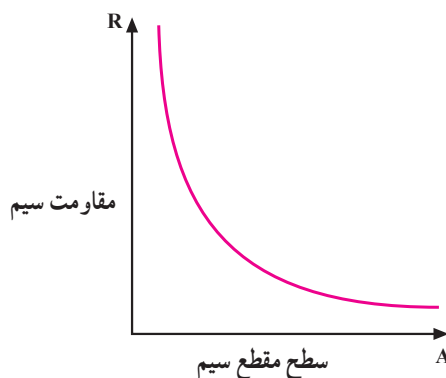
اگر طول سیم را مثلاً دو برابر کنیم، مقاومت آن را دو برابر کرده‌ایم. پس مقاومت یک سیم با طول آن نسبت مستقیم دارد (شکل ۷-۶).



شکل ۷-۶- اثر افزایش طول بر مقاومت سیم

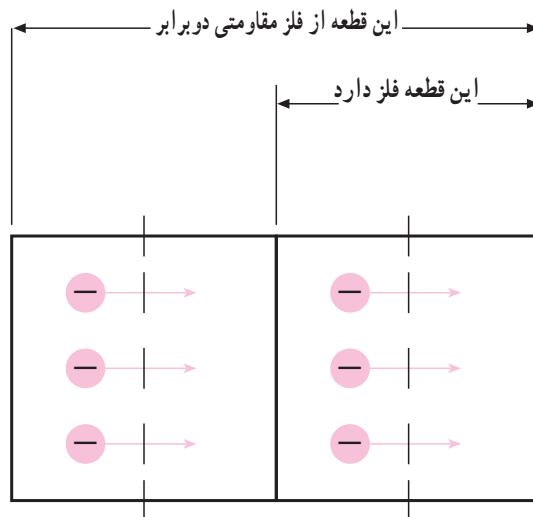
هم‌چنین می‌توان با اضافه کردن سطح مقطع ( $A$ ) مقاومت را کم کرد و با کم کردن سطح مقطع بر مقاومت افزود.

شکل ۷-۳ تغییرات مقاومت نسبت به سطح مقطع هادی را نمایش می‌دهد. طبق این نمودار هر قدر سطح مقطع افزایش پیدا می‌کند، مقاومت الکتریکی کم‌تر می‌شود.



شکل ۷-۳- نمودار تغییرات مقاومت برحسب سطح مقطع هادی

تأثیر طول هادی بر مقاومت الکتریکی: شاید تصور کنید که با افزایش طول هادی عبور جریان راحت‌تر می‌شود ولی چنین نیست. اگر چه در یک قطعه مس بلندتر تعداد بیش‌تری الکترون آزاد وجود دارد ولی الکترون‌های آزاد اضافی در طول سیم، در اندازه‌گیری جریان الکتریکی داخل نمی‌شوند. در واقع هر طول معین از هادی، مقدار معینی مقاومت دارد و هرچه سیم طولی‌تر باشد، مقاومت آن نیز بیش‌تر است.



شکل ۷-۴- تأثیر طول هادی در مقاومت

$$\rho \text{ مقاومت مخصوص بر حسب } \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\kappa \text{ هدایت مخصوص بر حسب } \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \text{ است.}$$

مثال ۲: سیم مسی به طول ۱۱۲ متر با سطح مقطع

$$4 \text{ mm}^2 \text{ و هدایت مخصوص } \left( \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \right) = 56 \kappa \text{ مفروض}$$

است. مقاومت الکتریکی سیم چند اهم است؟

$$R = \frac{L}{\kappa \cdot A} = \frac{112}{56 \times 4} = 0.5 \Omega \Rightarrow R = 0.5$$

مثال ۳: برای ساختن یک مقاومت الکتریکی ۱۰ اهمی،

چند متر سیم آلومینیمی با سطح مقطع  $1/5 \text{ mm}^2$  مورد نیاز

است، در صورتی که  $\kappa_{Al} = 35 \left( \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \right)$  باشد.

$$R = \frac{L}{\kappa \cdot A} \Rightarrow 10 = \frac{L}{35 \times 1/5} \Rightarrow L = 10 \times 35 \times 1/5$$

$$L = 525 \text{ m}$$

اثر حرارت بر مقاومت الکتریکی: در واقع، آنچه

در مورد مقاومت گفته شد، همه در دمای اتاق صادق است. اما

در دماهای کم تر یا بیش تر، مقدار مقاومت کلیه فلزات تغییر

می کند. تغییر مقاومت بر اثر حرارت در فلزات مختلف متفاوت

است؛ بنابراین، باید برای هر فلز ضریبی را تعریف کرد که آن را

**ضریب حرارتی** می نامند. تغییرات مقاومت به ازای یک درجه ی

سانتی گراد را، ضریب حرارتی می گویند و آن را با  $(\alpha)$  نمایش

می دهند؛ برای مثال اگر  $\alpha = 0.004 / ^\circ\text{C}$  باشد، یعنی این که مقاومت

آن جسم به ازای یک درجه ی سانتی گراد  $0.004$  اهم افزایش یا

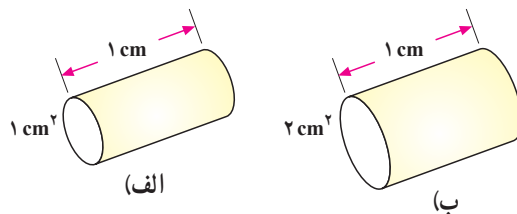
کاهش می یابد. اگر مقاومت الکتریکی جسمی بر اثر حرارت افزایش

یابد، ضریب حرارتی  $(\alpha)$  مثبت و در صورت کاهش مقاومت،

ضریب حرارتی  $(\alpha)$  منفی خواهد بود. در مورد اول، فلز را

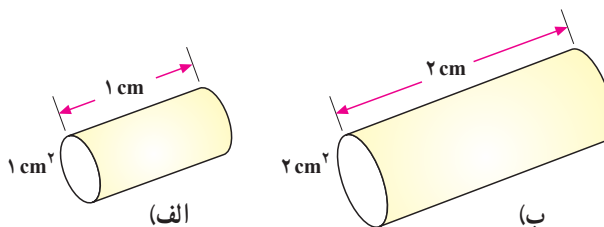
PTC<sup>۱</sup> و در مورد دوم NTC<sup>۲</sup> می نامند.

اگر سطح مقطع سیم را دو برابر کنیم، مقاومت آن نصف می شود. در نتیجه، می گوئیم مقاومت با سطح مقطع نسبت عکس دارد (شکل ۷-۷).



شکل ۷-۷- اثر افزایش سطح مقطع بر مقاومت سیم

اگر طول سیم دو برابر و سطح مقطع آن دو برابر شود، مقاومت الکتریکی نسبت به وضعیت قبلی تغییر نخواهد کرد (شکل ۷-۸).



شکل ۷-۸- اثر افزایش طول و سطح مقطع بر مقاومت سیم

پیش از این در تعریف مقاومت مخصوص و هدایت

مخصوص گفتیم که این پارامترها به جنس هادی بستگی دارند؛

بنابراین، رابطه ی کلی مقاومت با سطح مقطع، طول و جنس سیم

را با فرمول های زیر نشان می دهند.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

یا

$$R = \frac{L}{\kappa \cdot A}$$

در این رابطه:

$R$  مقاومت سیم بر حسب

$L$  طول سیم بر حسب متر،

$A$  سطح مقطع سیم بر حسب میلی متر مربع

<sup>۱</sup> PTC = Positive Temperature Coefficient

<sup>۲</sup> NTC = Negative Temperature Coefficient

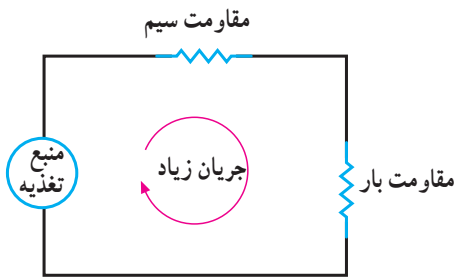
$$\alpha = \frac{1}{0.004} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) = 100(1 + 0.004 \times 250)$$

$$R_t = 200$$

## ۷-۷- مقاومت‌های الکتریکی یک مدار

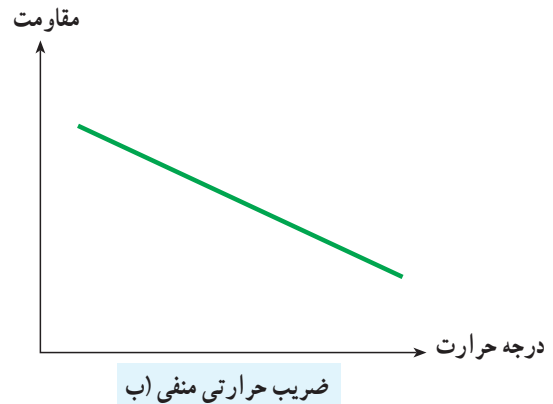
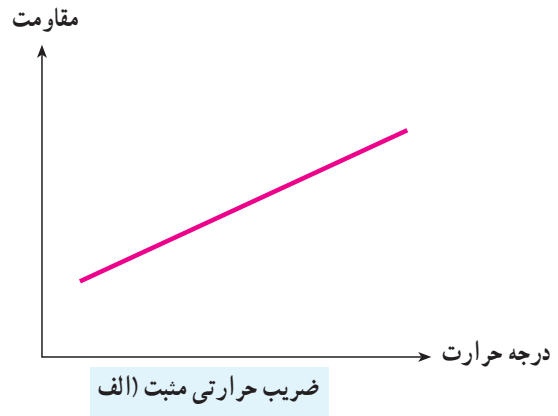
فرض کنید که یک بار الکتریکی را به یک منبع ولتاژ وصل کرده‌ایم. گاهی ممکن است جریانی بیش از حد در مدار جاری شود. زمانی این اتفاق می‌افتد که مقاومت بار الکتریکی خیلی کم یا ولتاژ خروجی منبع خیلی زیاد باشد. شدت جریان را با کم کردن ولتاژ منبع می‌توان کم کرد اما معمولاً این کار ممکن نیست. بنابراین تنها راه این است که مقاومتی به مدار اضافه کنیم تا جریان را کم کند.



شکل ۷-۱۰- مقاومت‌های مدار

این کار را می‌توان با اضافه کردن مقاومت به بار الکتریکی یا سیم‌های رابط انجام داد اما از طرفی، مقاومت بار الکتریکی برحسب شرایطی تنظیم شده و نمی‌توان آن را تغییر داد. پس تنها راه، تغییر مقاومت سیم‌های رابط است ولی مقاومت این سیم‌ها آن قدر کم است که شاید حدود چندین کیلومتر سیم لازم باشد تا مقاومت چند صد اهم به مدار اضافه شود.

بنابراین، برای رفع این مشکل باید روشی را به کار بگیریم که به آسانی بتوانیم هر مقدار مقاومت دلخواه را به مدار اضافه کنیم؛ بدون این که در اندازه‌های مدارمان تغییرات عمده‌ای بدهیم یا مولدمان را عوض کنیم. مقاومت‌ها، عناصر مداری الکتریکی کوچکی هستند که برای دستیابی به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۷-۹- نمودار اجسام با ضرایب حرارتی مثبت و منفی

بنابراین، مقاومت یک جسم در اثر افزایش حرارت چنین

خواهد شد:

$$R_t = R_0 \mp R_0 \alpha t$$

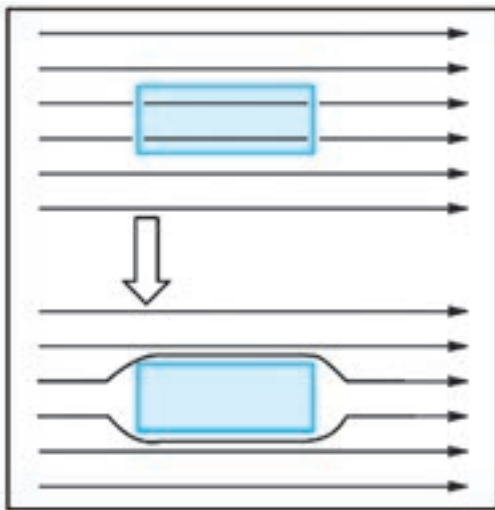
که در آن  $R_0$  مقاومت در صفر درجه و  $R_0 \alpha t$  مقدار تغییر مقاومت است. چون در رابطه‌ی  $R_0$ ،  $R_0 \alpha t$  بر حسب ( ) و  $t$  افزایش دما بر حسب ( $^\circ\text{C}$ ) است، لزوماً ضریب حرارتی ( $\alpha$ ) برحسب  $\frac{1}{^\circ\text{C}}$  خواهد بود. اگر در رابطه‌ی ذکر شده قبل از  $R_0$

فاکتور بگیریم، خواهیم داشت:

$$R_t = R_0(1 \mp \alpha t)$$

مثال ۴: مقاومت الکتریکی سیمی در صفر درجه‌ی

سانتی‌گراد  $100$  اهم است. اگر دمای سیم به  $250$  درجه‌ی سانتی‌گراد برسد، مقاومت الکتریکی آن چند اهم می‌شود؟

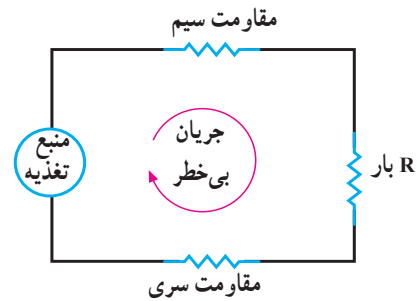


شکل ۷-۱۲

کاربرد جالب این مطلب در ساخت قطارهای سریع‌السیر یا قطارهای شناور است. نمونه‌هایی از این‌گونه قطارها که در سال ۲۰۰۰ میلادی در ژاپن ساخته شد، با سرعت ۵۸۱ km/h حرکت می‌کند. در این قطارها به‌جای استفاده از چرخ از میدان مغناطیسی استفاده شده است. در این حالت قطارهای سریع‌السیر در حال حرکت معمولاً چند سانتی‌متر با ریل فاصله دارد و تماسی با ریل پیدا نمی‌کنند (شکل ۷-۱۳).



شکل ۷-۱۳



شکل ۷-۱۱- افزودن مقاومت به مدار

## ۷-۸- ابر رسانا

اگر دمای فلزات مختلف را تا دمای معینی (دمای بحرانی) پایین آوریم پدیده‌ی شگرفی در آن‌ها اتفاق می‌افتد که طی آن مقدار مقاومت فلزات در برابر عبور جریان برق به‌طور ناگهانی تا حد صفر کاهش می‌یابد. در این شرایط است که فلزها تبدیل به ابر رسانا خواهند شد. تبدیل به حالت ابر رسانایی، فقط مربوط به فلزات نمی‌شود بلکه این حالت در جیوه ناخالص نیز اتفاق می‌افتد. تاکنون مشخص شده است که تقریباً نیمی از عناصر فلزی و همچنین برخی آلیاژها و سرامیک‌ها در درجه حرارت‌های پایین ابر رسانا می‌شوند.

## ۷-۹- کاربرد ابر رسانا

هر ماده اگر قبل از ابر رسانا شدن در میدان مغناطیسی قرار گیرد از آن خطوط میدان مغناطیسی عبور می‌کند؛ چنانچه در حضور میدان مغناطیسی به دمای بحرانی برسد و ابر رسانا شود دیگر هیچ‌گونه خطوط میدان مغناطیسی از آن عبور نمی‌کند. در شکل ۷-۱۲ یک قطعه آهن‌ربا روی یک قطعه ابر رسانا شناور است طبق خاصیتی که در بالا گفتیم ابر رساناها می‌توانند خطوط میدان مغناطیس را به خارج پرتاب کنند و همان‌طور که می‌بینیم قرص مغناطیسی را شناور نگه داشته است.



- ۱- فلزی با ضریب هدایت نسبی  $99/0$  یک عایق خوب است یا بد؟
- ۲- یک عنصر مشخص ۱۵ اهم مقاومت دارد. اگر سطح مقطع آن را سه برابر کنیم، مقاومت آن چه قدر می شود؟
- ۳- ضریب حرارتی را تعریف کنید.
- ۴- آیا طول سیم در ضریب حرارتی آن تأثیر دارد؟ توضیح دهید.
- ۵- برای کنترل جریان مدار از چه روشی استفاده می شود؟
- ۶- ضریب حرارتی مس مثبت است یا منفی؟
- ۷- برای محاسبه ی مقاومت مدار چه پارامترهایی در نظر گرفته می شود؟
- ۸- اگر یک سیم مسی گرم شود، مقاومت آن چه تغییری می کند؟

- ۱- اگر  $\rho_{Cu} = 0/0178 \frac{mm^2}{m}$  باشد، مطلوب است محاسبه ی  $\kappa_{Cu} = 56 \frac{m}{mm^2}$  (ج)
- ۲- یک سیم مسی به طول ۱ را به چهار قسمت مساوی تقسیم می کنیم. آن گاه این چهار قسمت را کنار هم می گذاریم و به صورت سیم واحدی (مثل کابل چهارتایی) از آن ها استفاده می کنیم. آیا مقاومت الکتریکی این سیم نسبت به حالت اولیه کم می شود یا زیاد؟ (از کاهش طول به خاطر پیچش صرف نظر می کنیم.)
- ۳- روی استوانه ای به قطر ۵ سانتی متر  $10^\circ$  دور سیم مسی به سطح مقطع  $1/5 mm^2$  می پیچیم. مقاومت الکتریکی این سیم پیچ چه قدر است؟

$$\kappa_{Cu} = 56 \frac{m}{mm^2} \quad \alpha = 1/18^\circ$$

- ۴- قطر یک سیم کروم نیکل به طول یک متر،  $6/0$  میلی متر و مقاومت آن ۳ اهم است. مقاومت مخصوص و هدایت مخصوص آن را پیدا کنید.
- ۵- برای این که مقاومت سیمی را  $40$  درصد اضافه کنیم، دما چه قدر باید افزایش یابد؟

$$\alpha = 0/004 \frac{1}{^\circ C} \quad (\text{دمای اولیه ی سیم صفر درجه ی سانتی گراد.})$$

- ۶- مقاومت یک اتوی برقی در صفر درجه ی سانتی گراد  $50$  است. اگر درجه حرارت این اتو ضمن کار کردن به  $75^\circ C$  برسد، مقاومت آن چه قدر می شود؟

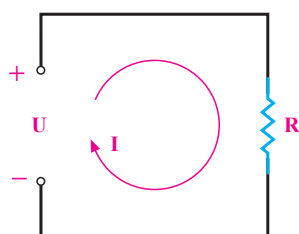
$$R = 50/75 \quad \alpha = 0/0002 \frac{1}{^\circ C} \quad (\text{ج})$$

## قانون اهم

### هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هرنجو انتظار می‌رود:

- ۱- قانون اهم را تعریف کند و شکل‌های مختلف فرمول آن را بنویسد.
- ۲- با حل کردن مسائل مختلف، مفهوم هر سه شکل قانون اهم را توجیه کند.
- ۳- هر یک از مقادیر شدت جریان، ولتاژ و مقاومت را به شرط معلوم بودن دو کمیت دیگر محاسبه کند.



شکل ۸-۱ - مدار الکتریکی

همان‌طور که در فصل‌های پیش گفتیم، ولتاژ باعث جاری شدن جریان الکتریکی در مدار بسته می‌شود و مقاومت، با عبور جریان مخالفت می‌کند. بین ولتاژ، جریان و مقاومت رابطه وجود دارد. این رابطه را نخستین بار **گئورگ سیمون اهم** کشف کرد. به همین دلیل، این رابطه را قانون اهم و واحد مقاومت را نیز اهم نام نهادند. اهم به این نتیجه رسید که اگر مقاومت مداری ثابت نگه داشته شود و مقدار ولتاژ منبع افزایش یابد، شدت جریان زیاد می‌شود. هم‌چنین کاهش ولتاژ، شدت جریان را کم می‌کند. به عبارت دیگر، اهم دریافت که در یک مدار DC، شدت جریان با ولتاژ نسبت مستقیم دارد. کشف دیگر او این بود که اگر ولتاژ منبع ثابت نگاه داشته شود و مقدار مقاومت مدار افزایش یابد، شدت جریان کم می‌شود. به همین ترتیب با کم کردن مقاومت، شدت جریان افزایش می‌یابد. بنابراین، بین سه کمیت ولتاژ، مقاومت و شدت جریان رابطه‌ای وجود دارد که آن را **قانون اهم** می‌نامیم. به‌طور خلاصه، در یک مدار DC، شدت جریان با ولتاژ نسبت مستقیم و با مقاومت نسبت معکوس دارد. رابطه‌ی ریاضی قانون اهم به شکل  $I = \frac{U}{R}$  است که در آن  $U$  (ولتاژ) برحسب ولت و  $R$  (مقاومت) برحسب اهم و  $I$  (شدت جریان) برحسب آمپر است.

### ۸-۱- شکل‌های مختلف قانون اهم

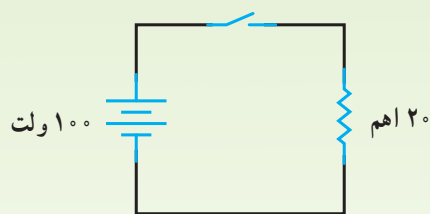
قانون اهم را به دو صورت دیگر نیز می‌توان نوشت:

در این رابطه مقاومت مساوی است با  $U$  (ولتاژ)  $R = \frac{U}{I}$

تقسیم بر  $I$  (جریان) یا  $U = I \cdot R$  که  $U$  (ولتاژ) مساوی است با  $I$  (شدت جریان) ضرب در  $R$  (مقاومت). بدین ترتیب، هرگاه دو کمیت از سه کمیت جریان، ولتاژ و مقاومت را بدانید می‌توانید کمیت سوم را به‌آسانی به‌دست آورید.

شکل ۸-۲ برای یادآوری سه شکل قانون اهم قابل استفاده است. در این شکل هر کدام از علامت‌ها را با انگشت بپوشانید، علایم دیگر رابطه‌ی کمیت اشاره شده را نشان می‌دهد و مقدار مجهول به‌راحتی به‌دست می‌آید.

مثال ۲: اگر در مدار شکل ۸-۴ جریان مجاز مقاومت ۸ آمپر باشد، آیا در صورت بسته شدن کلید، مقاومت خواهد سوخت؟



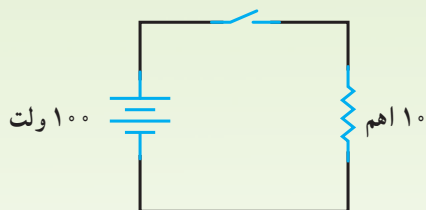
شکل ۸-۴

ابتدا شدت جریان مدار را با استفاده از قانون اهم محاسبه می کنیم.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100}{20} \quad \boxed{I = 5A}$$

چون شدت جریان مدار ۵ آمپر بوده و از جریان مجاز مقاومت (۸ آمپر) کوچک تر است، بنابراین برای مقاومت مشکلی به وجود نمی آید و مقاومت نمی سوزد.

مثال ۳: اگر در مدار شکل ۸-۵ جریان مجاز مقاومت ۱۱ اهمی ۸ آمپر باشد، آیا در صورت بسته شدن کلید، مقاومت خواهد سوخت؟



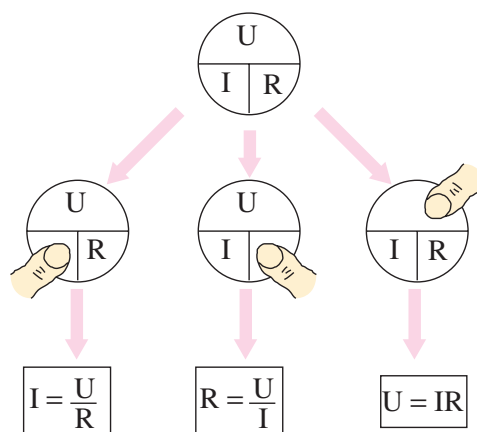
شکل ۸-۵

ابتدا شدت جریان مدار را با استفاده از قانون اهم به دست می آوریم.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100}{10} \quad \boxed{I = 10A}$$

چون شدت جریان عبوری از مقاومت ۱۰ آمپر شده و از جریان مجاز آن (۸ آمپر) بیش تر است، بنابراین مقاومت خواهد سوخت.

نمودار پی

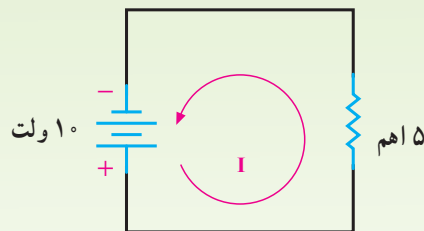


شکل ۸-۲ سه شکل قانون اهم (نمودار  $\pi$ )

## ۸-۲- محاسبه ی جریان

در مواردی لازم است مقدار شدت جریانی که از مدار عبور می کند، محاسبه شود. با داشتن کمیت های ولتاژ و مقاومت و با استفاده از قانون اهم شدت جریان را به راحتی می توان محاسبه کرد. روش خوبی که در این مورد می توان به کار بست، این است که معلوم ها و مجهول ها را تشخیص دهیم. مجهول کمیتی است که می خواهیم آن را پیدا کنیم و معمولاً در طرف چپ معادله قرار می گیرد. معلوم ها کمیت هایی هستند که مقدار آن ها را داریم و معمولاً در طرف راست معادله قرار می گیرند.

مثال ۱: اگر در مدار شکل ۸-۳ ولتاژی برابر با ۱۰ ولت به دو سر مقاومتی برابر ۵ اهم اعمال شود، شدت جریان مدار چه قدر است؟



شکل ۸-۳

وقتی که شدت جریان (I) مجهول است، باید از معادله ی

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

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow I = \frac{10}{5}$$

$$\boxed{I = 2A}$$

### ۳-۸- محاسبه‌ی مقاومت

مقاومت را به وسیله‌ی قانون اهم و با استفاده از رابطه‌ی

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

می‌توان محاسبه کرد.

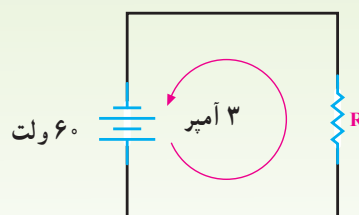
برای انتخاب مقاومت مناسب در مدار یا محاسبه‌ی مقاومت

بار به راحتی می‌توان از قانون اهم استفاده کرد.

مثال ۴: اگر در مدار شکل ۸-۶ شدت جریان ۳ آمپر از

مقاومت عبور کند، مقاومت مدار چه قدر است؟

$$R = \frac{U}{I} = \frac{60}{3} \quad R = 20 \quad \text{مقاومت مدار}$$

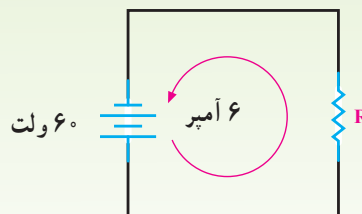


شکل ۸-۶

مثال ۵: اگر در مثال ۴ بخواهیم شدت جریان مدار ۶ آمپر

شود، چه مقاومتی باید در مدار قرار گیرد؟ (شکل ۸-۷)

$$R = \frac{U}{I} = \frac{60}{6} \quad R = 10$$



شکل ۸-۷

### ۴-۸- محاسبه‌ی ولتاژ

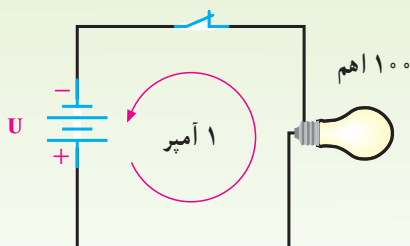
ولتاژ را براساس قانون اهم با استفاده از رابطه‌ی

$$U = I.R$$

می‌توان محاسبه کرد.

مثال ۶: اگر از لامپی به مقاومت ۱۰۰ اهم جریانی به شدت

۱ آمپر عبور کند، با توجه به شکل ۸-۸ ولتاژ منبع چند ولت است؟



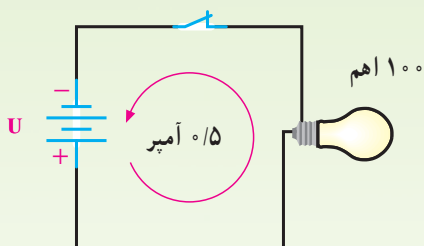
شکل ۸-۸

$$U = I.R = 1 \times 100$$

$$U = 100V$$

مثال ۷: چنانچه باتری مثال ۶ در مدار شکل ۸-۹ بر

اثر فرسودگی، جریان ۰/۵ آمپر را در مدار جاری کند، ولتاژ منبع به چه میزان کاهش یافته است؟



شکل ۸-۹

$$U = I.R = 0.5 \times 100$$

$$U = 50V \quad \text{ولتاژ منبع در حالت فرسودگی}$$

$$100 - 50 = 50V \quad \text{افت ولتاژ*}$$

\* کاهش ولتاژ منبع به علت فرسودگی، بر اثر افزایش مقاومت داخلی باتری است.



- ۱- قانون اهم و سه تساوی آن را بیان کنید.
- ۲- مداری رسم کنید که در آن یک باتری ۱۵ ولت، باری به مقاومت ۱۵ اهم را تغذیه کند. شدت جریان را در مدار به دست آورید.
- ۳- دو صورتی را که در آن‌ها جریان الکتریکی گفته شده در سؤال ۲، دوبرابر می‌شود، بیان کنید.
- ۴- اگر مقاومت مدار ۴ برابر شود، ولتاژ مدار چه قدر باید باشد که جریان الکتریکی ثابت بماند؟
- ۵- شدت جریان در یک مقاومت ۱۰۰ اهم ۲ آمپر است. حداکثر ولتاژ به کار رفته در مدار چه قدر است؟  
(ج)  $U = 200V$
- ۶- چنانچه ولتاژ ثابت باشد و مقاومت مدار  $\frac{1}{4}$  شود، جریان چه تغییری خواهد کرد؟
- ۷- اگر مقاومت مدار  $\frac{1}{4}$  شود، چه تغییری باید در مدار داد تا جریان به صورت اول باقی بماند؟
- ۸- دو برابر کردن مقاومت یک مدار - چنانچه ولتاژ را ثابت نگه داریم - چه اثری در جریان الکتریکی خواهد داشت؟ اگر ولتاژ را نصف کنیم و مقاومت را ثابت نگه داریم، چه تغییری در جریان ایجاد خواهد شد؟ حال اگر ولتاژ و مقاومت را دو برابر کنیم، چه تغییری در جریان حاصل خواهد شد؟

- ۱- به دو سر یک مقاومت ۶۰ اهمی ولتاژی برابر ۳۶ ولت داده شده است. چه جریانی از این مقاومت عبور می‌کند؟  
(ج)  $I = 0.6A$
- ۲- ولتاژ لازم برای عبور جریانی برابر ۱/۲ آمپر از یک مقاومت ۵ اهمی چه قدر است؟  
(ج)  $U = 6V$
- ۳- یک لامپ برابر ۱۵۰ اهم مقاومت دارد و ولتاژی برابر ۱۲۰ ولت به آن داده می‌شود. مقدار جریان عبوری را حساب کنید.  
(ج)  $I = 0.8A$
- ۴- از یک لامپ و یک منبع ولتاژ و یک آمپر متر مداری تشکیل داده‌ایم. اگر منبع ولتاژ را ۲۴ ولت اختیار کنیم، آمپر متر مقدار ۱/۵ آمپر را نشان خواهد داد. مقدار مقاومت مدار را تعیین کنید. اگر به جای منبع ۲۴ ولتی، منبع ولتاژ ۳۶ ولتی قرار دهیم، آمپر متر چه مقداری را نشان خواهد داد؟  
(ج)  $R = 16$  و  $I = 2/25A$
- ۵- چه ولتاژی در مقاومت ۴۰ اهمی، جریانی برابر با ۱۰۰ میلی‌آمپر ایجاد می‌کند؟  
(ج)  $U = 4V$
- ۶- حداکثر ولتاژی که یک مقاومت ۲۲/۵ اهمی می‌تواند تحمل کند ۱۲۰ ولت است. اگر جریانی به شدت ۱۰ آمپر از آن بگذرد آیا این مقاومت تحمل این جریان را خواهد داشت؟ چرا؟

## کار و توان الکتریکی

### هدف‌های رفتاری

- در پایان این فصل، از هترجو انتظار می‌رود :
- ۱- مفهوم کار و توان را توضیح دهد.
- ۲- واحدهای کار و توان الکتریکی را تعریف کند.
- ۳- واحدهای رایج انرژی و توان الکتریکی را نام ببرد.
- ۴- مفهوم تلفات توان را توضیح دهد.
- ۵- راندمان (بازده) را تعریف کند.
- ۶- مقدار حرارت تولید شده در مقاومت‌ها را محاسبه کند.
- ۷- مسائل مربوط به توان و انرژی و حرارت و راندمان را محاسبه کند.

### ۹-۱- تعاریف کار و توان

کنیم. توان عبارت است از مقدار کار انجام شده در واحد زمان. نکته‌ی مهمی که باید همواره در نظر داشت، این است که کار انجام شده در یک مدار ممکن است مفید یا غیرمفید باشد. در هر دو حالت، سرعت انجام کار را بر مبنای توان اندازه می‌گیرند. گردش موتور الکتریکی و هم‌چنین گرمای حاصل از اجاق برقی کار مفید است. از طرف دیگر، گرمای ایجاد شده در سیم‌های رابط و مقاومت‌ها نمونه‌هایی از کار غیرمفیدند؛ زیرا به وسیله‌ی این گرما هیچ عمل مفیدی انجام نمی‌شود. هنگامی که توان برای کار غیرمفید مصرف می‌شود، آن را **توان تلف شده** می‌گویند. شکل ۹-۱ نشان می‌دهد که برای چرخاندن موتور یک ساعت الکتریکی، توان بسیار کمی لازم است؛ در صورتی که برای تولید گرما به وسیله‌ی بخاری برقی باید توان زیادی مصرف شود.

همان‌طور که در فصل‌های پیش گفته شد، منبع تغذیه در یک مدار الکتریکی انرژی الکتریکی را برای مصرف کننده تأمین می‌کند و مصرف کننده (بار) از انرژی منبع برای انجام کار استفاده می‌کند. در هنگام انجام کار، مصرف کننده انرژی را مصرف می‌کند. به همین علت است که باتری‌ها خالی می‌شوند و به شارژ مجدد نیاز دارند و یا باید آن‌ها را عوض کرد. مقدار کار انجام شده به وسیله‌ی مصرف کننده به انرژی‌ای که در اختیار دارد و سرعت استفاده از این انرژی بستگی دارد. به عبارت دیگر، بارهای مختلف با در اختیار داشتن مقدار معین انرژی برای انجام یک کار مساوی، انرژی را در زمان‌های متفاوتی مصرف می‌کنند؛ بنابراین، بعضی از بارها تندتر از سایرین کار می‌کنند. برای این که بدانیم بار با چه سرعتی کار انجام می‌دهد، باید کمیت توان الکتریکی را تعریف

توان مکانیکی معمولاً برحسب اسب بخار hp نیز سنجیده می‌شود. هر اسب بخار معادل ۷۳۶ وات است.

#### ۹-۴- معادلات توان

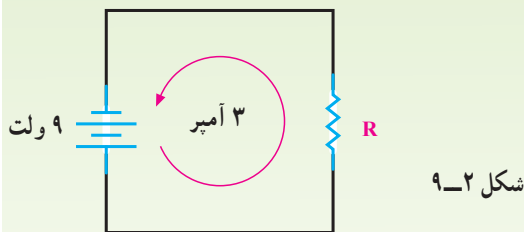
رابطه‌ی توان الکتریکی ( $P = U \cdot I$ ) را پس از ترکیب با روابط قانون اهم به شکل‌های دیگر نیز می‌توان نوشت:

$$P = U \cdot I$$

$$U = RI \Rightarrow P = RI \cdot I \Rightarrow \boxed{P = RI^2}$$

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow P = U \cdot \frac{U}{R} \Rightarrow \boxed{P = \frac{U^2}{R}}$$

مثال ۱: در مدار شکل ۹-۲ مقدار مقاومت الکتریکی و توان مصرفی آن را محاسبه کنید.

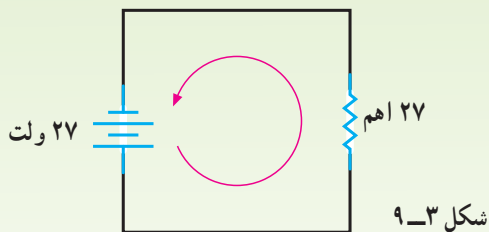


شکل ۹-۲

$$R = \frac{U}{I} = \frac{9}{3} \quad \boxed{R = 3}$$

$$P = U \cdot I = 9 \times 3 \quad \boxed{P = 27W}$$

مثال ۲: در مدار شکل ۹-۳ مقدار شدت جریان و توان مصرفی مقاومت را محاسبه کنید.



شکل ۹-۳

$$I = \frac{U}{R} = \frac{27}{27} \quad \boxed{I = 1A}$$

$$P = RI^2 = 27 \times 1^2 \quad \boxed{P = 27W}$$



شکل ۹-۱- میزان توان لازم برای ساعت الکتریکی و بخاری برقی

#### ۹-۲- واحد کار الکتریکی

واحد کار الکتریکی ژول است و آن مقدار کاری است که اختلاف پتانسیل یک ولت برای جابه‌جایی یک کولن الکتریسته انجام می‌دهد. اگر اختلاف پتانسیل ۱ ولت باعث عبور ۵ کولن الکتریسته شود، می‌گوییم ۵ ژول کار انجام شده است. این مطلب را می‌توان از طریق رابطه‌ی  $W = q \cdot U$  نشان داد. در این رابطه،  $W$  انرژی برحسب ژول،  $q$  بار عبوری برحسب کولن و  $U$  اختلاف پتانسیل برحسب ولت است. به‌خاطر دارید که یک آمپر برابر است با عبور یک کولن الکتریسته از یک نقطه‌ی مدار در یک ثانیه  $I = \frac{q}{t}$ . پس، از ترکیب دو رابطه‌ی ذکر شده می‌توان

نوشت:

$$\boxed{W = I \cdot t \cdot U}$$

#### ۹-۳- واحد توان الکتریکی

توان الکتریکی را قبلاً تعریف کردیم و آن عبارت بود از میزان کار انجام شده در واحد زمان. پس، با توجه به روابط گفته‌شده خواهیم داشت:

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow P = \frac{I \cdot t \cdot U}{t} \Rightarrow \boxed{P = U \cdot I}$$

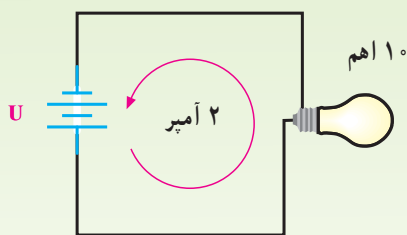
بنابراین، واحد توان الکتریکی را بدین صورت نیز می‌توان تعریف کرد: اگر با اختلاف پتانسیل ۱ ولت، شدت جریانی معادل ۱ آمپر از مداری عبور کند، توان مصرف‌شده‌ی مدار یک وات است (واحد توان را با  $W$  نمایش می‌دهند).

تلفات توان را می‌توان از رابطه‌ی  $\Delta P = RI^2$  محاسبه کرد. در این رابطه،  $\Delta P$  تلفات توان برحسب وات و  $R$  مقاومت الکتریکی سیم‌های رابط و مقاومت داخلی منابع (و در مورد الکتروموتورها مقاومت سیم‌پیچ‌ها برحسب اهم) و  $I$  شدت جریان عبوری برحسب آمپر است. کاهش توان تلف‌شده از دو طریق امکان‌پذیر است: ۱- کم کردن شدت جریان، ۲- کاهش مقاومت سیم‌های رابط.

**۹-۵-۱- کم کردن شدت جریان:** چون شدت جریان عبوری به توان مصرف‌کننده بستگی دارد، پس با اعمال ولتاژ کم‌تر می‌توان اتلاف توان را کاهش داد ولی مصرف‌کننده دارای توان نامی نیست و کار مورد نظر را انجام نخواهد داد؛ بنابراین، کاهش ولتاژ روش مناسبی نیست.

**۹-۵-۲- کاهش مقاومت سیم‌های رابط:** با انتخاب سطح مقطع و جنس مناسب سیم می‌توان مقاومت الکتریکی سیم‌های رابط را کاهش داد. در این صورت، تلفات توان  $I^2 \cdot R$  به کم‌ترین مقدار کاهش می‌یابد. در بعضی از دستگاه‌های الکتریکی مانند اتو و بخاری برقی، گرمای ایجاد شده به وسیله‌ی مقاومت توان مفید است و نمی‌توان آن را توان تلف‌شده در نظر گرفت.

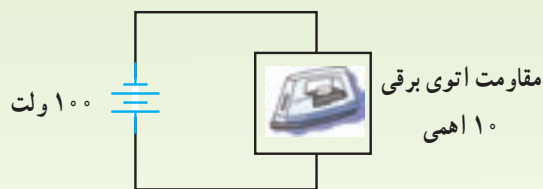
**مثال ۵:** در شکل ۹-۶ توان مفید لامپ را محاسبه کنید.



شکل ۹-۶

$$P = RI^2 \quad P = 10 \times 2^2 \quad \boxed{P = 40 \text{ W}}$$

**مثال ۳:** شدت جریان و توان مصرفی اتوی برقی شکل ۹-۴ را محاسبه کنید.

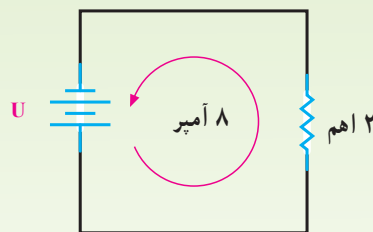


شکل ۹-۴

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100}{10} \quad \boxed{I = 10 \text{ A}}$$

$$P = RI^2 = 10 \times 10^2 \quad \boxed{P = 1000 \text{ W}}$$

**مثال ۴:** ولتاژ منبع و توان مصرفی مقاومت ۲ اهمی مدار شکل ۹-۵ را محاسبه کنید.



شکل ۹-۵

$$U = R \cdot I = 2 \times 8 \quad U = 16 \text{ V}$$

$$P = RI^2 = 2 \times 8^2 \quad \boxed{P = 128 \text{ W}}$$

## ۹-۵- تلفات توان

توان مصرف‌شده در یک مدار، نشان‌دهنده‌ی کار انجام‌شده در واحد زمان در آن مدار است ولی باید در نظر داشت که همه‌ی توان مصرفی صرف انجام کار مفید نمی‌شود بلکه به علت وجود مقاومت الکتریکی در سیم‌های رابط، منبع ولتاژ و بار، توان اتلاف خواهد شد. باید تلاش کرد که در هر مدار الکتریکی مقدار توان تلف‌شده به حداقل برسد.



شکل ۸-۹- چند مقاومت تولیدی کارخانه‌های مختلف

مثال ۷: شدت جریان مجاز (قابل تحمل) برای مقاومت ۱ اهم با توان مجاز ۴ وات چه قدر است؟

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{4}{1}} = 2A \quad \boxed{I = 2A}$$

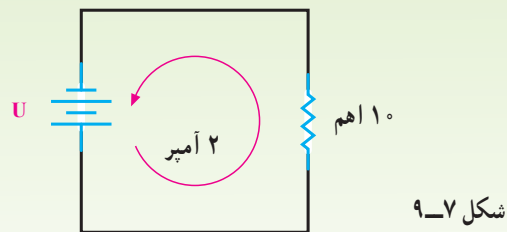
در صورتی که جریان عبوری از مقاومت از ۲ آمپر تجاوز کند، مقاومت صدمه می‌بیند و به اصطلاح می‌سوزد.

## ۹-۷- میزان توان لامپ رشته‌ای (معمولی)

لامپ معمولی از یک فیلامان از جنس تنگستن - که در حباب شیشه‌ای قرار دارد - تشکیل شده است. وقتی به لامپ ولتاژی اعمال شود، جریانی از رشته‌ی داخل عبور می‌کند و سبب مصرف توان  $I^2.R$  در آن می‌شود. گرمای حاصل از مصرف این توان به حدی است که فیلامان لامپ داغ می‌شود، به رنگ سفید درمی‌آید و از خود نور می‌تاباند. هرچه رشته بیش‌تر گرم شود، نوری که از آن می‌تابد بیش‌تر است. به این ترتیب، برای تقسیم‌بندی لامپ‌های الکتریکی از توان مصرفی آن‌ها - که باعث گرما و نهایتاً نور می‌شود - استفاده می‌کنند. کارخانه‌های تولیدکننده‌ی لامپ نیز مقدار توان گرمایی  $I^2.R$  را برحسب وات و ولتاژ نامی روی لامپ ثبت می‌کنند. هر چه میزان توان مصرفی لامپ‌ها بیش‌تر باشد، مقدار نوری که از خود می‌تاباند زیادتر خواهد بود.

در شکل ۹-۹ میزان توان مصرفی چند لامپ رشته‌ای را که همگی با ولتاژ ۲۲۰ ولت تغذیه می‌شوند، مشاهده می‌کنید.

مثال ۶: در شکل ۷-۹ تلفات توان در مقاومت ۱۰ اهمی را محاسبه کنید.



$$\Delta P = RI^2 \quad \Delta P = 10 \times 2^2 \quad \boxed{\Delta P = 40W}$$

با توجه به مثال‌های ۵ و ۶ درمی‌یابیم که  $I^2.R$  گاهی توان مفید است (در لامپ) و در بیش‌تر مواقع به صورت حرارت و غیرمفید (در سیم‌های رابط) به هدر می‌رود.

## ۹-۶- توان مجاز مقاومت‌ها

می‌دانیم که در یک مقاومت اگر شدت جریان از حد معینی بالاتر رود، با خرابی یا از بین رفتن مقاومت و به اصطلاح سوختن آن مواجه خواهیم شد. این حرارت را توان  $I^2.R$  ایجاد می‌کند که آن را توان تلف‌شده برحسب وات می‌دانیم. بنابراین، هر مقاومت دارای یک حداکثر توان یا توان مجاز است که نشان دهنده حرارت ایجاد شده به وسیله‌ی  $I^2.R$  قبل از سوختن و از بین رفتن است. این به آن معناست که یک مقاومت با توان مجاز برابر ۱ وات اگر در مداری قرار گیرد که توان مصرفی در آن  $(P = I^2.R)$  بیش‌تر از ۱ وات باشد، خواهد سوخت. اگر توان مجاز یک مقاومت را بدانیم و بخواهیم حداکثر شدت جریانی را که به وسیله‌ی مقاومت قابل تحمل است پیدا کنیم، می‌توانیم از رابطه‌ی زیر استفاده کنیم.

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

معمولاً اندازه‌ی قدرت روی مقاومت‌ها نوشته نمی‌شود اما از روی اندازه‌ی فیزیکی آن‌ها قابل تشخیص است. اندازه‌های فیزیکی استفاده شده برای مقاومت ۱ وات نه فقط بسته به نوع آن متفاوت است بلکه تولیدات کارخانه‌های مختلف نیز فرق می‌کند. پس ممکن است تشخیص آن دشوار باشد؛ بنابراین، باید فهرست مشخصات مقاومت‌های تولیدی کارخانه‌های مختلف را کنترل کرد.

از این خاصیت (تنظیم ولتاژ)، می‌توان نور لامپ‌ها را تغییر داد.

**مثال ۹:** روی لامپی مقادیر  $۲۲۰V$  و  $۲۰۰W$  به چشم می‌خورد. شدت جریان و مقاومت آن را محاسبه کنید.  
در صورت کاهش ولتاژ به میزان  $۱۸۰$  ولت، شدت جریان و توان جذب‌شده توسط لامپ چه قدر می‌شود؟

$$P = U \cdot I \Rightarrow 200 = 220 \times I \Rightarrow I = \frac{200}{220} \Rightarrow \boxed{I = 0.91A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.91} \Rightarrow \boxed{R = 242\Omega}$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{180}{242} \Rightarrow \boxed{I = 0.74A}$$

$$P = RI^2 = 242 \times 0.74^2 \Rightarrow \boxed{P = 130W}$$

پس، در اثر کاهش ولتاژ از  $۲۲۰$  ولت به  $۱۸۰$  ولت جریان و توان به ترتیب به میزان  $۰.۷۴$  آمپر و  $۱۳۰$  وات تقلیل می‌یابد و روشنایی لامپ از روشنایی عادی کم‌تر می‌شود.

## ۸-۹- توان مفید و راندمان (بازده) الکتروموتور

در الکتروموتورها میزان توان مفید - که به صورت مکانیکی ارائه می‌شود - به مقدار توان تلف‌شده در سیم‌پیچ‌ها ( $I^2 \cdot R$ ) بستگی دارد ( $R$  مقاومت سیم‌پیچ‌ها و  $I$  شدت جریان عبوری است). بدین معنا که هر قدر  $I^2 \cdot R$  بیش‌تر باشد، توان مفید کاهش می‌یابد؛ بنابراین، در الکتروموتورها سعی بر این است که مقدار توان تلف‌شده کم باشد. البته به غیر از  $I^2 \cdot R$  تلفات دیگری در الکتروموتورها وجود دارد. معمولاً در روی پلاک مشخصات الکتروموتورها، توان مفید برحسب اسب بخار و راندمان به درصد نوشته می‌شود. از این طریق، توان الکتریکی الکتروموتور و تلفات داخلی آن را به راحتی محاسبه می‌کنند. با ذکر تمرین مطلب روشن‌تر می‌شود (راندمان، نسبت توان مفید ( $P_f$ ) به توان ورودی الکتروموتور ( $P_i$ ) است که آن را با حرف یونانی  $\eta$  (تا) نمایش می‌دهند).

**مثال ۸:** شدت جریان و مقاومت فیلامان هر یک از لامپ‌های شکل ۹-۹ را در صورتی که ولتاژ نامی همه‌ی آن‌ها  $۲۲۰$  ولت باشد، محاسبه کنید.

۴۰ وات      ۶۰ وات      ۱۰۰ وات



شکل ۹-۹- توان مصرفی چند لامپ

لامپ  $۱۰۰W$        $P = U \cdot I \Rightarrow 100 = 220 \times I$

$$\boxed{I = 0.45A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.45}$$

$$\boxed{R = 488/\Omega}$$

لامپ  $۶۰W$        $P = U \cdot I \Rightarrow 60 = 220 \times I$

$$\boxed{I = 0.27A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.27}$$

$$\boxed{R = 814/\Omega}$$

لامپ  $۴۰W$        $P = U \cdot I \Rightarrow 40 = 220 \times I$

$$\boxed{I = 0.18A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.18}$$

$$\boxed{R = 1222/\Omega}$$

**نتیجه:** با ولتاژ ثابت، لامپ با توان بیش‌تر دارای شدت جریان بیش‌تر و مقاومت کم‌تر است و برعکس.

پس در صورت افزایش ولتاژ هر لامپی، شدت جریان آن بیش‌تر می‌شود و لامپ می‌سوزد. هم‌چنین، بر اثر کاهش ولتاژ، شدت جریان عبوری کم می‌شود و روشنایی آن نیز کاهش می‌یابد. با استفاده

کیلووات - ساعت استفاده می‌کنیم بر این اساس، انرژی مصرفی لامپ مورد مثال، برابر  $1 \text{ kWh} (= 1 \times 10^3 \text{ Wh})$  است.

### ۹-۱۰ - محاسبه‌ی قیمت برق مصرفی

برای محاسبه‌ی قیمت انرژی مصرفی کل، کافی است ابتدا مقدار انرژی مصرفی هر وسیله‌ی الکتریکی را محاسبه و سپس با هم جمع کنیم. به این ترتیب، انرژی مصرفی کل به دست می‌آید. آن‌گاه انرژی مصرفی کل را در قیمت هر kWh ضرب می‌کنیم تا بهای انرژی مصرفی محاسبه شود. با نحوه‌ی محاسبه‌ی قیمت برق مصرفی در درس فیزیک ۱ آشنا شده‌اید.

مثال ۱۰: توان مفید الکتروموتوری ۱ اسب بخار و راندمان آن ۸۵ درصد است. توان ورودی و تلفات داخلی آن را محاسبه کنید. در صورتی که ولتاژ این الکتروموتور ۲۲۰ ولت باشد، شدت جریان چه قدر است؟

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{1 \times 736}{0.85}$$

$$P_1 = 866 \text{ W} \quad \text{قدرت ورودی}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 866 - 736$$

$$\Delta P = 130 \text{ W} \quad \text{تلفات داخلی}$$

$$P_1 = U \cdot I \rightarrow I = \frac{P_1}{U} = \frac{866}{220} \quad I = 3.9 \text{ A}$$

### ۹-۱۱ - محاسبه‌ی انرژی حرارتی

همان‌گونه که در درس فیزیک ۱ خواندید، انرژی حرارتی در وسایل گرمازا مانند آب گرم‌کن و کتری برقی را برحسب کالری محاسبه می‌کنند. برای تولید یک کالری گرما  $4/18$  ژول انرژی الکتریکی نیاز است. پس برای تولید  $Q$  کالری حرارت،  $Q = 4/18$  ژول مورد نیاز خواهد بود؛ بنابراین، خواهیم داشت:  $W = 4/18 Q$ . این رابطه را به شکل  $Q = 0.24 W$  نیز می‌توان نوشت.

$$W = P \cdot t = RI^2 t$$

$$Q = 0.24 RI^2 t$$

### ۹-۹ - اندازه‌گیری انرژی الکتریکی

اندازه‌گیری انرژی مصرفی منازل، فروشگاه‌ها و کارخانه‌ها به وسیله‌ی دستگاهی به نام کنتور برق انجام می‌شود. هر مشترک براساس مقدار کاری که به وسیله‌ی انرژی الکتریکی انجام داده است، باید مبلغی پول پرداخت کند. می‌دانیم که سرعت کار انجام شده را برحسب وات اندازه می‌گیرند. بنابراین، برای محاسبه‌ی کل کار انجام شده باید زمان مورد مصرف را در توان ضرب کرد؛ مثلاً اگر یک لامپ ۱۰۰ واتی مدت یک ساعت روشن باشد، انرژی مصرفی لامپ  $100 \times 1 = 100$  وات - ساعت می‌شود. وات - ساعت واحد کوچکی است؛ به همین دلیل، به جای آن از



۱- واحدهای ژول و وات را تعریف کنید.

۲- یک کیلووات - ساعت چند ژول است؟

۳- یک موتور ۱۴۹۲ وات توان مصرف می‌کند. توان آن را بر حسب hp و kW بیان کنید.

۱/۴۹۲ kW و ۲/۰۲ hp (ج)

۴- اگر بخواهیم برای روشن کردن اتاق نور بیش‌تری تولید کنیم، توان لامپ به کار رفته باید کم‌تر باشد یا

بیش‌تر؟ چرا؟

۵-  $I^2 R$  تلف شده چه مفهومی دارد؟

۱- لامپی با ولتاژ  $220^\circ$  ولت کار می‌کند و توان مصرفی آن  $150^\circ$  وات است. مقاومت فیلامان آن را حساب کنید.

(ج)  $322/6$

۲- ماکزیمم ولتاژی را که می‌توان به دو سر یک مقاومت  $1000^\circ$  اهمی با توان  $10^\circ$  وات وصل کرد، چه قدر است؟

(ج)  $100V$

۳- توان مجاز مقاومت  $1^\circ$  کیلو اهمی  $10^\circ$  وات است. جریان قابل تحمل آن چه قدر است؟  $1A/^\circ$  (ج)  
۴- یک لامپ  $100^\circ$  وات و  $220^\circ$  ولتی را به ولتاژ  $100^\circ$  ولت وصل می‌کنیم. شدت جریان و توان لامپ را در این حالت حساب کنید.

(ج)  $20W$  و  $2A/^\circ$

۵- یک اتوی برقی  $220^\circ$  ولتی،  $550^\circ$  وات توان مصرف می‌کند. مقاومت سیم‌های داخل آن چند اهم است؟ اگر ولتاژ  $15^\circ$  درصد کاهش یابد، توان اتو چند درصد کاهش می‌یابد؟

(ج)  $27/8\%$  و  $88$

۶- یک موتور الکتریکی، در مدت یک دقیقه و  $10^\circ$  ثانیه؛  $35000^\circ$  ژول انرژی مصرف کرده است. توان دریافتی آن چه قدر است؟ در صورتی که راندمان این موتور  $80\%$  باشد، قدرت مفید آن چند اسب بخار است؟

(ج)  $P_1 = 500W$  و  $P_2 = 54hp$

۷- یک جرثقیل الکتریکی در مدت  $3$  دقیقه  $10^\circ$  تن بار را جابه‌جا کرده است. اگر توان این جرثقیل  $8000^\circ$  وات باشد، برای جابه‌جایی یک تن بار چه مقدار انرژی الکتریکی را به مصرف می‌رساند؟

(ج) ژول  $144000^\circ$

۸- از یک اتوی برقی به مقاومت  $65^\circ$  اهم، جریانی به شدت  $3$  آمپر به مدت  $5$  دقیقه عبور می‌کند. مقدار گرمای ایجاد شده در اتو را برحسب کیلوکالری محاسبه کنید.

(ج)  $42/12kcal$

۹- یک آب‌گرم‌کن الکتریکی در مدت  $2$  ساعت  $40^\circ$  لیتر آب  $10^\circ$  درجه را به  $60^\circ$  درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رساند. در صورتی که توان این آب‌گرم‌کن  $1500^\circ$  وات باشد برای گرم کردن این مقدار آب، چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف کرده است؟ برای گرم کردن هر لیتر آب چه مقدار انرژی صرف شده است؟ مقدار انرژی مصرفی  $40^\circ$  لیتر آب به‌ازای یک درجه‌ی سانتی‌گراد چه قدر بوده است؟

(ج)  $3kWh$  و  $6kWh/^\circ$  و  $75kWh/^\circ$

## اتصال سری مقاومت های اهمی

هدف های رفتاری

- در پایان این فصل، از هرجو انتظار می رود :
- ۱- اتصال سری مقاومت ها را تعریف کند.
- ۲- مقاومت معادل چند مقاومت سری را تعریف کند.
- ۳- از قانون اهم برای محاسبه ی جریان و ولتاژ استفاده کند.
- ۴- چگونگی توزیع ولتاژ را در مدار سری توضیح دهد.
- ۵- کاربرد اتصال سری مقاومت را بیان کند.
- ۶- نسبی بودن پتانسیل الکتریکی را توضیح دهد.
- ۷- مقاومت معادل چند مقاومت سری را محاسبه کند.
- ۸- قانون ولتاژهای کیرشهف را در مدار سری به کار گیرد.
- ۹- توان را در مدار سری توضیح دهد.
- ۱۰- قوانین و مشخصات مدار سری را نام ببرد.
- ۱۱- جریان و توان را در مدار سری محاسبه کند.
- ۱۲- نحوه ی محاسبه توان مصرفی کل در مدارهای سری را با ذکر رابطه توضیح دهد.

یک واگن به انتهای واگن دیگر وصل است. هنگام حرکت، سرعت در همه ی واگن ها یکسان است (شکل ۱-۱۰).



شکل ۱-۱۰ در قطار، واگن ها به طور سری بسته می شوند.

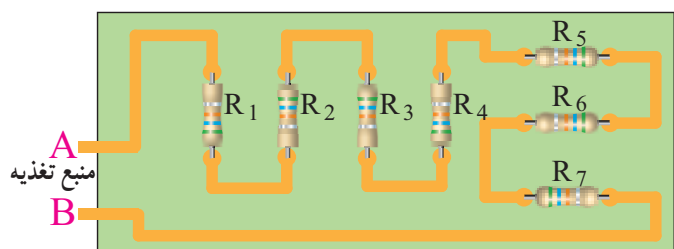
### ۱-۱۰ اتصال سری مقاومت های اهمی<sup>۱</sup>

قبلاً با کمیت فیزیکی مقاومت و خصوصیات آن آشنا شده اید. این مقاومت ها را با استفاده از روش های خاص می توان به هم اتصال داد. یکی از این روش ها اتصال سری مقاومت هاست که در این فصل مورد بررسی قرار می گیرد.

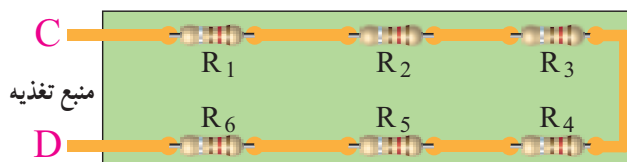
اگر با قطار مسافرت کرده باشید، دیده اید که قطار از تعدادی واگن و یک لکوموتیو تشکیل می شود. واگن ها می توانند مشابه یا بزرگ و کوچک باشند. در صورت نامساوی بودن، هر واگن گنجایش حمل بار یا مسافر خاص خود را دارد. اتصال واگن ها به یک دیگر به صورت پشت سرهم (سری) است؛ یعنی، ابتدای

۱- سری در زبان انگلیسی واژه ای به معنای اثبیا یا وقایع پشت سرهم و پی در پی است.

مقاومت را با حرف R نمایش می‌دهند که از کلمه‌ی Resistor گرفته شده است. برای نمایش چند مقاومت با مقادیر اهمی متفاوت، آن‌ها را با اندیس‌های ۱ تا n مشخص می‌کنند. برای مثال، مقاومت‌های شکل ۱-۴ به‌طور سری به هم بسته شده و با علامت مشخصه‌ی R و اندیس مربوط نام‌گذاری گردیده‌اند.



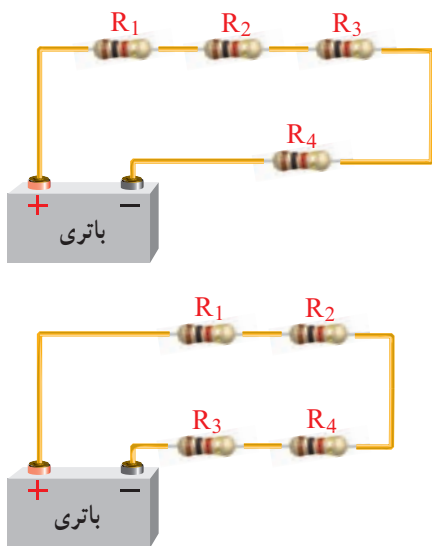
الف - بین نقاط A و B مقاومت‌های  $R_1$  تا  $R_7$  سری شده‌اند.



ب - بین نقاط C و D مقاومت‌های  $R_1$  تا  $R_6$  سری شده‌اند.

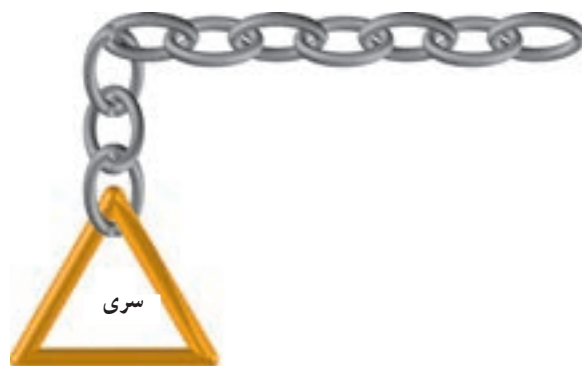
شکل ۱-۴ - مقاومت‌های سری

ترتیب قرار گرفتن مقاومت‌ها در مدار سری، در مقاومت کل مدار تأثیری ندارد. به علاوه، چون دو سر هر مقاومت از لحاظ قرار گرفتن در مدار با یک دیگر تفاوتی ندارد، برای آن‌ها ابتدا یا انتهای در نظر نمی‌گیرند (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵ - جابه‌جایی مقاومت‌ها در اتصال سری

زنجیر نیز نمونه‌ی دیگری از حالت سری است و از حلقه‌های زیادی تشکیل می‌شود. حلقه‌های زنجیر مانند واگن‌های قطار به‌صورت سری به یک‌دیگر اتصال دارند. چنان‌چه نیروی در جهت طولی به زنجیر وارد شود، به‌طور یکسان به همه‌ی حلقه‌های آن منتقل می‌شود (شکل ۱-۲).

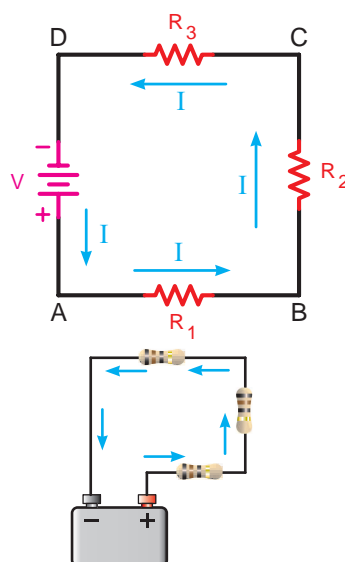


شکل ۱-۲ - نمایش سری بودن حلقه‌های زنجیر

برای سری بستن مقاومت‌ها نیز همین روش دنبال می‌شود. بدین ترتیب که اگر چند مقاومت پشت سرهم طوری به یک‌دیگر متصل شوند که راهی را برای عبور جریان تشکیل دهند، یک مدار مقاومتی سری درست می‌شود. اتصال مقاومت‌ها با یک‌دیگر همانند اتصال دانه‌های زنجیر یا واگن‌های قطار است.

شکل ۱-۳ - نمای مداری و تصویر ظاهری چند مقاومت

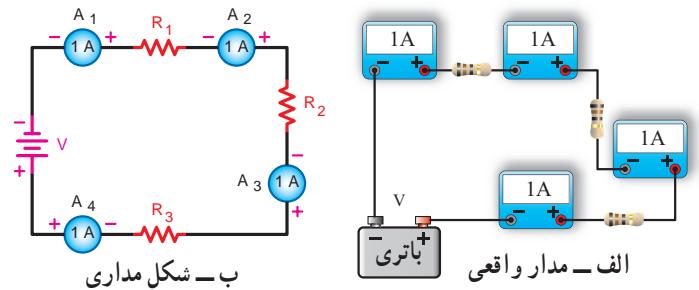
سری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ - نمای مداری و ظاهری چند مقاومت سری

## ۲-۱۰- جریانی در مدار سری

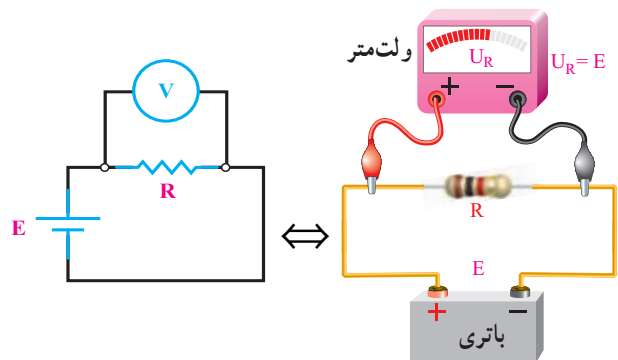
در یک مدار سری شدت جریان - همانند سرعت در قطار- در همه‌ی نقاط مدار یکسان است؛ یعنی، جریان وارد شده در هر نقطه از مدار سری با جریان خارج شده از همان نقطه برابر است. بنابراین، اگر - مطابق شکل ۶-۱۰- در نقاط مختلف یک مدار سری آمپمترهایی قرار دهیم، همه یک جریان را نشان می‌دهند.



شکل ۶-۱۰- یکسان بودن شدت جریان در همه‌ی نقاط مدار سری

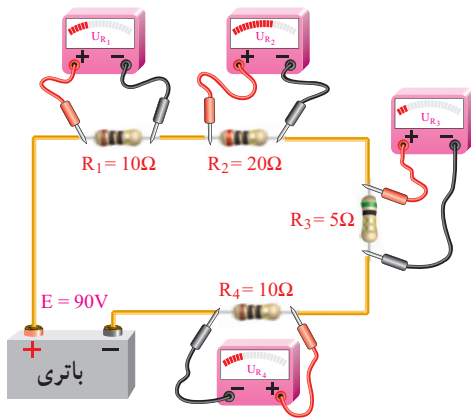
## ۳-۱۰- ولتاژ در مدار سری

اگر به دو سری یک مقاومت، ولتاژ مشخصی داده شود تمام آن ولتاژ در دوسر مقاومت افت می‌کند. مطابق شکل ۷-۱۰- مقدار ولتاژ دو سر مقاومت را به کمک ولت‌متر می‌توان اندازه گرفت؛ در واقع، ولتاژ منبع با ولتاژ دوسر مقاومت برابر است.



شکل ۷-۱۰- اندازه‌گیری ولتاژ دو سر مقاومت

چنانچه تعداد مقاومت‌ها زیاد باشد، ولتاژ منبع روی همه‌ی آن‌ها تقسیم می‌شود؛ به‌طوری‌که اگر با ولت‌متر افت ولتاژهای دوسر مقاومت‌ها را اندازه بگیریم و باهم جمع کنیم، ولتاژ منبع به‌دست می‌آید. در شکل ۸-۱۰ این واقعیت را مشاهده می‌کنید.



$$E = U_{R_1} + U_{R_2} + U_{R_3} + U_{R_4}$$

$$90 = 20 + 40 + 10 + 20$$

شکل ۸-۱۰- اندازه‌گیری ولتاژ در مدار با اتصال سری مقاومت‌ها

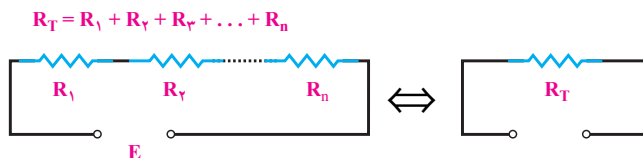
از ولتاژهای اندازه‌گیری شده توسط ولت‌متر در یک مدار سری می‌توان فهمید که اگر مقاومت‌ها مساوی نباشند، هر مقاومتی که مقدار آن بیش‌تر باشد، افت ولتاژ دوسر آن نیز بزرگ‌تر است. برعکس، مقاومتی که مقدار مقاومت کم‌تری دارد، افت ولتاژ دوسر آن نیز کم‌تر است و افت ولتاژ دو سر مقاومت‌های با مقدار مساوی؛ برابر است. (طبق قانون اهم  $U=RI$ )

**نتیجه:** ولتاژ منبع در مدار سری به نسبت مستقیم مقدار مقاومت‌های آن مدار تقسیم می‌شود. یعنی مقاومت بیشتر دارای ولتاژ بیشتر و مقاومت کمتر دارای ولتاژ کمتری است.

## ۴-۱۰- مقاومت در مدار سری

به‌جای چند مقاومت سری می‌توان یک مقاومتی را انتخاب کرد که مقدار مقاومت آن با مجموع مقاومت چند مقاومت سری برابر باشد. مقاومتی که به‌جای چند مقاومت سری قرار می‌گیرد، مقاومت کل یا مقاومت معادل آن چند مقاومت نامیده می‌شود و آن را با  $R_T$  نمایش می‌دهند. چنانچه مقاومت  $R_T$  جایگزین مقاومت‌های مدار شود، جریان مدار تغییری نخواهد کرد.

در مدار سری اگر یک یا چند مقاومت به مدار افزوده گردد، شدت جریان مدار کم می‌شود. لذا برای ثابت نگه‌داشتن شدت جریان - در حد قبلی - باید به نیروی محرکه‌ی مدار



شکل ۱۰-۱ مدار سری با n مقاومت

حالت خاص: در صورتی که n مقاومت در مدار سری

باهم مساوی باشند، مقاومت معادل از رابطه‌ی زیر به دست می آید. چرا؟

$$R_T = n \cdot R$$

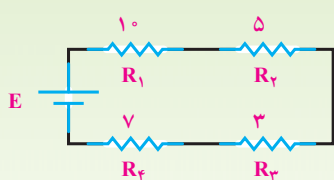
## ۵-۱۰ کاربرد قانون اهم

تاکنون متوجه شده اید که جریان و ولتاژ در مدار سری چگونه است اما برای این که بدانید مقدار آن‌ها چگونه تغییر می کند و چه قدر است، باید از قانون اهم کمک بگیرید. قانون اهم به ما می گوید که روابط زیر بین ولتاژ، جریان و مقاومت برقرار است.

$$E = IR, \quad I = \frac{E}{R}, \quad R = \frac{E}{I}$$

در این جا با ذکر چند مثال، با نحوه‌ی کاربرد قانون اهم در مدارهای سری آشنا می شویم.

مثال ۱: مقاومت معادل مدار شکل ۱۰-۱۱ را به دست



شکل ۱۰-۱۱

راه حل:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_T = 10 + 5 + 3 + 7 = 25$$

مثال ۲: مقاومت معادل مدارهای شکل ۱۰-۱۲ را

به دست آورید. مقاومت معادل کدام مدار بیش تر است؟

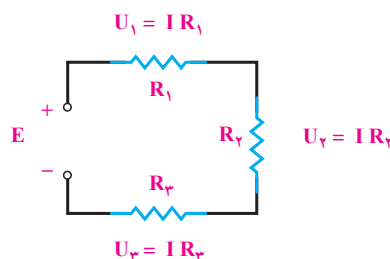
افزود. بنابراین، در مدار سری با اضافه کردن تعداد مقاومت‌ها و ثابت بودن ولتاژ منبع، شدت جریان کم می شود و این نشان می دهد که مقاومت معادل یا مقاومت کل مدار افزایش یافته است. برای محاسبه‌ی مقاومت معادل - یعنی مقاومتی که می توان آن را جایگزین مجموعه‌ای از مقاومت‌ها کرد، به شرطی که در شدت جریان مدار تغییری ندهد - به صورت زیر عمل می کنیم.

مدار شکل ۹-۱ را با سه مقاومت  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$

در نظر می گیریم.

در مدار سری شدت جریان در تمام نقاط مدار یکسان

است.



شکل ۹-۱ مدار سری با سه مقاومت

در مدار فوق ولتاژ منبع با جمع افت ولتاژها برابر است.

رابطه‌ی آن به این صورت است:

$$E = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1)$$

با توجه به قانون اهم، داریم:

$$(2)$$

$$E = I \cdot R_T, \quad U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2, \quad U_3 = IR_3$$

مقادیر روابط ۲ را در رابطه‌ی ۱ قرار می دهیم.

$$IR_T = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

با حذف جریان‌ها از طرفین تساوی به رابطه‌ی مقاومت

معادل می رسیم.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

با توجه به اثبات رابطه‌ی ذکر شده، مقاومت معادل در یک

مدار سری از جمع مقاومت‌های تشکیل دهنده‌ی آن مدار به دست

می آید. شکل ۱۰-۱ در حالت کلی رابطه‌ی فوق را برای n

مقاومت نشان می دهد.

۱- علامت (امگا) به معنای اهم و علامت k به معنای کیلو اهم یا هزار اهم است.

با استفاده از قانون اهم می توان نوشت :

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{25V}{100} = 0.25A$$

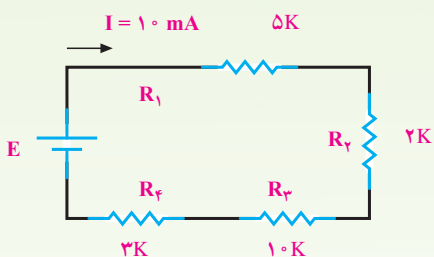
این جریان کل در همه جای مدار یکسان باقی می ماند.

مثال ۴: در مدار شکل ۱۴-۱۰ جریان ۱۰ میلی آمپر از

مدار عبور می کند. ولتاژ منبع تغذیه چه قدر است؟

راه حل: ابتدا مقاومت معادل  $(R_T)$  را به دست می آوریم.

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \\ &= 5k\Omega + 2k\Omega + 10k\Omega + 3k\Omega \\ &= 20k\Omega \end{aligned}$$



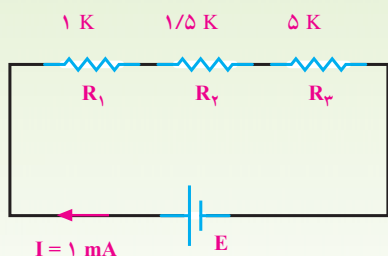
شکل ۱۴-۱۰

با استفاده از قانون اهم داریم :

$$\begin{aligned} E &= I \cdot R_T \\ E &= 10mA \times 20k \\ E &= 10 \times 10^{-3} \times 20 \times 10^3 \\ &= 200V \end{aligned}$$

مثال ۵: در مدار شکل ۱۵-۱۰ ولتاژ منبع تغذیه (E) و

افت ولتاژ دوسر مقاومت ها را به دست آورید.

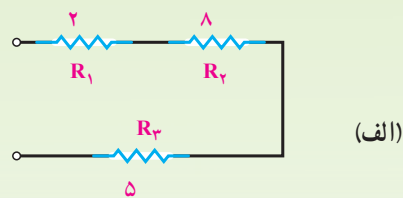


شکل ۱۵-۱۰

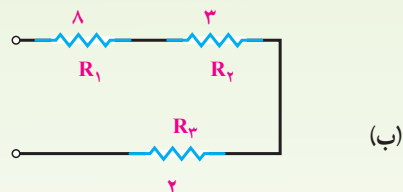
راه حل: به کمک قانون اهم در مورد هر مقاومت می توان

راه حل:

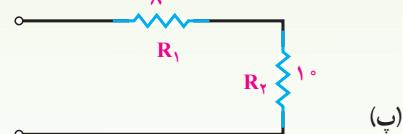
مدار شکل پ دارای مقاومت معادل بزرگ تری است.



مقاومت معادل شکل (الف)  $R_T = 2 + 8 + 5 = 15$



مقاومت معادل شکل (ب)  $R_T = 8 + 3 + 2 = 13$

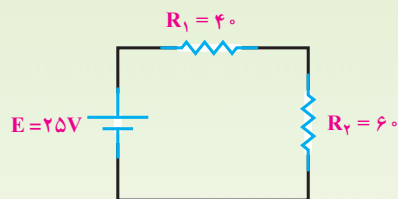


مقاومت معادل شکل (پ)  $R_T = 8 + 10 = 18$

شکل ۱۲-۱۰

مثال ۳: در مدار شکل ۱۳-۱۰ شدت جریان را حساب

کنید.



شکل ۱۳-۱۰

راه حل: ابتدا مقدار مقاومت کل  $(R_T)$  را با استفاده از

رابطه مقاومت معادل سری به دست می آوریم.

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R_2 \\ &= 40\Omega + 60\Omega \\ &= 100\Omega \end{aligned}$$

نوشت :

$$U_1 = IR_1 = (1 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3) = 1V$$

$$U_2 = IR_2 = (1 \times 10^{-3} \times 1/5 \times 10^3) = 1/5V$$

$$U_3 = IR_3 = (1 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^3) = 5V$$

اکنون مقدار ولتاژ منبع تغذیه را حساب می‌کنیم.

$$E = U_1 + U_2 + U_3$$

$$E = 1 + 1/5 + 5 \quad E = 7/5V$$

**نتیجه: مجموع افت ولتاژهای دوسر مقاومت‌ها با ولتاژ منبع تغذیه برابر است.**

ولتاژی که در دوسر هر لامپ افت می‌کند.

$$U = \frac{E}{n} = \frac{12V}{40} = 0/3V$$

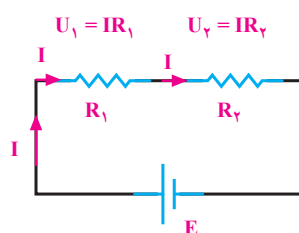
و جریان هر لامپ از قانون اهم بدست می‌آید.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{0/3}{20} = 0/015A = 15mA$$

شدت جریان عبوری از لامپ‌ها ۱۵ میلی‌آمپر که از جریان ۰/۳ آمپر هر لامپ کمتر و افت ولتاژ دوسر هر لامپ ۰/۳ ولت است که از ولتاژ مورد نیاز هر لامپ یعنی ۶ ولت کم‌تر است. بنابراین، روشنایی لامپ‌ها در حدی نیست که بتوان آن را دید. پس به نظر می‌رسد که لامپ‌ها روشن نیستند.

## ۶-۱۰- تقسیم ولتاژ بین دو مقاومت سری

می‌دانیم که در یک مدار سری، ولتاژ کل به نسبت مستقیم بین مقاومت‌های مدار تقسیم می‌شود؛ یعنی، هرچه مقدار مقاومت کم‌تر باشد، افت ولتاژ دوسر آن کوچک‌تر و هرچه مقدار مقاومت زیادتر باشد، افت ولتاژ دوسر آن بزرگ‌تر است. برای محاسبه‌ی افت ولتاژ در مقاومت‌های یک مدار سری، مدار شکل ۱۰-۱۷ را در نظر می‌گیریم.



شکل ۱۰-۱۷

ولتاژ دوسر  $R_1$  برابر است با جریان در مقاومت

$$U_1 = IR_1 \quad (1)$$

جریان کل مدار برابر است با :

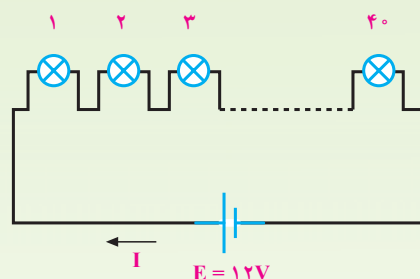
$$I = \frac{E}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

رابطه‌ی ۲ را در رابطه‌ی ۱ قرار می‌دهیم :

$$U_1 = \frac{E}{R_1 + R_2} \times R_1$$

اکنون  $U_1$  را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۳ نوشت :

مثال ۶: تعداد ۴۰ لامپ مشابه ۶ ولت ۰/۳ آمپری را مطابق شکل ۱۰-۱۶ به طور سری به منبع ولتاژ ۱۲ ولتی اتصال داده‌ایم. لامپ‌ها روشن نمی‌شوند. با توجه به این که همه‌ی آن‌ها سالم و اتصالات نیز سالم هستند، علت را شرح دهید.



شکل ۱۰-۱۶

راه حل:

برای حل کردن مثال فوق می‌توانید از قانون اهم استفاده کنید.

مقاومت هر لامپ  $R$

$$R = \frac{U}{I} \text{ قانون اهم}$$

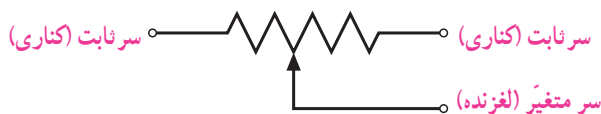
$$= \frac{6V}{0/3} = 20$$

چون لامپ‌ها مشابه یک‌دیگرند، پس ولتاژ منبع به طور

مساوی روی آن‌ها تقسیم می‌شود؛ یعنی :

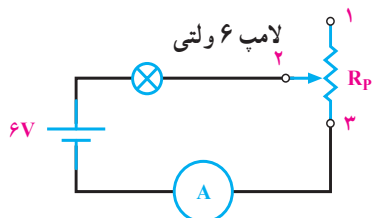
## ۸-۱- رُوستا و پتانسیومتر

قبلاً برای تقسیم ولتاژ، از مقاومت‌های ثابت استفاده کردیم. در نتیجه، ولتاژهای ثابتی نیز می‌توانستیم تهیه کنیم اما در عمل بیش‌تر از مقاومت‌های متغیر استفاده می‌شود، که به وسیله‌ی این مقاومت‌های متغیر می‌توان ولتاژهای متغیری از حداقل تا حداکثر ولتاژ منبع به‌دست آورد که از جمله‌ی آن‌ها مقاومت‌های متغیر رُوستا و پتانسیومتر را می‌توان نام برد. شکل ۱۹-۱۰ نمای الکتریکی یک مقاومت متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹-۱۰- نمای الکتریکی مقاومت متغیر

سر لغزنده یا متغیر سری است که می‌تواند روی سطح خارجی مقاومت حرکت کند و مقدار مقاومت را نسبت به سرهای ثابت تغییر دهد. اگر از دوسر مقاومت متغیر (یک سر ثابت و یک سر لغزنده) در مدار استفاده شود، مقاومت متغیر به‌صورت رُوستا در مدار قرار می‌گیرد. با حرکت سر لغزنده، مقدار مقاومت رُوستا و در نتیجه، مقاومت مدار تغییر می‌کند. با تغییر مقاومت مدار، شدت جریان مدار نیز تغییر می‌کند. رُوستا برای کنترل شدت جریان مدار به‌کار می‌رود و در مدار به‌صورت سری بسته می‌شود. شکل ۲۰-۱۰ اتصال رُوستا را در مدار نشان می‌دهد.



شکل ۲۰-۱۰- اتصال رُوستا در مدار

با تغییر سر لغزنده از نقطه‌ی ۱ به ۲ و ۳ مقاومت مدار کاهش می‌یابد. با کاهش مقاومت مدار جریان آن افزایش می‌یابد و روشنایی لامپ بیش‌تر می‌شود. در نقطه‌ی ۳ مقاومت مدار حداقل و شدت جریان حداکثر مقدار خود را دارد؛ در نتیجه

$$U_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

رابطه‌ی ۳ ولتاژ دوسر مقاومت  $R_1$  را نسبت به ولتاژ کل در مدار سری مشخص می‌کند.

هم‌چنین، به روش مشابه مقدار ولتاژ دوسر  $R_2$  برابر است با:

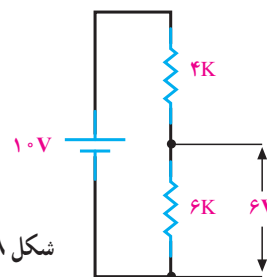
$$U_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

از مشاهده‌ی روابط ۳ و ۴ معلوم می‌شود که تقسیم ولتاژ روی مقاومت‌ها با مقادیر آن‌ها نسبت مستقیم دارد.

## ۷-۱- کاربرد سری بستن مقاومت‌ها

با توجه به مطالبی که تاکنون فرا گرفته‌اید نتیجه می‌شود که از اتصال سری مقاومت‌های اهمی؛ می‌توان در سرزمینه‌ی ساختن مقاومت معادل مورد نظر- کاهش جریان مدار و تقسیم ولتاژ استفاده کرد.

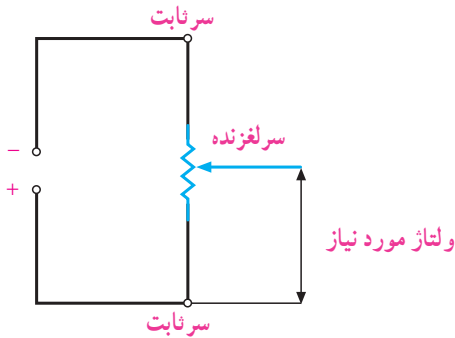
اگر بخواهیم از یک ولتاژ مشخص ولتاژ کم‌تری داشته باشیم، راه عملی آن است که با استفاده از دو مقاومت، افت ولتاژ لازم را تهیه کنیم و مورد استفاده قرار دهیم؛ مثلاً از ولتاژ ۱۰ ولت، ۶ ولت آن مورد نیاز است. برای تأمین این ولتاژ، منبع ۱۰ ولتی را با دو مقاومت ۴ و ۶ کیلو اهمی سری می‌کنیم (شکل ۱۸-۱۰). سپس از افت ولتاژ روی مقاومت ۶ کیلو اهمی می‌توانیم برای منظور خاص استفاده نماییم. البته با قرار دادن یک مصرف‌کننده به دوسر مقاومت ۶ کیلو اهم، افت ولتاژ دوسر مقاومت‌ها تغییر می‌کند. به همین دلیل، معمولاً برای تأمین ولتاژهای مورد نیاز از مقاومت‌های متغیر استفاده می‌شود که در ادامه درباره‌ی انواع آن‌ها توضیح خواهیم داد.



شکل ۱۸-۱۰- تقسیم ولتاژ

متغیری را دریافت کرد.

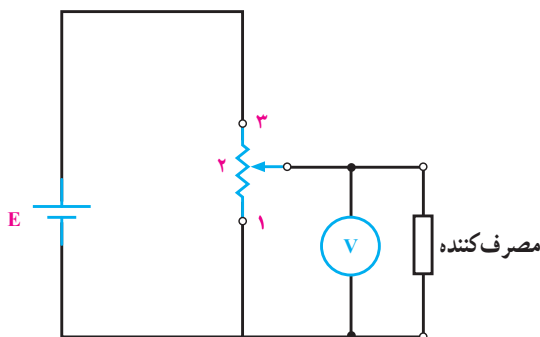
پتانسیومتر را برای دریافت ولتاژی کم تر از ولتاژ منبع به کار می برند. شکل ۲۲-۱۰ اتصال پتانسیومتر را به مدار نشان می دهد.



شکل ۲۲-۱۰ اتصال پتانسیومتر در مدار

با وصل کردن ولتاژ منبع به دوسر مقاومت متغیر (پتانسیومتر)، و تنظیم سر لغزنده ولتاژ مورد نیاز را از سر ثابت و سر لغزنده دریافت می کنیم.

پتانسیومتر در مدار به صورت موازی بسته می شود و کنترل کننده ی ولتاژ داده شده به مصرف کننده است.



شکل ۲۳-۱۰ دریافت ولتاژ متغیر

طبق شکل ۲۳-۱۰ با تغییر سر لغزنده از نقطه ی ۱ به ۲ و ۳ ولت متر ولتاژ بیش تری را نشان می دهد.

متناسب با ولتاژ مورد نیاز مصرف کننده، می توان سر لغزنده را در جهت مناسب حرکت داد.

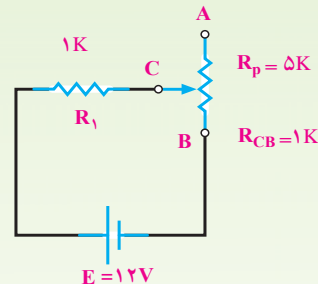
مثال ۸: در شکل ۲۴-۱۰ برای دریافت ولتاژ از ۶ تا ۲۴ ولت چه پتانسیومتری را در مدار قرار می دهید؟

روشنایی لامپ نیز حداکثر است. عکس این مطلب نیز صادق است. با حرکت سر لغزنده از نقطه ی ۳ به ۲ و ۱ مقاومت مدار افزایش و جریان کاهش می یابد. با کاهش شدت جریان از روشنایی لامپ کاسته می شود.

مثال ۷: شدت جریان مدار شکل ۲۱-۱۰ را در حالت های زیر به دست آورید.

۱- سر لغزنده در نقطه ی A قرار دارد.

۲- سر لغزنده در نقطه ی C قرار دارد.



شکل ۲۱-۱۰

راه حل:

حالت ۱  $R_T = R_1 + R_P = 1k\Omega + 5k\Omega = 6k$

$$I = \frac{12V}{6 \times 10^3} = 2mA$$

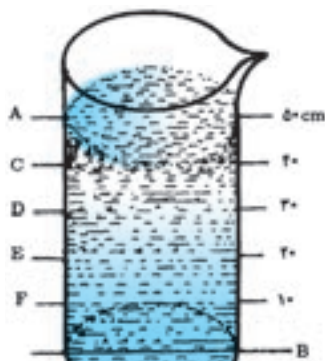
حالت ۲  $R_T = R_1 + R_{CB} = 1k\Omega + 1k\Omega = 2k$

$$I = \frac{12V}{2 \times 10^3} = 6mA$$

از مثال فوق مشخص می شود که مقاومت مدار در حالت ۱ برابر ۶k و شدت جریان ۲mA است. در حالت ۲ مقاومت مدار کاهش یافته و به ۲k رسیده است؛ در نتیجه، شدت جریان افزایش می یابد و به ۶mA می رسد. بنابراین، با قرار گرفتن یک رئوسا به طور سری در مدار، شدت جریان کنترل می شود.

اگر از هر سه سر مقاومت متغیر (دوسر ثابت و یک سر لغزنده) در مدار استفاده شود، مقاومت متغیر به صورت پتانسیومتر در مدار قرار می گیرد. با حرکت سر لغزنده، مقدار مقاومت آن نسبت به سرهای ثابت تغییر می کند. با قراردادن ولتاژی به دوسر ثابت می توان از سر لغزنده و یکی از سرهای کناری، ولتاژهای

اندیس برای ارتفاع (h) بنویسیم، برای به دست آوردن فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی A تا E چنین عمل می‌کنیم :



ته ظرف (مینا)

شکل ۲۵-۱- نسبی بودن ارتفاع آب

$$h_{AE} = h_{AB} - h_{EB}$$

$$h_{AB} = 5^{\circ}\text{cm} \text{ ارتفاع آب از نقطه‌ی A تا ته ظرف}$$

$$h_{EB} = 2^{\circ}\text{cm} \text{ ارتفاع آب از نقطه‌ی E تا ته ظرف}$$

$$h_{AE} = 5^{\circ}\text{cm} - 2^{\circ}\text{cm}$$

$$h_{AE} = 3^{\circ}\text{cm} \text{ ارتفاع AE}$$

مثلاً ارتفاع نقطه‌ی D تا ته ظرف چه قدر است؟

$$h_{DB} = h_{DB} - h_{BB}$$

$$h_{DB} = 3^{\circ}\text{cm} - 0^{\circ}$$

$$h_{DB} = 3^{\circ}\text{cm}$$

برای خلاصه کردن رابطه‌ی تعیین ارتفاع، معمولاً حرف

مینا را نمی‌نویسند اما در محاسبه، آن را در نظر می‌گیرند؛ مثلاً

$h_{AD}$  برابر است با :

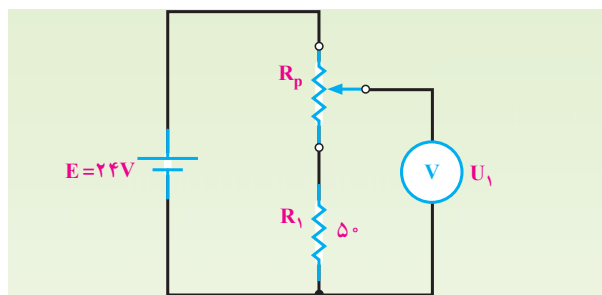
$$h_{AD} = h_A - h_D$$

که  $h_A$  یعنی ارتفاع سطح نقطه‌ی A تا ته ظرف (مینا) و  $h_D$  نیز به همین صورت ارتفاع سطح نقطه‌ی D تا ته ظرف است. اکنون با توجه به این توضیحات داریم :

$$h_A = h_{AB} = 5^{\circ}\text{cm} \text{ ارتفاع آب تا نقطه‌ی A}$$

$$h_D = h_{DB} = 3^{\circ}\text{cm} \text{ ارتفاع آب تا نقطه‌ی D}$$

$$h_{AD} = 5^{\circ}\text{cm} - 3^{\circ}\text{cm}$$



شکل ۲۴-۱

راه حل:

$$U_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_P}$$

$$U_1(R_1 + R_P) = ER_1 \Rightarrow U_1 R_1 + U_1 R_P = ER_1$$

$$U_1 R_P = ER_1 - U_1 R_1$$

$$R_P = \frac{R_1(E - U_1)}{U_1}$$

$$R_P = 5^{\circ} \times \frac{(24 - 6)}{6} = \frac{5^{\circ} \times 18}{6} = 15^{\circ}$$

## ۹-۱- کاربرد مقاومت‌های متغیر

شدت صدای رادیو و فرستنده‌ها و گیرنده‌های دیگر و نیز روشنایی تصویر تلویزیون به کمک ولوم‌هایی که در جلوی دستگاه تعبیه شده است، کم و زیاد می‌شود. این ولوم‌ها چیزی جز مقاومت‌های متغیر نیستند که به صورت رئوسا و پتانسیومتر در مدار قرار گرفته‌اند.

## ۱۰-۱- نسبی بودن ولتاژ الکتریکی

استوانه‌ی مدرج پر از آب شکل ۲۵-۱ را در نظر بگیرید.

ارتفاع سطح آب را می‌توان نسبت به هر نقطه‌ای از ستون آب در لوله‌ی مدرج به دست آورد. فرض کنید می‌خواهیم ارتفاع سطح آب را از نقطه‌ی A تا نقطه‌ی E به دست آوریم. برای این کار می‌توانیم درجات بین دو نقطه‌ی A و E را ببینیم یا آن که ارتفاع آب را از نقطه‌ی A تا B (ته ظرف) و ارتفاع نقطه‌ی E تا ته ظرف را بخوانیم و از یک‌دیگر کم کنیم؛ در هر دو صورت به یک جواب می‌رسیم. بنابراین، اگر علامت ارتفاع را h در نظر بگیریم و نقاطی را که می‌خواهیم ارتفاع بین آن‌ها مشخص شود به صورت

$$h_{AD} = 2 \text{ cm}$$

در مورد تعیین ارتفاع آب در پشت سدها نیز همین روش به کار می‌رود؛ مثلاً وقتی می‌گویند ارتفاع سطح آب تا تاج سد ۵ متر است، یعنی تفاوت بین ارتفاع سطح آب تا کف سد و ارتفاع بالاترین نقطه‌ی سد تا کف دریاچه‌ی سد ۵ متر است. در شکل ۲۶-۱ ارتفاع آب تا تاج سد به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۲۶-۱- سد کرج

از مطالب گفته شده چنین برمی‌آید که کمیت ارتفاع نسبی است؛ یعنی، باید آن را نسبت به یک مبنا سنجید. کمیت ولتاژ را نیز معمولاً نسبت به یک مبنا می‌سنجند؛ مثلاً وقتی گفته می‌شود ولتاژ نقطه‌ی A مقداری را داراست، این گفته ناقص است. در واقع، شنونده وقتی مقدار ولتاژ نقطه‌ی A را می‌شنود، منتظر است که گفته شود نسبت به کجا این مقدار را دارد اما وقتی گفته می‌شود «ولتاژ دوسر مقاومت» جمله کاملاً درست و بجاست؛ زیرا ولتاژ یک سر مقاومت نسبت به سر دیگر آن مورد نظر است یا این که اگر گفته شود «ولتاژ منبع» بیان درستی است؛ زیرا ولتاژ یک طرف منبع نسبت به سر دیگر منبع مورد نظر بوده است. بنابراین، در حالت کلی همان گونه که ارتفاع آب داخل لوله یا پشت سد را نسبت به ته ظرف یا سطح زمین می‌سنجند، کمیت ولتاژ را هم نسبت به یک مبنا - که می‌تواند در هر نقطه‌ای از مدار انتخاب شود - بیان می‌کنند.

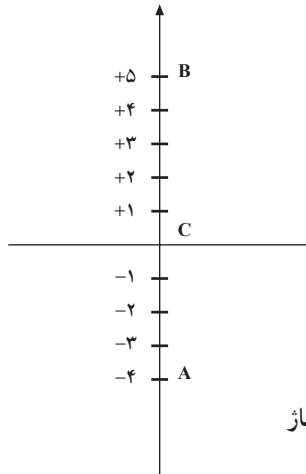
مثلاً اگر ولتاژ نقطه‌ی A مطابق شکل ۲۷-۱ نسبت به مبنای C برابر ۴- ولت و ولتاژ نقطه‌ی B نسبت به همان مبنا

(نقطه‌ی C) دارای ولتاژ ۵+ ولت باشد، اختلاف ولتاژ نقطه‌ی A نسبت به نقطه‌ی B - که با  $U_{AB}$  نمایش داده می‌شود - برابر است با  $U_{AC} - U_{BC}$ . در نتیجه:

$$U_{AC} = -4V \quad \text{ولتاژ A نسبت به C}$$

$$U_{BC} = +5V \quad \text{ولتاژ B نسبت به C}$$

$$U_{AB} = U_A - U_B \quad \text{ولتاژ A نسبت به B}$$



شکل ۲۷-۱- نسبی بودن ولتاژ

$$U_{AB} = -4V - (+5V)$$

$$U_{AB} = -9V$$

هم چنین ولتاژ نقطه‌ی B نسبت به A برابر است با:

$$U_{BA} = U_B - U_A$$

$$U_{BA} = +5V - (-4V)$$

$$U_{BA} = +9V$$

$$U_{AB} = -U_{BA} \quad \text{نتیجه:}$$

یا

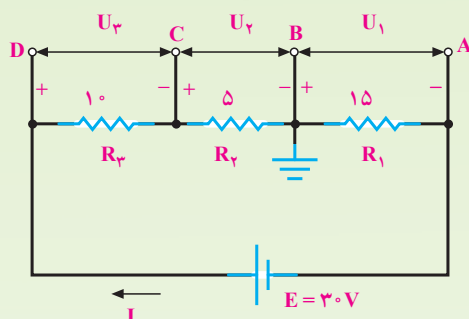
$$U_{BA} = -U_{AB}$$

**مثال ۹:** در مدار شکل ۲۸-۱ با تساوی مقاومت‌ها اختلاف ولتاژ نقاط A، B، C و D را نسبت به مبنای E به دست آورید. به کمک اختلاف ولتاژهای به دست آمده مقادیر  $U_{AB}$  و  $U_{AC}$  را نیز به دست آورید.

۱- بالاترین نقطه‌ی سد را از نظر ارتفاع، تاج سد گویند.

$$U_{AB} = U_A - U_B = 20 - 15 = +5V$$

مثال ۱۰: در مدار شکل ۲۹-۱۰ پتانسیل نقاط A، C و D را نسبت به نقطه‌ی اتصال مشترک (B) به دست آورید.



شکل ۲۹-۱۰

راه حل: مقاومت معادل برابر است با:

$$R_T = 10 + 5 + 15 = 30$$

شدت جریان کل با استفاده از قانون اهم:

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{30}{30} = 1A$$

$$U_1 = IR_1 = (1)(15) = 15V \quad \text{افت ولتاژ روی } R_1$$

$$U_2 = IR_2 = (1)(5) = 5V \quad \text{افت ولتاژ روی } R_2$$

$$U_3 = IR_3 = (1)(10) = 10V \quad \text{افت ولتاژ روی } R_3$$

با توجه به جهت جریان در شکل داریم:

$$U_1 = U_B - U_A = U_{BA} = 15V \quad \text{و چون } U_1 \text{ مثبت است،}$$

نتیجه می گیریم که  $U_B > U_A$  است. از طرف دیگر، چون نقطه‌ی

B مبناست، پس  $U_B = 0$  می باشد. حال اگر مقادیر  $U_1$  و  $U_2$

را در رابطه‌ی بالا قرار دهیم، خواهیم داشت  $15 = 0 - U_A$  یا

به عبارت دیگر:  $U_A = -15V$ . منفی شدن  $U_A$  بدین معناست

که پتانسیل نقطه‌ی A به اندازه‌ی ۱۵ ولت از پتانسیل نقطه‌ی مبنا

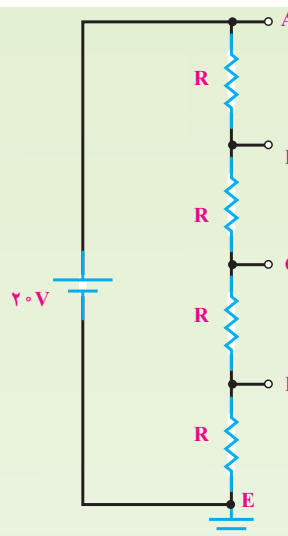
یعنی B - کم تر است.

$$U_{AB} = U_A - U_B = -15 - 0 = -15V$$

$$U_{CB} = U_C - U_B = +5 - 0 = +5V$$

$$U_D = U_3 + U_2 = 10 + 5 = 15V$$

$$U_{DB} = U_D - U_B = +15 - 0 = +15V$$



شکل ۲۸-۱۰ ولتاژ نقاط مختلف، نسبت به نقطه‌ی مبنا

راه حل: ولتاژ نقطه‌ی A نسبت به E برابر است با ولتاژ

نقطه‌ی A منهای ولتاژ نقطه‌ی E؛ یعنی:

$$U_{AE} = U_A - U_E$$

$$U_{AE} = +20V - 0 = +20V$$

با توجه به این که مقاومت‌های موجود در مدار با یک دیگر

برابرند و جریان آن‌ها نیز برابر است، پس اختلاف پتانسیل دوسر

آن‌ها نیز باهم برابر است و می توان گفت ولتاژ منبع به طور مساوی

بین آن‌ها تقسیم می شود و ولتاژ دوسر هر مقاومت برابر

$$U_R = \frac{20V}{4} = 5V \quad \text{خواهد شد.}$$

اکنون می توان پتانسیل نقطه‌ی C، D و B را نسبت به

نقطه‌ی E - که نقطه‌ی مبناست - به صورت زیر به دست آورد.

$$U_{BE} = U_B - U_E = 15 - 0 = 15V$$

$$U_{CE} = U_C - U_E = 10 - 0 = 10V$$

$$U_{DE} = U_D - U_E = 5 - 0 = +5V$$

اختلاف پتانسیل نقاط دیگر را نیز می توان از روابط زیر

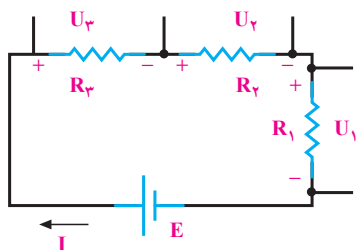
به دست آورد.

$$U_{AD} = U_A - U_D = +20 - 5 = +15V$$

$$U_{AC} = U_A - U_C = 20 - 10 = +10V$$

$$E - (U_1 + U_2 + U_3) = 0$$

$$E = U_1 + U_2 + U_3 \quad \text{یا}$$



شکل ۱۰-۳۱

مثال ۱۲: قانون ولتاژهای کیرشهف را در مدار شکل

۱۰-۳۲ بررسی کنید.

راه حل: جریان کل در مدار زیر (حلقه‌ی بسته) برابر

$$\text{است با: } I = \frac{E}{R_T}$$

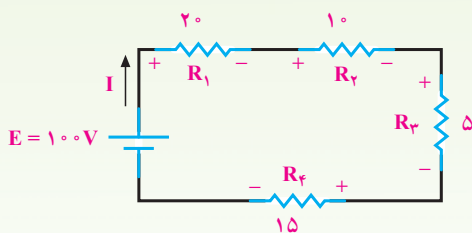
مقاومت معادل برابر است با:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_T = 20 + 10 + 5 + 15$$

$$R_T = 50$$

$$I = \frac{100}{50} = 2A$$



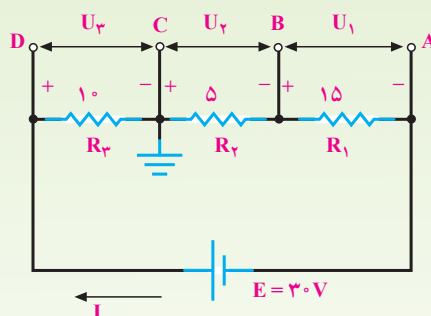
شکل ۱۰-۳۲

افت ولتاژ دوسر  $R_1$  با استفاده از قانون اهم:

$$U_{R_1} = (2)(20) = 40V$$

مثال ۱۱: با تغییر نقطه‌ی مبنا از نقطه‌ی B به نقطه‌ی C

ولتاژ نقاط A، B و D نسبت به نقطه‌ی C در شکل ۱۰-۳۰ کدام است؟



شکل ۱۰-۳۰

$$\text{راه حل: } U_{AC} = -U_1 - U_2 = -15 - 5 = -20V$$

$$U_{BC} = -U_2 = -5V$$

$$U_{DC} = U_3 = 10V$$

## ۱۱-۱۰- قانون ولتاژهای کیرشهف (KVL)

رابطه‌ی بین ولتاژهای جزء (افت ولتاژها) و ولتاژ کل را

در مدار سری متذکر شدیم. اکنون تقسیم ولتاژ در مدار سری را به گونه‌ای دیگر بیان می‌کنیم.

هر مدار سری شامل تعدادی مصرف کننده (مقاومت) و

یک منبع تغذیه است که به صورت یک حلقه<sup>۱</sup> باهم سری شده‌اند.

قانون ولتاژهای کیرشهف: در هر حلقه جمع جبری افت

ولتاژهای دوسر مقاومت‌ها و ولتاژ منبع تغذیه برابر صفر است:

$$\text{یعنی: } E - \sum U = 0$$

در هر مدار بسته، ولتاژ اعمال شده به مدار برابر مجموع

افت ولتاژهای موجود در مدار حلقه است ( $E = \sum U$ )

یعنی، با توجه به شکل ۱۰-۳۱ می‌توان نوشت:

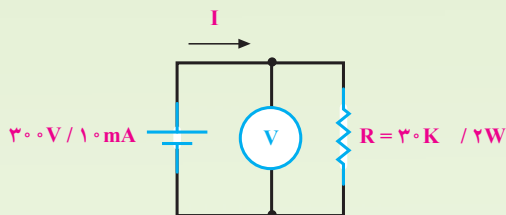
$$E - \sum U = 0$$

۱- K.V.L = Kirchhoff's Voltage Law

۲- اگر از یک نقطه از مداری در جهت دلخواه گردش کنیم و در یک چرخش کامل به همان نقطه‌ی شروع برسیم، به آن یک حلقه گویند.

۳-  $\sum$  یعنی جمع جبری، پس  $\sum U$  به معنای جمع جبری ولتاژهاست.

مثال ۱۳: توانی که یک منبع تغذیه با مشخصات  $300\text{V}/10\text{mA}$  می‌تواند تولید کند، چه قدر است؟ اگر این منبع را مطابق شکل ۱۰-۳۳ به یک مقاومت  $30\text{k}/2\text{W}$  متصل کنیم، چه اتفاقی می‌افتد؟



شکل ۱۰-۳۳

راه حل:  $P_t = E \cdot I$

$$P_t = 300 \times 10 \times 10^{-3}$$

توانی که منبع می‌تواند تولید کند  $P_t = 3\text{W}$

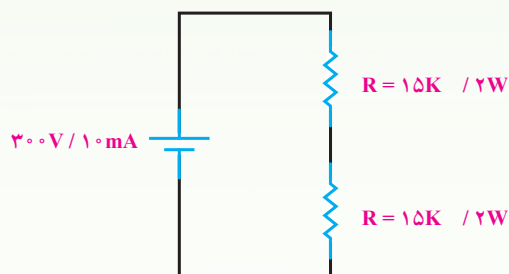
$$I = \frac{E}{R}$$

$$I = \frac{300\text{V}}{30\text{k}} = 10\text{mA}$$

$$P_R = U_R \cdot I = 300 \times 10 \times 10^{-3}$$

توان مصرف شده در مقاومت  $P_R = 3\text{W}$

چون توان مجاز مقاومت بیش از ۲ وات نیست و اکنون ۳ وات مصرف می‌کند، مقاومت گرم می‌شود و می‌سوزد. اگر دو مقاومت  $15\text{k}/2\text{W}$  را با همان منبع تغذیه سری کنیم (شکل ۱۰-۳۴)، توان مصرفی هر مقاومت  $1/5$  وات می‌شود که از توان مجاز آن کم‌تر است. در نتیجه، برای مقاومت‌ها مسئله‌ای پیش نمی‌آید.



شکل ۱۰-۳۴

ولتاژهای دوسر  $R_2$  و  $R_3$  و  $R_4$  نیز با همین روش محاسبه می‌شود:

$$U_{R_2} = (2)(10) = 20\text{V}$$

$$U_{R_3} = (2)(5) = 10\text{V}$$

$$U_{R_4} = (2)(15) = 30\text{V}$$

قانون ولتاژهای کیرشهف در این‌باره می‌گوید که

$$\sum U = E \quad \text{یعنی:}$$

$$E = U_{R_1} + U_{R_2} + U_{R_3} + U_{R_4}$$

$$100 = 40 + 20 + 10 + 30$$

$$100 = 100$$

یا

$$E - U_{R_1} - U_{R_2} - U_{R_3} - U_{R_4} = 0$$

$$100 - 40 - 20 - 10 - 30 = 0$$

$$100 - 100 = 0$$

## ۱۲-۱۰- توان مصرفی در مدار سری

توان کل در یک مدار سری یا توانی که توسط مقاومت‌های مدار مصرف می‌شود، از مجموع توان‌های مصرف شده‌ی هریک از مقاومت‌ها به‌دست می‌آید. اگر مداری شامل  $n$  مقاومت سری باشد، توان کل برابر است با:

$$P_t = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

برای محاسبه‌ی توان تک‌تک مقاومت‌ها (توان‌های جزء)

باید از یکی از روابط توان  $(P = RI^2 = \frac{V^2}{R} = VI)$  کمک

بگیریم.

توضیح: هرگاه در یک مدار سری فقط محاسبه توان کل

در نظر باشد مقدار آن را بر پایه روابط توان به صورت زیر نیز می‌توان به‌دست آورد.

$$P_T = U_T \cdot I_T = R_T \cdot I_T^2 = \frac{U_T^2}{R_T}$$

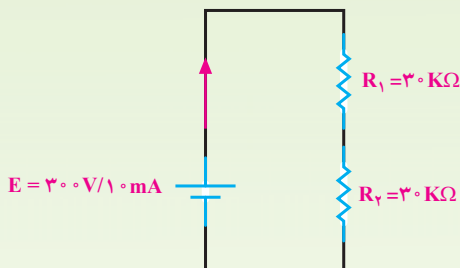
$$P_3 = U_3 I$$

$$P_3 = 100 \times 10 \times 10^{-3} = 1W \quad R_3 \text{ توان مصرفی}$$

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 = 1 + 1 + 1 = 3W$$

نتیجه: توان تولید شده توسط منبع، برابر مجموع توان‌های مصرف شده در اجزای مدار است.

مثال ۱۴: دو مقاومت  $2W / 3k$  را به صورت سری به منبع تغذیه  $300V / 10mA$  وصل می‌کنیم. توان مصرفی هر مقاومت و توان تولید شده توسط منبع تغذیه را حساب کنید. ابتدا صورت مسأله را به شکل زیر تبدیل می‌کنیم.



شکل ۳۶-۱۰

راه حل:

$$R_t = R_1 + R_2 = 30 + 30 = 60k$$

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{300V}{60k} = 5mA$$

$$U_{R_1} = U_{R_2} = \frac{300}{2} = 150V$$

$$P_{R_1} = P_{R_2} = U_{R_1} \cdot I = U_{R_2} \cdot I$$

$$= 150V \times 5mA = 750mW \text{ توان مصرفی هر مقاومت}$$

$$P_t = P_{R_1} + P_{R_2} = 750 + 750$$

$$= 1500mW = 1.5W \text{ توان تولیدشده توسط منبع}$$

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{300V}{15k + 15k} = 10mA ,$$

$$U_{R_1} = U_{R_2} = \frac{300}{2} = 150V$$

$$P_{R_1} = U_{R_1} \cdot I$$

$$P_{R_1} = 150 \times 10 \times 10^{-3} = 1.5W$$

$$P_{R_2} = U_{R_2} \cdot I$$

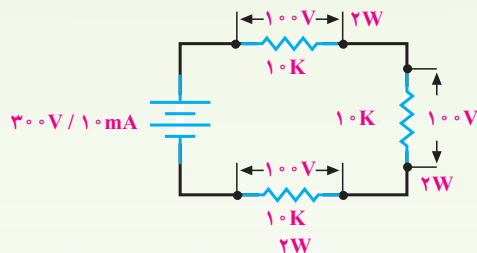
$$P_{R_2} = 150 \times 10 \times 10^{-3} = 1.5W$$

از طرفی، توان تولید شده توسط منبع، برابر مجموع توان‌های مصرف شده در مقاومت‌هاست؛ یعنی:

$$P_t = P_{R_1} + P_{R_2}$$

$$P_t = 1.5 + 1.5 = 3W$$

برای کسب اطمینان از گرم نشدن مقاومت‌ها، سه مقاومت  $2W / 10k$  را به صورت سری به همان منبع تغذیه اتصال می‌دهیم. توان مصرفی هر مقاومت یک وات می‌شود که از توان مجاز آن بسیار کم‌تر است (شکل ۳۵-۱۰) در این‌جا نیز توان منبع، با مجموع توان‌های جزء برابر خواهد بود.



شکل ۳۵-۱۰

$$P_t = E \cdot I$$

$$P_t = 300 \times 10 \times 10^{-3} = 3W \quad \text{توان کل}$$

$$P_1 = U_1 I$$

$$P_1 = 100 \times 10 \times 10^{-3} = 1W \quad R_1 \text{ توان مصرفی}$$

$$P_2 = U_2 I$$

$$P_2 = 100 \times 10 \times 10^{-3} = 1W \quad R_2 \text{ توان مصرفی}$$

### ۱۳-۱- مشخصات مدار سری

۱- شدت جریان در تمام نقاط مدار یکسان و برابر

$$\frac{U_T}{R_T} \text{ است.}$$

$$I_T = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

۲- مقاومت کل (معادل) از جمع مقاومت‌های جزء مدار

حاصل می‌شود و برابر است با

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

۳- ولتاژ کل از جمع افت ولتاژهای جزء مدار به دست

$$E = U_1 + U_2 + \dots + U_n \text{ می‌آید.}$$

۴- افت ولتاژ دوسر مقاومت‌های جزء با مقدار

مقاومت‌های مدار نسبت مستقیم دارد.

$$U_1 = E \frac{R_1}{R_T}, U_2 = E \frac{R_2}{R_T}, U_n = E \frac{R_n}{R_T}$$

۵- توان کل با جمع توان‌های جزء مدار برابر است.

$$P_t = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

۶- مقدار مقاومت کل (معادل) از بزرگترین مقاومت مدار

نیز بزرگ‌تر است.

۷- قطع (باز) شدن مدار در یک نقطه باعث قطع جریان

کل مدار می‌شود.



۱- یک مدار سری مقاومتی چگونه تشکیل می‌شود؟

۲- خصوصیات مدار سری را توضیح دهید.

۳- ولتاژ کل در مدار سری بین مقدار مقاومت‌ها به چه نسبتی تقسیم می‌شود؟

۴- چگونگی استفاده از رئوستا و پتانسیومتر را در مدار شرح دهید.

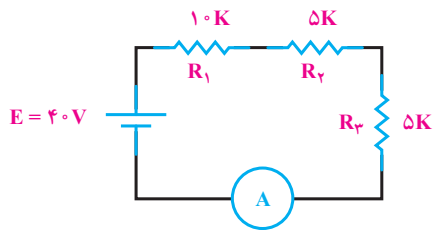
۵- نسبی بودن پتانسیل را توضیح دهید.

۶- قانون ولتاژهای کیرشهف را تعریف کنید و کاربرد آن را در مدار سری شرح دهید.

۷- توان مصرفی و توان مجاز را تعریف کنید.

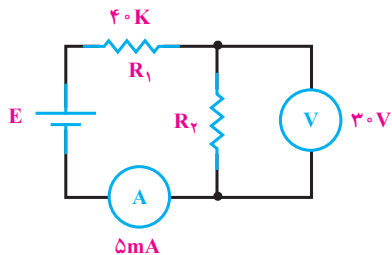
۸- آیا توانی که یک مولد قادر به تولید آن است، می‌تواند از توانی که یک یا چند مصرف‌کننده مصرف

می‌کنند، بیش‌تر یا کم‌تر باشد؟ در این صورت چه اتفاقی می‌افتد؟ (مثال بزنید).



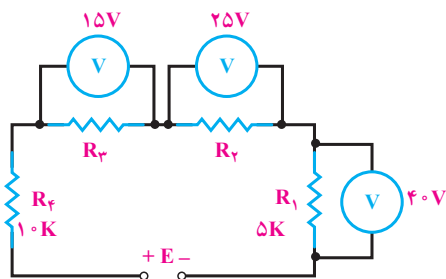
شکل ۱۰-۳۷

۱- در مدار شکل ۱۰-۳۷ مقدار مقاومت کل و جریان مدار چه قدر است؟  
(جواب:  $20k - 2mA$ )



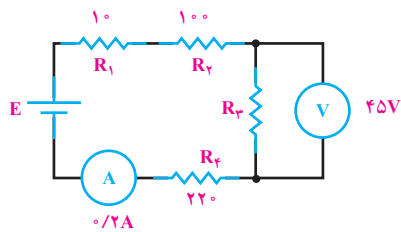
شکل ۱۰-۳۸

۲- در مدار شکل ۱۰-۳۸ مقدار E و  $R_2$  چه قدر است؟  
(جواب:  $6k$  و  $230V$ )



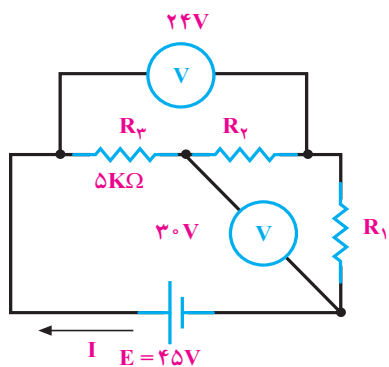
شکل ۱۰-۳۹

۳- در مدار شکل ۱۰-۳۹ مقدار E چه قدر است؟  
(جواب:  $160V$ )



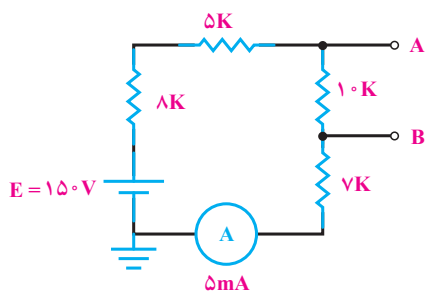
شکل ۱۰-۴۰

۴- مقاومت معادل مدار شکل ۱۰-۴۰ چه قدر است؟  
(جواب:  $555$ )



شکل ۱۰-۴۱

۵- در مدار شکل ۱۰-۴۱  
مطلوبست محاسبه شدت جریان کل و  
مقدار مقاومت های  $R_1$  و  $R_2$  چه قدر  
است؟  
(جواب:  $3\text{ mA}$ ،  $7$  و  $3$ )



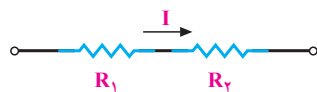
شکل ۱۰-۴۲

۶- در مدار شکل ۱۰-۴۲ ولتاژ  
نقطه ی A و B نسبت به زمین چه قدر  
است؟ ولتاژ  $U_{BA}$  را نیز محاسبه کنید.  
(جواب:  $85\text{ V}$ ،  $+35$ ،  $-50$ )

۷- در مدارهای شکل ۱۰-۴۳ توان مصرفی کل و  $R_1$  را به دست آورید. در صورتی که توان مجاز  
مقاومت ها در شکل الف و ب  $5\text{ W}$  باشد، آیا مقاومت ها خواهند سوخت؟

(جواب الف -  $\frac{1}{4}\text{ W}$  و  $2$ )

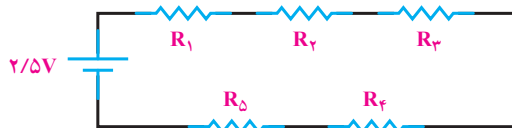
(جواب ب -  $1/25\text{ W}$  و  $5$ )



$$R_1 = R_2 = 1\Omega$$

$$I = \frac{1}{4}\text{ A}$$

(الف)



$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1\Omega$$

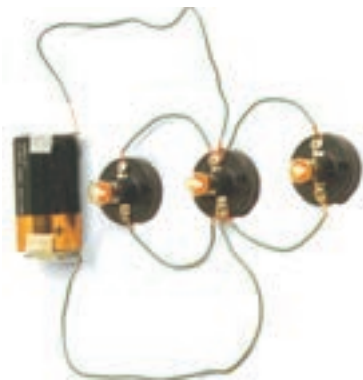
(ب)

شکل ۱۰-۴۳

## اتصال مقاومت ها به طور موازی

### هدف های رفتاری

- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می رود :
- ۱- اتصال موازی مقاومت ها را تعریف کند.
- ۲- مقاومت معادل مدار موازی را تعریف کند.
- ۳- مقاومت معادل چند مقاومت موازی را محاسبه کند.
- ۴- توزیع جریان را در مدار موازی شرح دهد.
- ۵- قانون جریان های کیرشهف را توضیح دهد.
- ۶- توان را در مدار موازی شرح دهد و آن را محاسبه کند.
- ۷- مشخصات و قوانین مدارهای موازی را نام ببرد.
- ۸- جریان ها را در مدار موازی محاسبه کند.
- ۹- مقاومت معادل را در مدار ترکیبی محاسبه کند.
- ۱۰- جریان ها و ولتاژها را در مدار ترکیبی محاسبه کند.



### ۱۱-۱- اتصال مقاومت ها به طور موازی

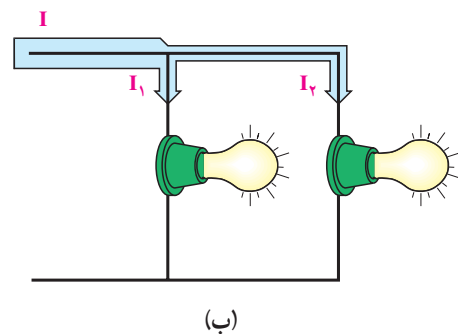
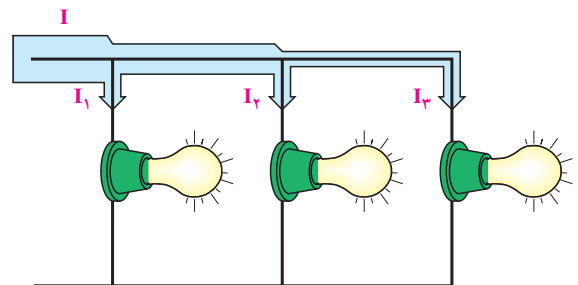
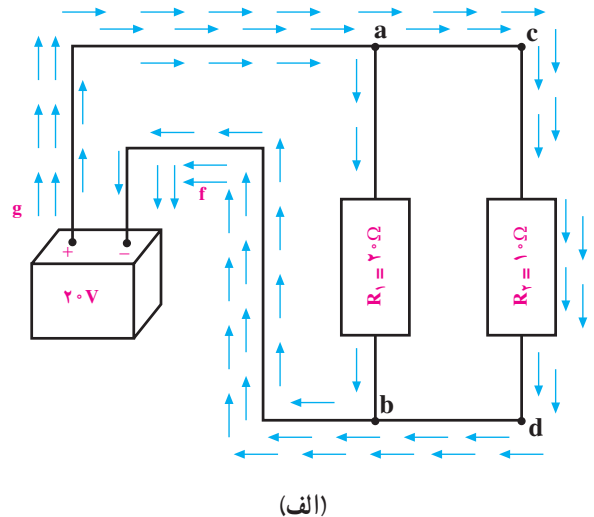
اگر بخواهند چند مصرف کننده با ولتاژ مساوی را هم زمان به یک منبع ولتاژ اتصال دهند، آن ها را به صورت موازی به دو سر منبع ولتاژ اتصال می دهند.

اتصال موازی بدین صورت است که یک طرف همه ی مصرف کننده ها به یک قطب منبع و طرف دیگر همه ی آن ها به قطب دیگر منبع وصل می شود (شکل ۱۱-۱).

شکل ۱۱-۱- اتصال لامپ ها به باتری به طور موازی

## ۱۱-۲- ولتاژ در مدار موازی

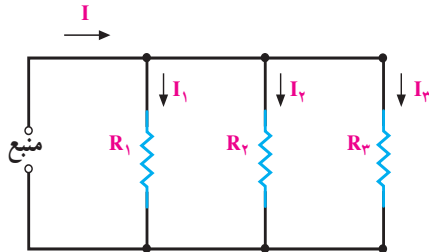
ولتاژ دو سر همه‌ی مصرف‌کننده‌ها در اتصال موازی، یکسان و برابر ولتاژ منبع تغذیه است ولی در صورت متفاوت بودن مقاومت آن‌ها جریان مصرف‌کننده‌ها متفاوت‌اند. در شکل ۱۱-۲ الف این موضوع نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۲- مسیرهای جریان و اندازه‌ی آن‌ها

## ۱۱-۳- جریان در مدار موازی

در مدار موازی، بیش از یک مسیر برای عبور جریان وجود دارد. هریک از مسیرهای موازی را **شاخه** می‌گویند. در شکل ۱۱-۱ چهار مسیر موازی را مشاهده می‌کنید که شمای فنی آن‌ها در شکل ۱۱-۳ رسم شده است.



شکل ۱۱-۳

در مدارهای شکل ۱۱-۳، شدت جریان کل، با مجموع شدت جریان‌های شاخه‌های موازی برابر است؛ در صورتی که ولتاژ دو سر هر شاخه با شاخه‌های دیگر و دو سر منبع برابر می‌باشد. از این رو با استفاده از روابط قانون اهم، شدت جریان هر شاخه و شدت جریان کل را می‌توان به صورت زیر به دست آورد.

$$I_n = \frac{E}{R_n} \quad \leftarrow \text{شدت جریان شاخه‌ی } n\text{ام}$$

$$I_t = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad \leftarrow \text{شدت جریان کل مدار}$$

در صورت مساوی بودن مقاومت‌های شاخه‌های مدار، از هر شاخه شدت جریان مساوی با دیگر شاخه‌ها می‌گذرد اما اگر مقدار مقاومت‌های هر شاخه متفاوت باشد، هر شاخه‌ای که مقاومت کم‌تری دارد، شدت جریان بیش‌تری را عبور می‌دهد.

**نتیجه:** مقدار جریان عبوری از هر شاخه در مدار موازی نسبت عکس با مقدار مقاومت آن شاخه دارد.

این حالت در روابط زیر نشان داده شده است.

$$I \uparrow = \frac{E}{R \downarrow} \quad \text{یا} \quad I \downarrow = \frac{E}{R \uparrow}$$

## ۱۱-۴- مقاومت در مدار موازی

**مقاومت معادل:** مقاومت کل (معادل) در مدار موازی، مقاومتی است که اگر به جای مقاومت‌های موازی قرار گیرد، شدت جریان کل مدار را تغییر ندهد. در مدار موازی، با افزایش

به رابطه‌ی ۳ می‌رسیم.

$$\frac{E}{R_t} = E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

$$\boxed{\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad (3)$$

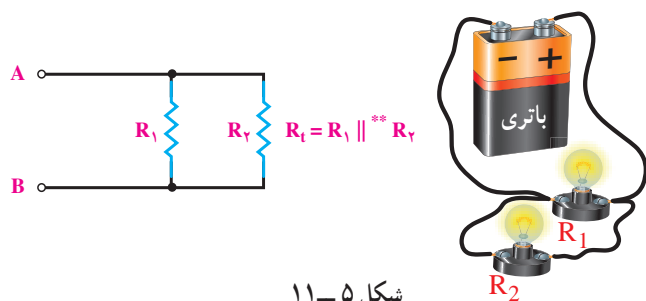
### حالات خاص

I - رابطه‌ی مقاومت معادل بین دو مقاومت موازی شکل

۵-۱۱ چنین محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2} \Rightarrow \boxed{R_t = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$



شکل ۵-۱۱

II - در صورتی که مقاومت‌های موازی شده با هم مساوی

باشند، مقاومت معادل چنین به دست می‌آید:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R} (1 + 1 + \dots + 1)$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R} \times n = \frac{n}{R}$$

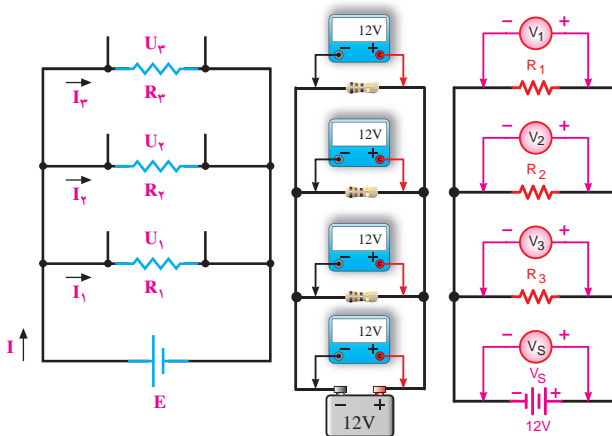
$$\boxed{R_t = \frac{R}{n}}$$

n تعداد مقاومت‌های موازی شده و R یکی از آن‌هاست.

شاخه‌های مدار تعداد مسیرهای جریان زیادتر می‌شود و شدت جریان کل افزایش می‌یابد. افزایش شدت جریان بدین معناست که مقاومت معادل، کاهش یافته است. در شکل ۳-۱۱ جریان کل و جریان شاخه‌ها مشخص شده است.

مدار شکل ۴-۱۱ را با سه مقاومت  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$

در نظر می‌گیریم.



شکل ۴-۱۱

در مدار موازی ولتاژ منبع با ولتاژ دو سر شاخه‌ها برابر

است و جریان کل از مجموع جریان‌های شاخه‌ها به دست می‌آید.

روابط ۱ و ۲ این معنی را نشان می‌دهد.

$$E = U_1 = U_2 = U_3 \quad (1)$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2)$$

طبق قانون اهم می‌توان نوشت:

$$I = \frac{E}{R_t} \quad , \quad I_1 = \frac{E}{R_1} \quad , \quad I_2 = \frac{E}{R_2} \quad , \quad I_3 = \frac{E}{R_3}$$

مقادیر مساوی جریان‌ها را در رابطه‌ی ۲ قرار می‌دهیم.

$$\frac{E}{R_t} = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} + \frac{E}{R_3}$$

با فاکتورگیری و حذف مقادیر مساوی E از طرفین تساوی،

\* - معمولاً مقاومت معادل در مدار موازی را با  $R_{eq}$  نشان می‌دهند. eq مخفف کلمه‌ی equivalent به معنای معادل است ولی در این کتاب جهت سادگی،

مقاومت معادل در مدار موازی نیز با  $R_t$  نمایش داده شده است.

\*\* - علامت دو خط موازی (||) را برای اختصار در به کار بردن کلمه‌ی موازی به کار می‌برند؛ مثلاً  $R_1 || R_2$  یعنی موازی  $R_1$  و  $R_2$  است.

$$E = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

حال اگر مقدار E را در رابطه‌ی ۵ جایگزین کنیم، خواهیم داشت:

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

$$I_1 = I \frac{R_1 R_2}{R_1 (R_1 + R_2)} \Rightarrow I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

نتیجه: جریان کل در شاخه‌های موازی، به نسبت عکس مقاومت‌های شاخه‌ها تقسیم می‌شود.

$I_2$  نیز به ترتیب زیر به دست می‌آید.

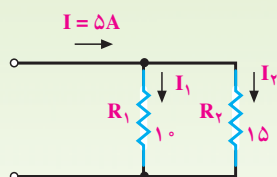
$$I_2 = \frac{E}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R_2} = I \frac{R_1 R_2}{R_2 (R_1 + R_2)}$$

با حذف  $R_2$  از صورت و مخرج داریم:

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

مثال ۲: شدت جریان هر شاخه از مدار شکل ۱۱-۸ را به دست آورید.

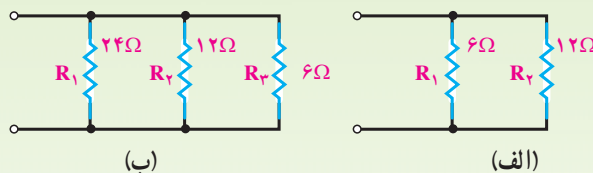


شکل ۱۱-۸

رابطه‌ی جریان شاخه‌ی  $R_1$ :  $I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

$$I_1 = \frac{5 \times 15}{15 + 10}$$

مثال ۱: مقاومت معادل مدارهای شکل ۱۱-۶ را به دست آورید.



شکل ۱۱-۶

مقاومت معادل مدار الف برابر است با

$$R_t = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6 \times 12}{6 + 12} = \frac{72}{18} = 4$$

هم‌چنین، در مدار ب مقاومت معادل برابر است با

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{24} + \frac{1}{12} + \frac{1}{6}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1+2+4}{24} = \frac{7}{24}, \quad R_t = \frac{24}{7} = 3 \frac{3}{7}$$

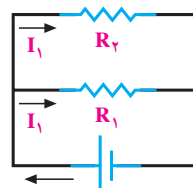
III - با توجه به مدار شکل ۱۱-۷ و به کارگیری قانون

اهم برای هر شاخه، به این نتیجه می‌رسیم:

رابطه‌ی (۱)  $E = I_1 R_1$

رابطه‌ی (۲)  $E = I_2 R_2$

رابطه‌ی (۳)  $E = I R_t$



شکل ۱۱-۷

مقاومت معادل مدار فوق برابر است با

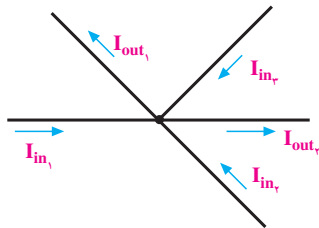
$$R_t = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

از رابطه‌ی ۱ جریان  $I_1$  را به دست می‌آوریم.

$$I_1 = \frac{E}{R_1} \quad (5)$$

رابطه‌ی ۴ را در رابطه‌ی ۳ قرار می‌دهیم:

در شکل ۱۱-۱۰ جریان‌هایی که وارد گره شده‌اند با  $I_{in}$  و جریان‌هایی که از گره دور یا خارج شده‌اند با  $I_{out}$  نمایش داده شده است.



شکل ۱۱-۱۰- جریان‌های وارد شونده و خارج شونده از یک گره

با توجه به قانون جریان کیرشهف، برای شکل ۱۱-۱۰ رابطه‌ی زیر را می‌توان نوشت:

$$I_{in_1} + I_{in_2} + I_{in_3} = I_{out_1} + I_{out_2}$$

قانون گفته شده را این گونه نیز می‌توان تعریف کرد: جمع

جبری جریان‌ها در یک گره برابر صفر است؛ یعنی:  $\sum I = 0$

$$I_{in_1} + I_{in_2} + I_{in_3} - I_{out_1} - I_{out_2} = 0$$

در این رابطه، جریان‌هایی که به گره وارد می‌شوند مثبت و جریان‌های خارج شده از گره منفی در نظر گرفته شده‌اند. عکس این حالت نیز صادق است.

$$-I_{in_1} - I_{in_2} - I_{in_3} + I_{out_1} + I_{out_2} = 0$$

رابطه‌ی کلی جریان کیرشهف:

$$\sum I_{in} = \sum I_{out}$$

یا

$$\sum I = 0$$

مثال ۴: در مدار شکل ۱۱-۱۱:

۱- تعیین تعداد نقطه‌ی گره،

۲- تعیین تعداد شاخه،

۳- رابطه‌ی جریان در گره‌های A و B را تعیین کنید.

راه حل:

۱- دو گره A و B

$$I_1 = \frac{V_5}{25} = 3A \quad \text{جریان شاخه‌ی } R_1$$

$$\text{جریان شاخه‌ی } R_2$$

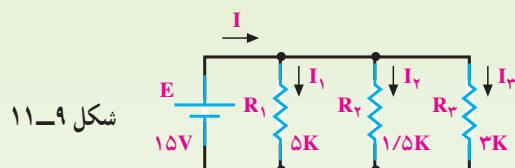
$$I_2 = I - I_1 = 5 - 3 = 2A$$

یا

$$I_2 = I \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 5 \times \frac{1}{25} = 2A$$

مثال ۳: در مدار شکل ۱۱-۹ شدت جریان هر شاخه و

شدت جریان کل را به دست آورید.



$$I_1 = \frac{E}{R_1} = \frac{15V}{5 \times 10^3} = 3mA$$

$$I_2 = \frac{E}{R_2} = \frac{15V}{1/5 \times 10^3} = 10mA$$

$$I_3 = \frac{E}{R_3} = \frac{15V}{3 \times 10^3} = 5mA$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I = 3 + 10 + 5 \quad I = 18mA$$

## ۱۱-۵- قانون جریان کیرشهف<sup>۱</sup>

در هر شبکه<sup>۲</sup> انشعاب‌های زیادی وجود دارد. محل اتصال

بیش از دو شاخه از مدار را **نقطه‌ی گره** یا **نقطه‌ی انشعاب** و

فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی گره را **شاخه** گویند.

بر اساس قانون جریان کیرشهف، مجموع جریان‌های وارد

شده به هر نقطه‌ی گره با مجموع جریان‌های خارج شده از آن

نقطه برابر است.

۱- Kirchhoff's Current law

۲- شبکه شامل مجموعه‌ای از مقاومت‌های سری، موازی یا ترکیبی، همراه با منابع تغذیه است.

در حالت کلید باز، توانی که منبع تولید می کند برابر با توانی است که مقاومت  $R_1$  مصرف می کند.

ب) با بستن کلید، جریان کل افزایش می یابد (سه برابر می شود. چرا؟) و از مقاومت معادل کاسته می شود ( $\frac{1}{3}$  می شود).

چرا؟. بنابراین، جریان منبع برابر است با

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_t = 100 + 100 + 100 = 3 \times 100 = 300 \text{ mA}$$

$$P_t = I_t \cdot U = 300 \times 10^{-3} \times 12 = 3/6 \text{ W}$$

توان مصرفی هر مقاومت برابر است با

$$P_1 = U \cdot I_1 = 12 \text{ V} \times 100 \times 10^{-3} = 1/2 \text{ W}$$

$$P_2 = U \cdot I_2 = 12 \text{ V} \times 100 \times 10^{-3} = 1/2 \text{ W}$$

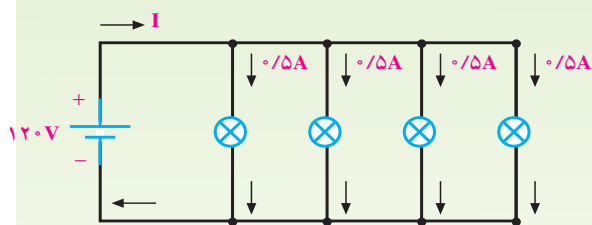
$$P_3 = U \cdot I_3 = 12 \text{ V} \times 100 \times 10^{-3} = 1/2 \text{ W}$$

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 = 1/2 + 1/2 + 1/2 = 3/6 \text{ W}$$

**نتیجه:** توان تولید شده توسط منبع، با مجموع توان های مصرفی شاخه های موازی برابر است.

مثال ۶: برای تغذیه ی لامپ های مشابه شکل ۱۱-۱۳

که به طور موازی بسته شده اند، چه توانی از منبع به لامپ ها منتقل می شود؟



شکل ۱۱-۱۳

راه حل:

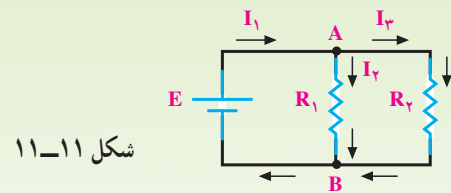
$$P_1 = U \cdot I_1 = 120 \times 0/5 = 60 \text{ (W)}$$

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 60 \text{ (W)}$$

$$P_t = 4 \times 60 \text{ W} = 240 \text{ (W)}$$

$$I_t = 4 \times 0/5 = 2 \text{ A} \quad \text{یا}$$

$$P_t = U \cdot I_t = 120 \times 2 = 240 \text{ (W)}$$



شکل ۱۱-۱۱

۲- سه شاخه یعنی فاصله ی بین دو گره A و B از سه

مسیر یعنی مسیر منبع، مسیر  $R_1$  و مسیر  $R_2$  تشکیل شده است.

$$\text{در گره A} \quad \sum I = 0 \Rightarrow I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad \text{۳-}$$

$$\text{در گره B} \quad \sum I = 0 \Rightarrow I_2 + I_3 - I_1 = 0$$

## ۱۱-۶- توان مصرفی در مدار موازی

پیش از این با توان مجاز و توان مصرفی یک مقاومت

آشنا شده اید. اگر چند مقاومت، موازی با منبع بسته شوند توان

تولید شده توسط منبع با جمع توان های مصرفی شده در مقاومت ها

برابر است. چرا؟

با استفاده از روابط محاسبه ی توان - که قبلاً ذکر شده

است - می توان مقدار توان را در مدارهای موازی به دست آورد.

این روابط عبارت اند از:

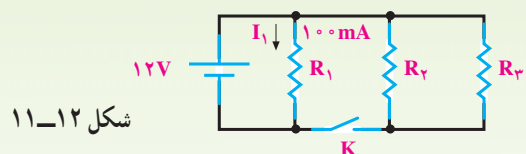
$$P = U \cdot I, \quad P = RI^2, \quad P = \frac{U^2}{R}$$

مثال ۵: توان مصرفی کل شبکه در شکل ۱۱-۱۲ در دو حالت

الف و ب چه قدر است؟ در صورتی که  $R_1 = R_2 = R_3$  باشد،

الف: کلید K باز است.

ب: کلید K بسته است.



شکل ۱۱-۱۲

راه حل:

$$P_{R1} = U \cdot I_1$$

(الف)

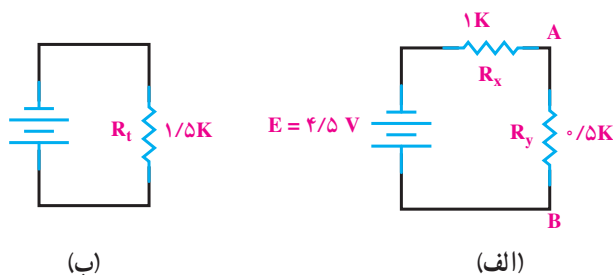
$$P_{R1} = 12 \text{ V} \times 100 \times 10^{-3} = 1/2 \text{ (W)} \quad \text{توان مصرفی } R_1$$

$$P_t = E \cdot I$$

$$P_t = 12 \text{ V} \times 100 \times 10^{-3} = 1/2 \text{ (W)} \quad \text{توان کل}$$

## ۱۱-۷ مدارهای ترکیبی (سری - موازی)

مدار سری - موازی به مداری گفته می‌شود که در آن ترکیبی از مقاومت‌های سری و موازی وجود داشته باشد. در شکل ۱۱-۱۴ شمای فنی مدار سری - موازی اهمی را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۱-۱۵ مدار معادل شکل ۱۱-۱۴

جریان کل از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{4/5V}{1/5k} = 3mA$$

در شکل ۱۱-۱۵ الف شدت جریان کل از  $R_1$  و  $R_2$ ،  $(R_x)$  عبور می‌کند. با داشتن جریان عبوری از  $R_x$  می‌توان افت ولتاژ دو سر آن را حساب کرد.

$$U_{R_x} = I \cdot R_x$$

$$U_{R_x} = 3mA \times 1k\Omega = 3V$$

طبق قانون ولتاژ کیرشهف، ولتاژ دو سر بخش موازی  $(R_y)$  یعنی  $U_{AB}$  برابر است با

$$U_{AB} = E - U_{R_x}$$

$$U_{AB} = U_{R_y} = 4/5V - 3V = 1/5V$$

جریان کل، بعد از عبور از مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  در نقطه‌ی A تقسیم می‌شود. جریان هر شاخه را از دو راه می‌توان محاسبه کرد.

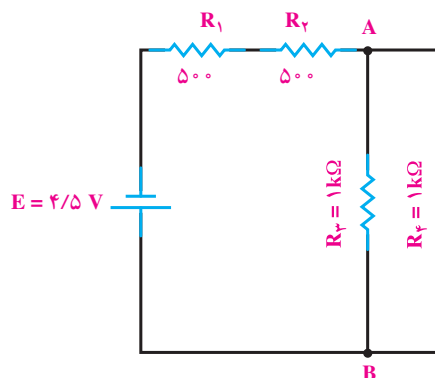
راه اول:

$$I_{R_2} = \frac{U_{AB}}{R_2} = \frac{1/5V}{1k} = 1/5mA$$

$$I_{R_1} = \frac{U_{AB}}{R_1} = \frac{1/5V}{1k} = 1/5mA$$

راه دوم:

$$I_{R_2} = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 3mA \frac{1k}{1k\Omega + 1k} = 1/5mA$$



شکل ۱۱-۱۴ مدار مختلط (سری - موازی)

مدارهای سری - موازی از قوانین مربوط به مدار سری و موازی تبعیت می‌کنند. مثلاً در شکل ۱۱-۱۴ مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  به طور سری و مقاومت‌های  $R_3$  و  $R_4$  به طور موازی بسته شده‌اند.

مقاومت معادل قسمت سری  $(R_x)$  برابر است با:

$$R_x = R_1 + R_2$$

$$R_x = 500 + 500 = 1000\Omega = 1k$$

مقاومت معادل قسمت موازی  $(R_y)$  برابر است با

$$R_y = R_3 \parallel R_4$$

$$R_y = \frac{1000}{2} = 500\Omega = 0/5k$$

مقاومت  $R_x$ ،  $(R_1 + R_2)$  و  $R_y$ ،  $(R_3 \parallel R_4)$  با هم

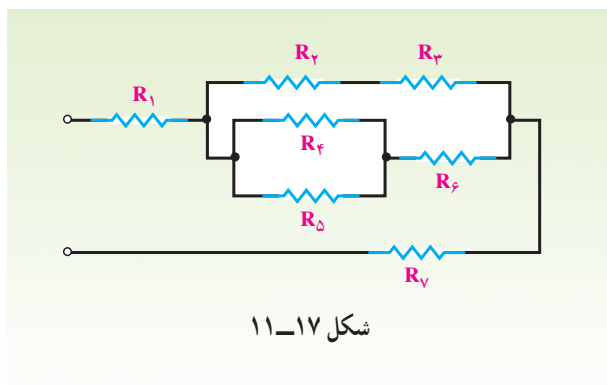
سری هستند و معادل آن دو - یعنی  $R_t$  - برابر است با

$$R_t = R_x + R_y$$

$$R_t = 1 + 0/5 = 1/5k$$

مدارهایی که برای مراحل گفته شده می‌توان رسم کرد، در

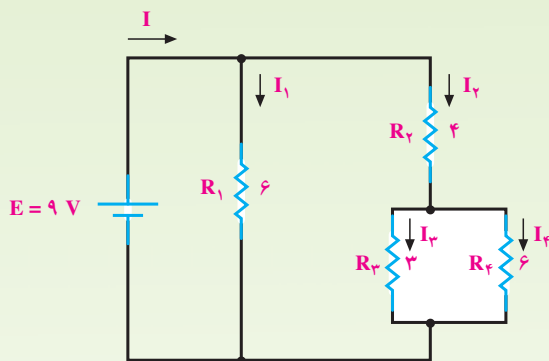
شکل‌های ۱۱-۱۵ الف و ۱۱-۱۵ ب آمده است.



راه حل:

$$R_t = R_1 + \left\{ (R_3 + R_4) \parallel [(R_5 \parallel R_6) + R_7] \right\} + R_7$$

مثال ۹: مقاومت معادل، جریان کل و جریان هر شاخه از مدار شکل ۱۱-۱۸ را به دست آورید.



راه حل:

$$R_{3,4} = R_4 \parallel R_3 = \frac{3 \times 6}{3 + 6} = 2$$

$$R_{3,4} + R_2 = 2 \Omega + 4 \Omega = 6$$

$$R_t = R_1 \parallel R_{2,3,4} = \frac{6}{2} = 3 \quad \text{مقاومت کل}$$

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{9V}{3} = 3A \quad \text{شدت جریان کل}$$

شدت جریان  $I_1$  از تقسیم کردن ولتاژ منبع بر  $R_1$  به دست می آید.

$$I_1 = \frac{E}{R_1} = \frac{9V}{6} = 1.5A$$

شدت جریان  $I_2$  پس از عبور از  $R_2$  به  $I_3$  و  $I_4$  تقسیم

$$I_{R_4} = I \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 3A \frac{1k}{1k\Omega + 1k} = 1.5mA$$

در هر مدار، توان کل از مجموع توان های جزء مصرف شده در آن مدار به دست می آید.

$$P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + P_{R_4}$$

توان مصرفی  $R_1$

$$P_{R_1} = R_1 I^2 = 6 \times (3mA)^2 = 4.5mW$$

$$P_{R_2} = P_{R_1} = 4.5mW \quad \text{توان مصرفی } R_2$$

توان مصرفی  $R_3$

$$P_{R_3} = R_3 I_3^2 = 1k\Omega (1.5mA)^2 = 2.25mW$$

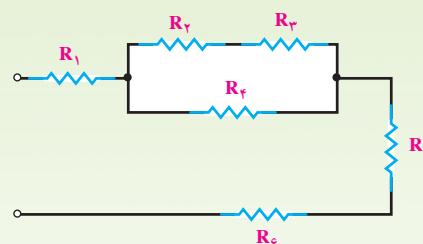
توان مصرفی  $R_4$

$$P_{R_4} = P_{R_3} = 2.25mW$$

$$P_T = 4.5mW + 4.5mW + 2.25mW + 2.25mW = 13.5mW$$

توان کل

مثال ۷: در مدار شکل ۱۱-۱۶ مشخص کنید کدام مقاومت ها با هم سری و کدام مقاومت ها با هم موازی اند؟



راه حل:  $R_2$  و  $R_3$  با هم سری،  $R_{2,3}$  با  $R_4$  موازی و  $R_1$  و  $(R_{2,3,4})$  و  $R_5$  و  $R_6$  با هم سری اند. خلاصه ی این توضیح را به صورت زیر می توان نوشت:

$$R_t = R_1 + [(R_2 + R_3) \parallel R_4] + R_5 + R_6$$

مثال ۸: در مدار شکل ۱۱-۱۷ مقاومت های سری و موازی را به صورت نمادین (سمبلیک) بنویسید.

عبوری از آن در مقدار  $R_1$  به دست می آید.

$$U_{R_1} = R_1 I_1$$

$$I = I_1 = 1A$$

$$U_{R_1} = 15\Omega \cdot 1A = 15V$$

$$U_{R_{2,3}} = U_{R_2} = U_{R_3} = E - U_{R_1} = 40 - 15 = 25V \quad \text{یا}$$

چون  $R_2$  و  $R_3$  با هم مساوی اند، شدت جریان کل به نسبت مساوی بین آن دو تقسیم می شود؛ یعنی:

$$I_2 = \frac{I}{2} = \frac{1A}{2} = 0.5A$$

$$U_{R_2} = I_2 R_2$$

$$U_{R_2} = 0.5A \times 50\Omega = 25V$$

می شود؛ بنابراین، جریان  $I_2$  برابر است با

$$I_2 = I_{2,3,4} = \frac{E}{R_{2,3,4}} = \frac{9V}{6} = 1.5A$$

شدت جریان  $I_3$  را از تقسیم کردن جریان  $I_2$  بین  $R_3$  و  $R_4$  محاسبه می کنیم.

$$I_3 = I_2 \frac{R_4}{R_4 + R_3}$$

$$I_3 = \frac{1.5A \times 6}{(6 + 3)} = 1A$$

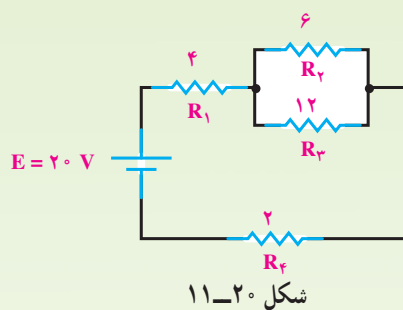
با داشتن شدت جریان  $I_2$  و  $I_3$  می توان با عمل تفریق، شدت جریان  $I_4$  را به دست آورد.

$$I_4 = I_2 - I_3$$

$$I_4 = 1.5A - 1A = 0.5A$$

مثال ۱۱: توان کل و توان  $R_2$  را در مدار شکل

۱۱-۲۰ حساب کنید.



راه حل: ابتدا مقاومت معادل را حساب می کنیم.

$$R_t = R_1 + (R_2 \parallel R_3) + R_4$$

$$R_2 \parallel R_3 = \frac{6 \times 12}{6 + 12} = \frac{12}{3} = 4$$

$$R_t = 4\Omega + 4\Omega + 2$$

$$R_t = 10$$

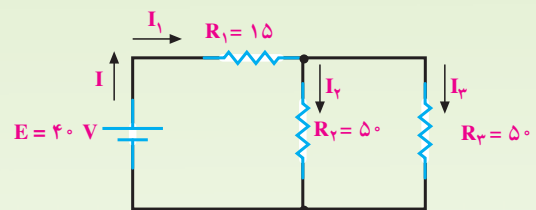
با به دست آوردن  $R_t$  و داشتن ولتاژ کل، توان کل از رابطه زیر به دست می آید.

$$P_t = \frac{(E)^2}{R_t}$$

$$P_t = \frac{(20)^2}{10} = 40(W)$$

مثال ۱۰: افت ولتاژ دو سر  $R_1$  و  $R_2$  را در مدار شکل

۱۱-۱۹ حساب کنید.



شکل ۱۱-۱۹

راه حل: با محاسبه مقاومت معادل، شدت جریان کل

را به دست می آوریم.

$$R_2 \parallel R_3 = \frac{50}{2} = 25$$

$$R_t = R_1 + R_{2,3}$$

$$R_t = 15\Omega + 25\Omega = 40$$

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{40V}{40}$$

$$I = 1A$$

افت ولتاژ دو سر  $R_1$  از حاصل ضرب شدت جریان

## ۸-۱۱- مشخصات مدار موازی

۱- ولتاژ دو سر هر شاخه از مدار موازی برابر ولتاژ منبع است.

$$E = U_1 = U_2 \dots = U_n$$

۲- جریان عبوری از هر شاخه با مقدار مقاومت آن شاخه نسبت عکس دارد.

$$\uparrow I = \frac{U}{\downarrow R} \quad \text{و} \quad \downarrow I = \frac{U}{R \uparrow}$$

۳- جریان کل از مجموع جریان‌های شاخه‌ها به دست می‌آید.

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

۴- مقاومت کل مدار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

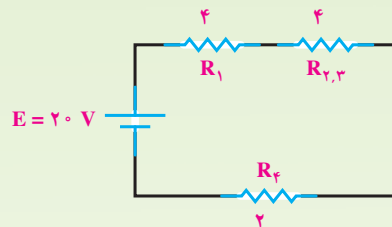
۵- مقدار مقاومت کل (معادل) از کم‌اهم‌ترین مقاومت‌های مدار نیز کم‌تر است.

۶- توان کل برابر مجموع توان مقاومت‌های مدار است.

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

۷- قطع (باز) شدن یک شاخه نقشی در جریان سایر شاخه‌ها ندارد اما جریان کل مدار کاهش می‌یابد.

برای محاسبه‌ی توان مصرفی  $R_2$  ابتدا مدار شکل ۱۱-۲۰ را ساده کرده و به مدار سری تبدیل می‌کنیم (مطابق شکل ۱۱-۲۱).



شکل ۱۱-۲۱

اکنون با استفاده از تقسیم ولتاژها در مدار سری، افت ولتاژ دو سر  $R_2$  و  $R_3$  را به دست می‌آوریم.

$$U_{R_{2,3}} = E \frac{R_{2,3}}{R_t} = E \frac{R_{2,3}}{R_1 + R_{2,3} + R_4}$$

$$U_{R_{2,3}} = \frac{20V \times 4}{4 + 4 + 2} = 8V$$

چون  $R_2$  با  $R_3$  موازی است، پس  $U_{R_2} = U_{R_3}$  خواهد بود.

مقدار توان  $R_2$  با استفاده از رابطه‌ی توان چنین می‌شود:

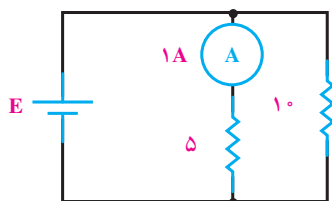
$$P_{R_2} = \frac{(U_{R_2})^2}{R_2}$$

$$P_{R_2} = \frac{(8V)^2}{6} = \frac{64V}{6}$$

$$P_{R_2} = \frac{32}{3} (W)$$

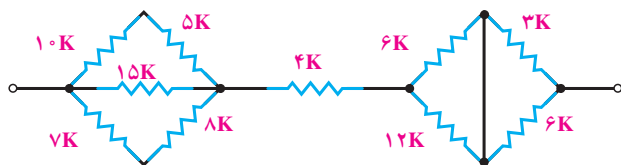


- ۱- چرا مقاومت‌ها را موازی می‌بندند؟
- ۲- مقاومت معادل مدار موازی را تعریف کنید.
- ۳- حالت‌های خاص را در محاسبه‌ی مقاومت معادل توضیح دهید.
- ۴- در مدار موازی، جریان کل چگونه بین شاخه‌ها تقسیم می‌شود؟
- ۵- در مدار موازی از کدام قانون کیرشهف کمک می‌گیرید؟
- ۶- مدار ترکیبی از چه قوانینی پیروی می‌کند؟
- ۷- مصرف‌کننده‌های برقی به چه صورت به شبکه بسته می‌شوند؟



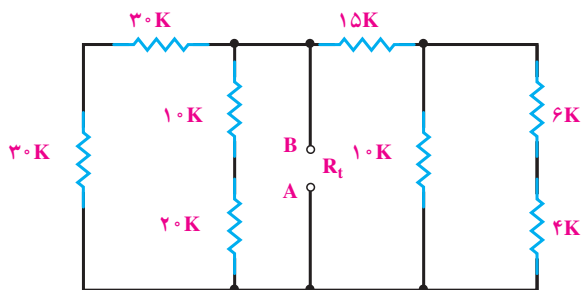
شکل ۱۱-۲۲

- ۱- در شکل ۱۱-۲۲ ولتاژ باتری (E) و جریان کل چه قدر است؟  
(جواب:  $5V$   $1/5A$ )



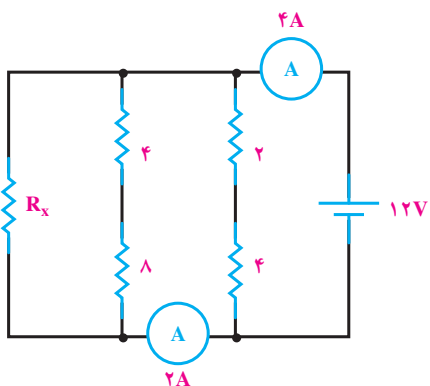
شکل ۱۱-۲۳

- ۲- مقاومت معادل مدار شکل ۱۱-۲۳ چه قدر است؟  
(جواب:  $15k$ )



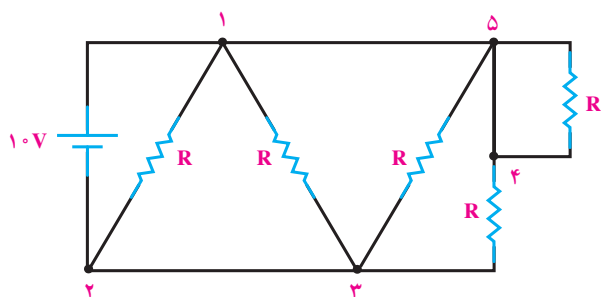
شکل ۱۱-۲۴

- ۳- مقاومت معادل مدار  $R_t$  بین دو نقطه‌ی A و B در مدار شکل ۱۱-۲۴ چه قدر است؟ اگر بین دو نقطه‌ی A و B منبع ولتاژ  $100V$  وصل شود، جریان کل چه قدر است؟  
(جواب:  $10k - 10mA$ )



شکل ۱۱-۲۵

۴- مقدار مقاومت  $R_x$  در مدار  
شکل ۱۱-۲۵ چه قدر است؟  
(جواب: ۱۲)



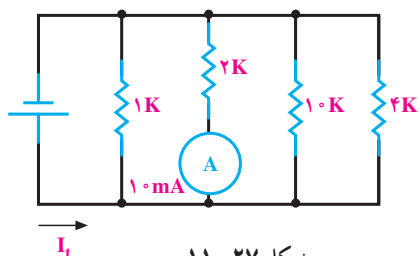
شکل ۱۱-۲۶

۵- در شکل ۱۱-۲۶ اختلاف  
پتانسیل های  $U_{12}$ ,  $U_{13}$ ,  $U_{53}$ ,  $U_{54}$ ,  
 $U_{43}$ ,  $U_{23}$  و  $U_{15}$  را به دست آورید.  
جواب:

$$U_{12} = U_{13} = U_{53} = 10V$$

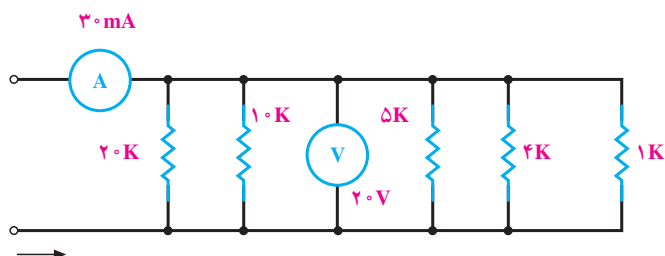
$$U_{54} = 0, U_{43} = 10V$$

$$U_{15} = U_{23} = 0$$



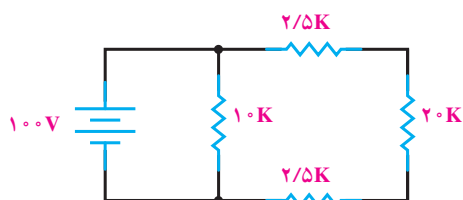
شکل ۱۱-۲۷

۶- در مدار شکل ۱۱-۲۷،  
چه قدر است؟  
(جواب: ۳۷mA)



شکل ۱۱-۲۸

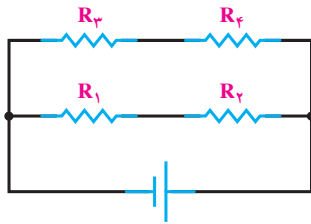
۷- در مدار شکل ۱۱-۲۸ کدام  
مقاومت باز شود تا دستگاه های اندازه گیری  
مقدار داده شده در شکل را نشان دهند؟  
(جواب: ۱۰k)



شکل ۱۱-۲۹

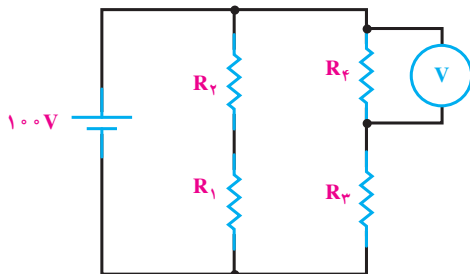
۸- توان کل مدار شکل ۱۱-۲۹  
چه قدر است؟  
(جواب: ۱/۴W)

۹- در مدار شکل ۱۱-۳۰ اگر  $R_f$  را قطع یا دو سر آن را به وسیله‌ی سیمی به هم وصل کنیم، در توان  $R_f$  چه تغییری حاصل می‌شود؟



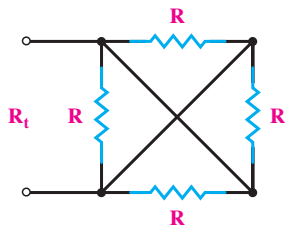
شکل ۱۱-۳۰

۱۰- در مدار شکل ۱۱-۳۱ در چه صورت ولت‌متر عدد صفر را نشان می‌دهد؟  
(جواب:  $R_f = 0$  یا در قسمت‌های  $CD - AB$  یا  $DE$  قطع شدگی باشد.)



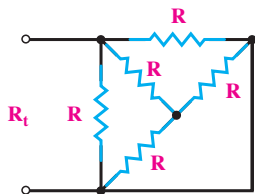
شکل ۱۱-۳۱

۱۱- در شکل ۱۱-۳۲ مقدار  $R_f$  چه قدر است؟  
(جواب:  $\frac{R}{4}$ )



شکل ۱۱-۳۲

۱۲- مقاومت معادل شکل ۱۱-۳۳ چه قدر است؟  
(جواب:  $\frac{3}{8}R$ )



شکل ۱۱-۳۳

۱۳- در مداری با یک فیوز ۶ آمپری، چند لامپ  $40^\circ$  وات،  $220^\circ$  ولتی می‌توانند روشن باشند، بدون این که جریان برق قطع شود؟ اگر از یک اتوی برقی  $75^\circ$  وات استفاده شود، چند عدد از لامپ‌ها را می‌توان روشن کرد؟  
(جواب: ۳۳ لامپ و ۱۴ لامپ)



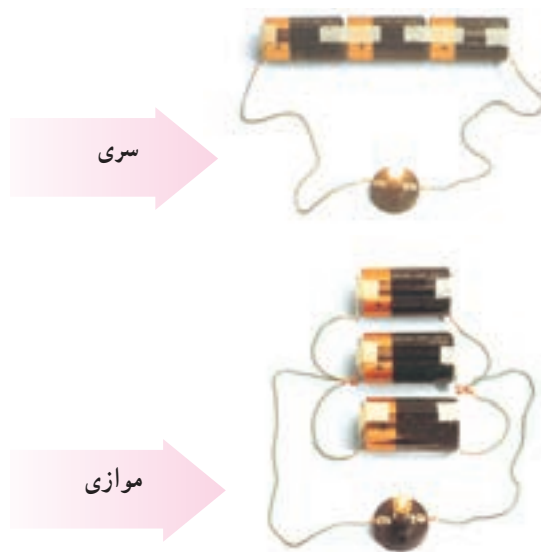
## اتصال پیل ها

### هدف های رفتاری

- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می رود :
- ۱- اتصال سری - موازی پیل ها را توضیح دهد.
- ۲- پیل ها را به طور سری، موازی و مختلط به یک دیگر اتصال دهد.
- ۳- کاربرد پیل ها را به طور سری و موازی و مختلط توضیح دهد.
- ۴- مقاومت داخلی و اثرات آن را بیان کند.
- ۵- پلاریته ی نقاط مختلف را در اتصال سری - موازی و مختلط مشخص کند.
- ۶- اتصال متقابل را توضیح دهد.
- ۷- باتری ها را از نظر توان (آمپر ساعت) با هم مقایسه کند.

خط بزرگ تر را معمولاً قطب مثبت و خط کوچک تر را

قطب منفی در نظر می گیرند. در شکل ۱۲-۲ اتصال سری و موازی پیل ها را مشاهده می کنید.



شکل ۱۲-۲- اتصال سری و موازی پیل ها

### ۱۲-۱- اتصال باتری ها

یکی از منابع تأمین انرژی الکتریکی باتری ها هستند. باتری ها انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. نمونه ای از باتری ها، پیل های خشک و تر هستند که در چراغ قوه و اتومبیل به کار می روند.

واژه ی باتری و پیل را معمولاً به جای یک دیگر به کار می برند اما این دو از نظر تکنیکی با هم تفاوت دارند. باتری از دو یا چند پیل تشکیل می شود که به طور سری یا موازی به هم وصل شده اند. به عبارت دیگر، پیل ها واحد تشکیل دهنده ی باتری ها هستند. نمای مداری یک پیل به صورت دو خط موازی است که یکی بزرگ تر و دیگری کوچک تر می باشد (شکل ۱۲-۱).



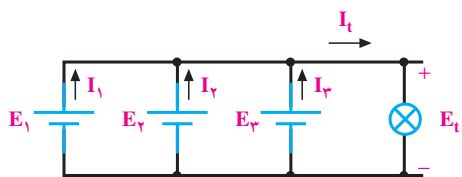
شکل ۱۲-۱- نمای مداری یک پیل

برای بالا بردن جریان دهی باتری، پیل‌ها به طور موازی بسته می‌شوند. برای موازی کردن پیل‌ها باید قطب مثبت پیل‌ها را به یکدیگر و قطب منفی آن‌ها را به یکدیگر اتصال داد. در شکل‌های ۵-۱۲ چند پیل موازی به صورت نمای الکتریکی و ظاهری نشان داده شده است.

لازم به توضیح است که در مدار شکل ۵-۱۲ ولتاژ دو سر پیل‌ها باید با هم برابر باشد اما ظرفیت جریان دهی، متناسب با تعداد پیل‌ها افزایش می‌یابد؛ یعنی:

$$E_t = E_1 = E_2 = E_3$$

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3$$



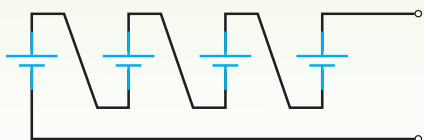
شکل ۵-۱۲- نمای ظاهری و مداری چند پیل موازی

مثال ۱: پیل‌های شکل ۶-۱۲ را طوری وصل کنید که حداکثر ولتاژ از آن‌ها به دست آید.

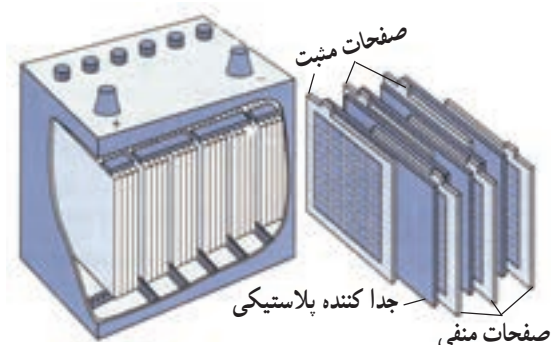


شکل ۶-۱۲

راه حل:

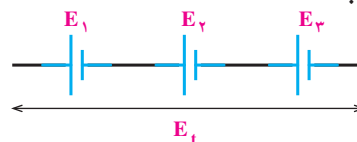


پیل‌های خشک در دو نوع قابل شارژ و غیر قابل شارژ تولید می‌شوند که بر روی آن‌ها حتماً مشخص می‌شود. در صورتی که پیل‌های تر معمولاً قابل شارژ هستند. در شکل‌های ۳-۱۲ یک نمونه پیل تر را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳-۱۲- یک نمونه باتری تر

برای به دست آوردن ولتاژهای بیش‌تر، چند پیل را با هم سری می‌کنند برای سری کردن پیل‌ها باید قطب مثبت هر پیل به قطب منفی پیل دیگر اتصال یابد. ولتاژ کل یک باتری در صورت اتصال صحیح با مجموع ولتاژ تک تک پیل‌های سری شده برابر است؛ یعنی:



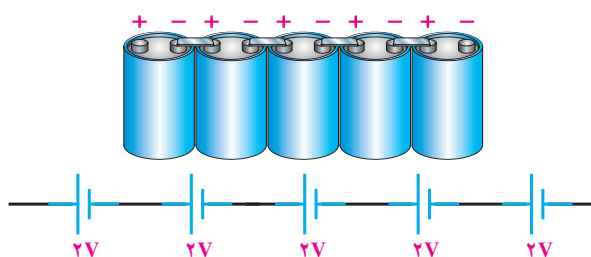
$$E_t = E_1 + E_2 + E_3$$

رابطه‌ی ولتاژ کل  $n$  پیل سری شده به صورت زیر است:

$$E_t = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

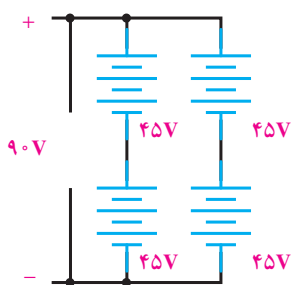
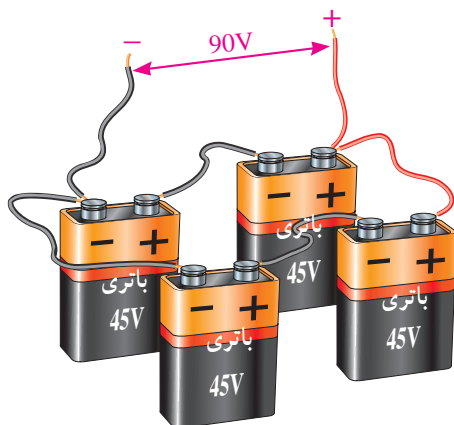
لازم به ذکر است در اتصال سری پیل‌های سری جریان عبوری از مدار یکسان است.

در شکل ۴-۱۲ اتصال سری چند پیل را می‌بینید.



شکل ۴-۱۲- اتصال سری پیل‌ها

اگر بخواهند ولتاژ باتری و جریان دهی را افزایش دهند، پیل‌های تشکیل دهنده‌ی باتری را به طور سری - موازی به هم وصل می‌کنند (شکل ۱۰-۱۲).



شکل ۱۰-۱۲ اتصال ترکیبی باتری‌ها

باتری‌ها را نیز می‌توان با یک‌دیگر به طور سری یا موازی بست. در صورتی که بخواهیم ولتاژ کل را بالا ببریم، باتری‌ها را سری می‌بندیم (ولتاژ باتری‌ها می‌تواند مساوی یا نامساوی باشد). در صورتی که بخواهیم ظرفیت جریان را بالا ببریم، باتری‌ها را موازی می‌بندیم اگر ولتاژ باتری‌ها مساوی باشد، هر باتری در افزایش ظرفیت جریان کل شریک است اما اگر ولتاژ یک یا چند باتری از ولتاژ سایر باتری‌ها کم‌تر باشد، باتری‌های با ولتاژ کم‌تر مانند مصرف‌کننده عمل می‌کنند و علاوه بر این که در تولید جریان همکاری ندارند، جریان نیز دریافت می‌کنند.

## ۱۲-۲- مقاومت داخلی پیل‌ها (باتری)

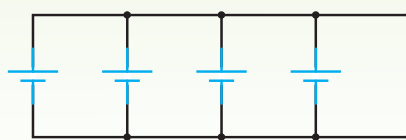
یک مولد (باتری) را در نظر می‌گیریم؛ ابتدا به کمک ولت‌متر، ولتاژ دو سر باتری را اندازه‌گیری کرده مقدار آن را

مثال ۲: پیل‌های شکل ۷-۱۲ را برای به دست آوردن حداکثر ظرفیت جریان به یک‌دیگر اتصال دهید.



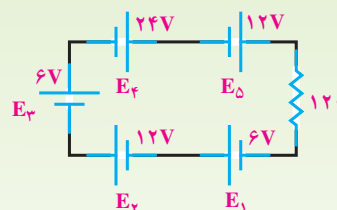
شکل ۷-۱۲

راه حل:



مثال ۳: در مدار شکل ۸-۱۲ ولتاژ و جریان دو سر

مصرف‌کننده چه قدر است؟



شکل ۸-۱۲

راه حل:

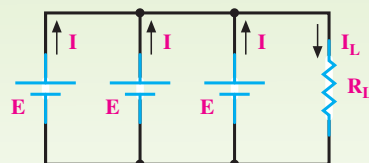
$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5$$

$$E_t = 6V + 12V + 6V + 24V + 12V = 60V$$

$$I = \frac{E_t}{12\Omega} = \frac{60V}{12\Omega} = 5A$$

مثال ۴: در مدار شکل ۹-۱۲ ولتاژ و جریان دو سر بار

چه قدر است:



شکل ۹-۱۲

راه حل:

$$U_L = E_t = E$$

$$I_L = I + I + I = 3I$$

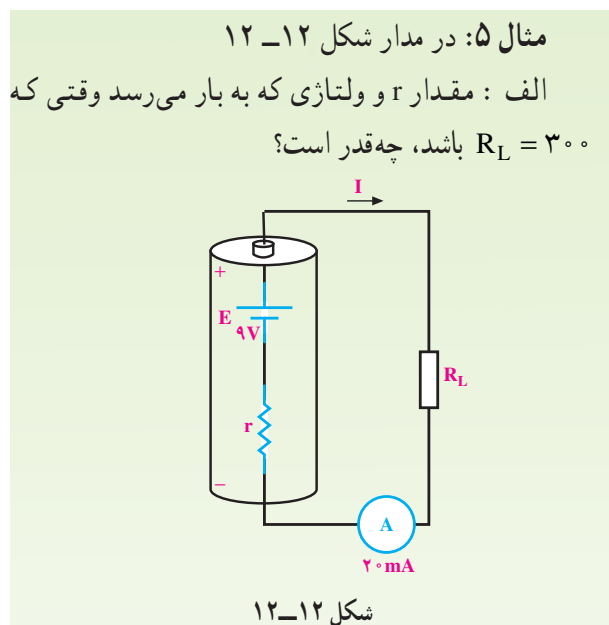
مثلاً برای مدار شکل ۱۱-۱۲ ولتاژ و جریانی که به مصرف کننده می‌رسد برابر است با :

$$R_t = r + R_L$$

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{E}{r + R_L}$$

$$U_L = E - U_r = E - I.r$$

$E$  ولتاژ باتری،  $U_r$  افت ولتاژ دو سر مقاومت داخلی و  $U_L$  افت ولتاژ دو سر بار یا مصرف کننده است. از روابط گفته شده چنین برمی‌آید که ولتاژی که به مصرف کننده می‌رسد، همیشه به اندازه‌ی افت ولتاژ دو سر مقاومت داخلی از ولتاژ باتری کم‌تر است.



ب : اگر  $R_L$  را به  $345 \Omega$  اهم افزایش دهیم، ولتاژ دو سر بار و شدت جریان مدار چه قدر می‌شود؟  
راه حل: الف -  $R_L = 300 \Omega$   
مقاومت معادل با استفاده از قانون اهم

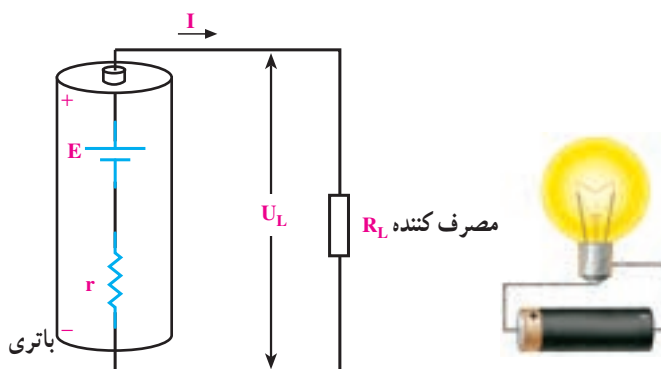
$$R_t = \frac{E}{I} = \frac{9V}{20mA} = 450 \Omega$$

$$R_t = r + R_L$$

$$r = R_t - R_L = 450 - 300 = 150 \Omega$$

$$U_L = IR_L = 20mA \times 300 \Omega = 6V$$

یادداشت می‌کنیم. سپس باتری را به دو سر یک مقاومت می‌بندیم. بار دیگر ولتاژ دوسر باتری را اندازه می‌گیریم و یادداشت می‌کنیم. از مقایسه‌ی ولتاژها، متوجه می‌شویم که ولتاژ اندازه‌گیری شده در مرحله‌ی دوم از ولتاژ اندازه‌گیری شده در مرحله‌ی اول کم‌تر است؛ در صورتی که انتظار می‌رفت، ولتاژ اندازه‌گیری شده در هر دو مرحله برابر باشد. از این رو اختلاف ولتاژ اندازه‌گیری شده را این گونه تعبیر می‌کنیم که باید حتماً در داخل مولد (باتری)، مقاومتی وجود داشته باشد که با عبور جریان از آن و افت مقداری از ولتاژ باتری در دو سر مقاومت، ولتاژ باتری کاهش یافته است. این مقاومت را مقاومت داخلی مولد (باتری) گویند. مقاومت داخلی هر باتری از نظر مصرف مانند مقاومتی است که با باتری سری شده است. شکل ۱۱-۱۲ یک باتری را با مقاومت داخلی نشان می‌دهد. مقاومت داخلی باتری را با حرف  $r$  نمایش می‌دهند که همیشه با مصرف کننده سری می‌شود.

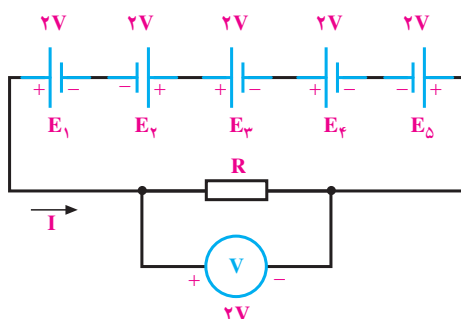


شکل ۱۱-۱۲ - مقاومت داخلی باتری

هرچه مقاومت داخلی باتری کوچک‌تر باشد، افت ولتاژ دو سر آن کوچک‌تر است و می‌توان آن را نادیده گرفت. با ضعیف شدن باتری، مقاومت داخلی آن زیاد می‌شود و در نتیجه، ولتاژ و شدت جریان تولیدی باتری را کاهش می‌دهد. علت کاهش ولتاژ دوسر باتری - همان گونه که در مقدمه ذکر شد - این است که مقداری از ولتاژ باتری در دو سر مقاومت داخلی افت می‌کند و بقیه‌ی ولتاژ آن به مصرف کننده می‌رسد. در مورد کاهش جریان باتری، چون مقاومت داخلی باتری به مقاومت کل مدار اضافه می‌شود، شدت جریان کاهش می‌یابد،

### ۱۲-۳- اتصال متقابل پیل‌ها

در صورتی که دو یا چند پیل، مطابق شکل ۱۲-۱۴ به هم اتصال داده شوند، به آن **اتصال متقابل** می‌گویند. در این حالت، ولتاژ کل کاهش می‌یابد؛ زیرا پیل‌هایی که قطب‌هایشان به صورت مخالف با بقیه بسته شده است، مانند مصرف کننده عمل می‌کنند. رابطه‌ی ولتاژ کل در این مدار برابر است با تفاوت بین ولتاژهای مخالف و موافق؛ یعنی:



شکل ۱۲-۱۴- اتصال متقابل پیل‌ها

$$E_t = E_1 - E_2 + E_3 + E_4 - E_5$$

$$E_t = 2 - 2 + 2 + 2 - 2 = 2V$$

رابطه‌ی فوق برای پیل‌های با ولتاژ نابرابر در مدار سری نیز صادق است.

معمولاً پیل‌هایی را که ولتاژ متفاوت دارند، به صورت موازی و متقابل به یک‌دیگر اتصال نمی‌دهند؛ زیرا انرژی الکتریکی پیل‌های با ولتاژ بالاتر در پیل‌های با ولتاژ کم تر تخلیه می‌شوند. اگر باتری‌ها قابل شارژ باشند باتری ضعیف‌تر شارژ می‌شود و اگر باتری‌ها غیر قابل شارژ باشند انرژی الکتریکی در باتری ضعیف‌تر به حرارت تبدیل می‌شوند.

در بار  $R_L = 30\ \Omega$  از ولتاژ باتری فقط ۶ ولت به بار می‌رسد و ۳ ولت دو سر مقاومت داخلی افت می‌کند.

$$R_L = 345\ \Omega \quad \text{ب-}$$

با معلوم شدن مقاومت داخلی، مقاومت کل برابر است با

$$R_t = r + R_L = 15\ \Omega + 345\ \Omega = 360\ \Omega$$

شدت جریانی که در این حالت از مدار می‌گذرد، برابر

$$\text{است با } I = \frac{E}{R_t}$$

$$I = \frac{9V}{360\ \Omega} = 25\ \text{mA}$$

$$U_L = I \cdot R_L = 25\ \text{mA} \times 345\ \Omega = 8.625V$$

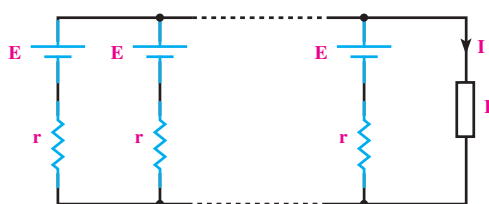
در این حالت، با اضافه شدن  $R_L$  ولتاژ بیشتری به بار می‌رسد ( $8.625V$ ) و ولتاژ کم‌تری در دوسر مقاومت داخلی افت می‌کند ( $0.375V$ ).

**نتیجه:** اگر مقاومت مصرف کننده نسبت به مقاومت داخلی مولد خیلی بزرگ باشد، از مقاومت داخلی می‌توان صرف نظر کرد.

در صورتی که چند باتری کاملاً مشابه با مقاومت داخلی معین را با مصرف کننده (مطابق شکل ۱۲-۱۳) سری یا موازی ببندیم، شدت جریان کل مدار به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آید.



$$I = \frac{nE}{nr + R}$$



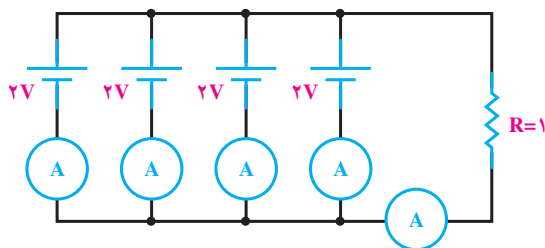
$$I = \frac{E}{\frac{r}{n} + R}$$

شکل ۱۲-۱۳- اتصال باتری‌ها با مقاومت داخلی به صورت سری و موازی



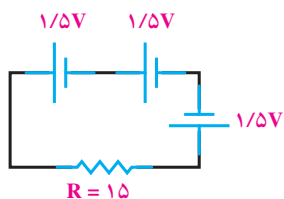
- ۱- پیل را تعریف کنید.
- ۲- باتری را تعریف کنید.
- ۳- چند پیل تر و خشک را نام ببرید.
- ۴- اتصال چند پیل سری را از لحاظ پلاریته (قطب‌های مثبت و منفی) بررسی کنید.
- ۵- در اتصال موازی، شدت جریان کل چگونه تغییر می‌کند؟
- ۶- برای افزایش ولتاژ و تأمین ولتاژ مورد نیاز، پیل‌ها را چگونه اتصال می‌دهند؟
- ۷- مقاومت داخلی پیل چیست و چه تأثیری در مدار دارد؟
- ۸- اتصال متقابل پیل‌ها یعنی چه؟

- ۱- برای تأمین ولتاژ ۹ ولت حداقل از چند باتری  $1/5$  ولتی و به چه صورت استفاده می‌کنیم؟  
(جواب: ۶ - سری)
- ۲- برای افزایش میزان جریان دهی یک باتری به ۵ برابر، چند باتری مشابه دیگر را و به چه صورت باید به مدار اضافه کنیم؟  
(جواب: ۴ - موازی)



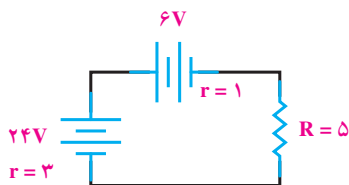
شکل ۱۵-۱۲

- ۳- در مدار شکل ۱۵-۱۲ شدت جریان هر پیل و شدت جریان کل را به دست آورید.  
(جواب:  $2A$ ،  $0/5A$ )



شکل ۱۶-۱۲

- ۴- در مدار شکل ۱۶-۱۲ ولتاژ و جریان کل چه قدر است؟  
(جواب:  $1/5V$ ،  $100mA$ )



شکل ۱۷-۱۲

- ۵- در مدار شکل ۱۷-۱۲ شدت جریان مدار چه قدر است؟  
(جواب:  $2A$ )

## جریان متناوب

### هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

- ۱- جریان متناوب را تعریف کند.
- ۲- انواع جریان متناوب را شرح دهد.
- ۳- نحوه‌ی تولید جریان متناوب سینوسی را بیان کند.
- ۴- دامنه‌ی موج را تعریف کند.
- ۵- فرکانس و دوره‌ی تناوب موج سینوسی را توضیح دهد و آن‌ها را محاسبه کند.
- ۶- ماکزیمم دامنه‌ی موج را شرح دهد.
- ۷- مقدار مؤثر دامنه‌ی موج را توضیح دهد و آن را حساب کند.
- ۸- مقدار متوسط دامنه‌ی موج را شرح دهد و آن را حساب کند.
- ۹- اختلاف فاز دو موج سینوسی را بیان کند.
- ۱۰- معادلات زمانی جریان و ولتاژی را که دارای شکل موج متناوب سینوسی هستند بنویسد.

همان‌طور که می‌دانید، ولتاژ تولید شده توسط یک باتری، ولتاژ مستقیم است که باعث عبور جریان مستقیم می‌شود. به این ترتیب، جریان همیشه در یک جهت جاری است؛ بنابراین، جریان مستقیم یک جهتی است. جریان متناوب دو جهتی است؛ یعنی، الکترون‌ها ابتدا در یک جهت و سپس در جهت دیگر - مخالف جهت قبل - جاری می‌شوند. اگر بتوانیم قطب‌های یک باتری را در یک زمان معین به طور دائم تغییر دهیم، جریانی دو جهتی و در نتیجه، جریانی متناوب خواهیم داشت.

قبلاً در مورد جریانی که فقط در یک جهت جاری بود و مقدار و جهت آن در طول زمان تغییر نمی‌کرد، با عنوان جریان مستقیم یا جریان DC صحبت کردیم، در این جا جریانی را که مقدار و جهت آن در طول زمان تغییر می‌کند، با عنوان جریان متناوب<sup>۱</sup> یا جریان AC مورد بررسی قرار می‌دهیم.

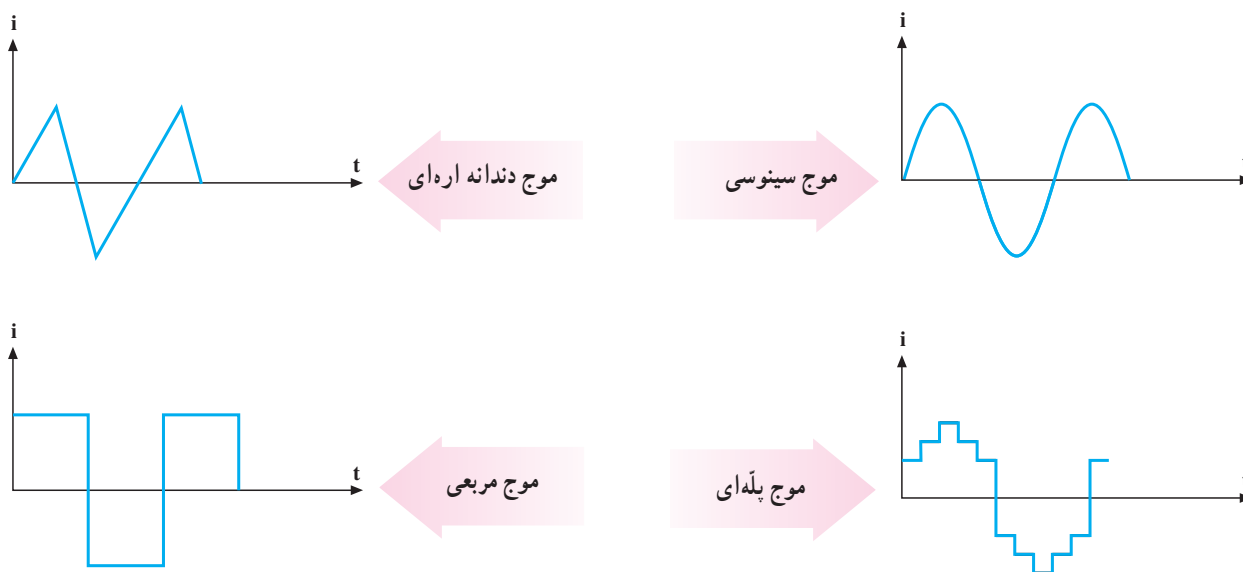
### ۱-۱۳- تعریف جریان متناوب

جریان متناوب جریانی است که جهت آن طی زمان تغییر می‌کند و دامنه‌ی آن نیز نسبت به زمان، از صفر تا حداکثر مثبت و از حداکثر مثبت تا صفر و از صفر تا حداکثر منفی و از حداکثر منفی تا صفر تغییر می‌کند.

### ۲-۱۳- انواع جریان متناوب

برای نشان دادن چگونگی تغییر جریان در زمان از شکل

<sup>۱</sup> - Alternative current



شکل ۱-۱۳- چند نمونه از شکل موج‌های جریان متناوب

سیم پیچ و تولید لحظه به لحظه‌ی شکل موج جریان یا ولتاژ متناوب را نشان می‌دهد.

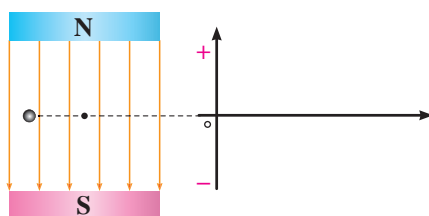
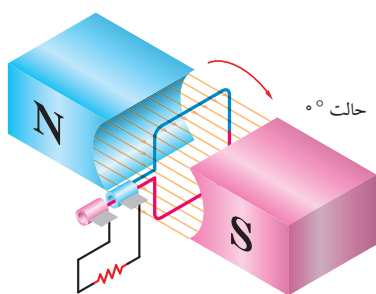
در مرحله‌ی ۱ خطوط قوای مغناطیسی به وسیله‌ی سیم پیچ قطع نمی‌شود (سیم پیچ با خطوط قوا موازی است). در نتیجه، ولتاژ در این مرحله صفر است. چنانچه سیم پیچ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت بچرخد، (مرحله‌ی ۲) قطع خطوط قوا به وسیله‌ی سیم پیچ افزایش می‌یابد. در نتیجه، ولتاژ تولید شده، رفته رفته زیاد می‌شود و پس از پیمودن  $90^\circ$  درجه به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. در مرحله‌ی ۳، با ادامه‌ی دوران سیم پیچ تا  $180^\circ$  درجه قطع خطوط قوا کاهش می‌یابد در نتیجه ولتاژ تولید شده نیز کاهش می‌یابد و در  $180^\circ$  درجه از گردش، دوباره به مقدار صفر می‌رسد. از این لحظه به بعد، جهت ولتاژ تولیدی عوض می‌شود و در مرحله‌ی ۴ تا  $270^\circ$  درجه، مقدار آن دوباره افزایش می‌یابد تا در جهت عکس، به نقطه‌ی ماکزیمم خود می‌رسد. در مرحله‌ی ۵ با ادامه‌ی گردش تا  $360^\circ$  درجه، مقدار ولتاژ تولید شده کاهش می‌یابد و دوباره به صفر می‌رسد. تا این جا سیم پیچ، یک دور کامل زده است. با ادامه‌ی هر گردش سیم پیچ، ولتاژ تولید شده تغییرات مشابهی را طی می‌کند. در همه‌ی این حالت‌ها جریان در مصرف کننده هم تغییراتی مانند ولتاژ دارد و مقدار آن به طور مرتب صفر، ماکزیمم، صفر، ماکزیمم در جهت عکس و بالاخره صفر می‌شود.

موج استفاده می‌کنیم. در شکل ۱-۱۳ چند نمونه شکل موج را مشاهده می‌کنید. یکی از انواع شکل موج‌ها، شکل موج جریان متناوب سینوسی است. هر نیمه از شکل موج جریان متناوب سینوسی قرینه‌ی نیمه دیگر آن با قطب معکوس است. جریان سینوسی معمول‌ترین نوع جریان متناوب است. به این ترتیب، وقتی درباره‌ی جریان متناوب فکر می‌کنیم، اغلب همان موج سینوسی مورد نظر ماست.

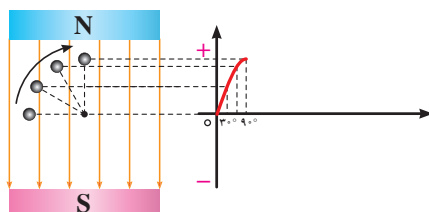
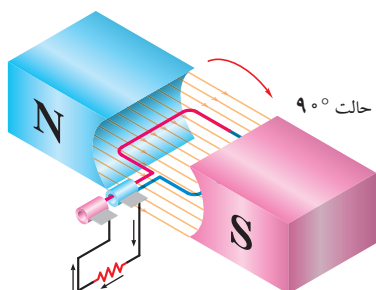
### ۱۳-۳- تولید جریان متناوب

با شناخته شدن جریان متناوب و تولید و انتقال آسان آن، روزه‌روز بر اهمیت آن نیز افزوده شده است. برای تولید جریان متناوب، می‌توان از یک ژنراتور ساده AC استفاده کرد. در ژنراتور AC از ترکیب اصول فیزیکی و مغناطیسی استفاده می‌شود. بدین ترتیب که اگر دو قطب یک آهن ربا در نزدیکی یک دیگر قرار داشته باشند، همواره فلوی مغناطیسی (خطوط قوا) از قطب شمال آهن ربا خارج و به قطب جنوب آن وارد می‌شود. چنانچه در مسیر خطوط قوا سیم پیچی دوران کند، خطوط قوا توسط سیم پیچ قطع می‌شود. هرگاه این عمل به طور مستمر انجام گیرد، جریان متناوب از مولد جریان متناوب به وجود می‌آید.

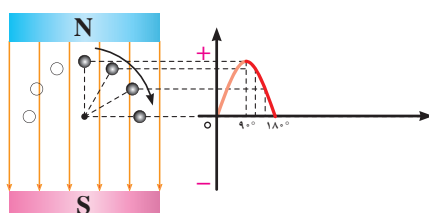
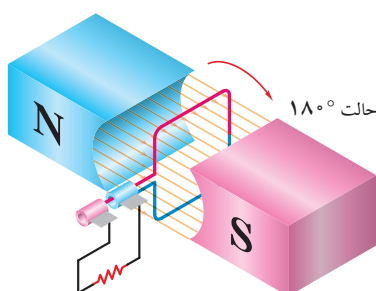
شکل ۲-۱۳- نمای یک ژنراتور ساده و چگونگی حرکت



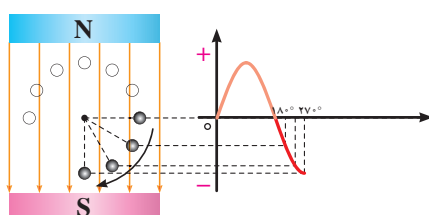
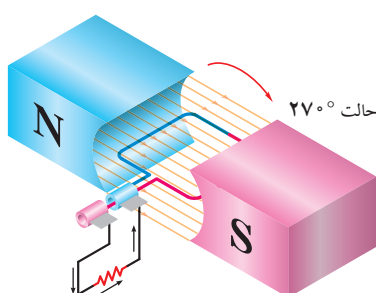
مرحله یک  
۰°



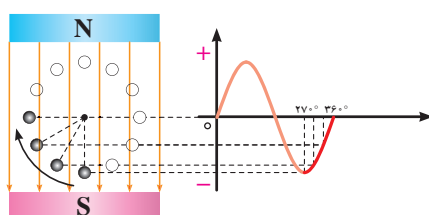
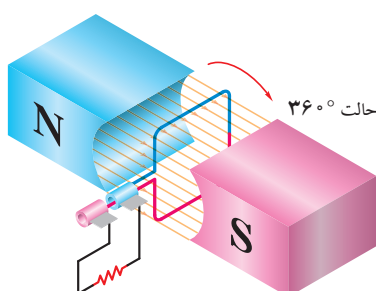
مرحله دو  
گردش از ۰° تا ۹۰°



مرحله سه  
گردش از ۹۰° تا ۱۸۰°



مرحله چهار  
گردش از ۱۸۰° تا ۲۷۰°



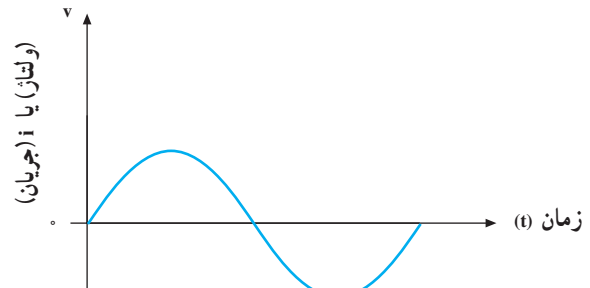
مرحله پنج  
گردش از ۲۷۰° تا ۳۶۰°

شکل ۲-۱۳- تولید جریان متناوب و منحنی لحظه به لحظه یا ولتاژ تولید شده

تذکر: در شکل ۲-۱۳ دو سر مقاومت‌ها به دو حلقه (رینگ)ی مجزا از هم وصل است و قطبین حلقه‌ها در اثر حرکت سیم بیخ عوض می‌شوند.

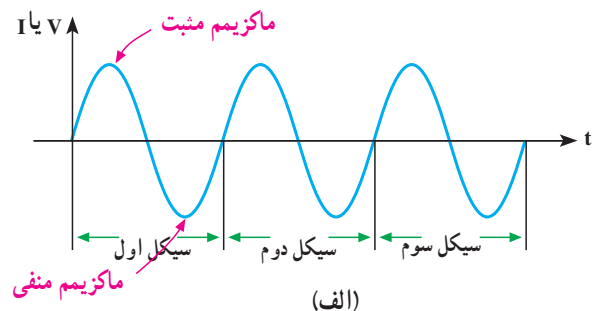
## ۴-۱۳- مشخصات جریان متناوب

در بررسی برخی مدارهای جریان متناوب (AC) با موج سینوسی سروکار داریم. در این مدارها ولتاژ و جریان، هر دو متناسب و به شکل موج سینوسی هستند. شکل ۳-۱۳ یک موج سینوسی را نشان می‌دهد که بیانگر جریان یا ولتاژ سینوسی است.



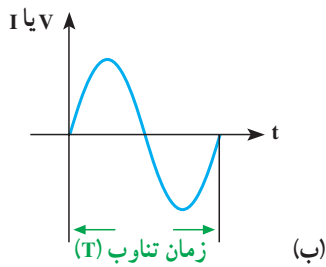
شکل ۳-۱۳- موج سینوسی

همان‌طور که می‌بینید، مقدار و جهت ولتاژ یا جریان با زمان تغییر می‌کند؛ یعنی از صفر شروع می‌شود و به مقدار پیک یا ماکزیمم مثبت می‌رسد. آن‌گاه دوباره صفر می‌شود و سپس به پیک یا ماکزیمم منفی می‌رسد و باز صفر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، هنگامی که موج سینوسی از صفر می‌گذرد، پلاریته‌ی خود را عوض می‌کند. به عبارت ساده‌تر، موج سینوسی بین مقادیر مثبت و منفی تناوب می‌کند. مجموعه‌ی یک تناوب مثبت و منفی را یک **سیکل** گویند (شکل ۴-۱۳- الف).



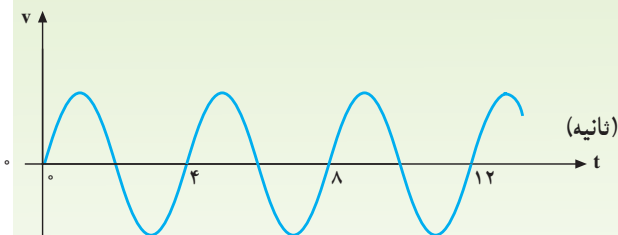
## ۵-۱۳- زمان تناوب

همان‌طور که دیدید، موج سینوسی با زمان ( $t$ ) تغییر می‌کند. بنا به تعریف، مدت زمانی را که طول می‌کشد تا یک سیکل کامل به وجود آید، **زمان تناوب** یا **پریود** می‌گویند و آن را با حرف  $T$  نمایش می‌دهند (شکل ۴-۱۳- ب).



شکل ۴-۱۳- دوره‌ی تناوب یک موج سینوسی

مثال ۱: در شکل ۵-۱۳ زمان تناوب موج سینوسی را به دست آورید.

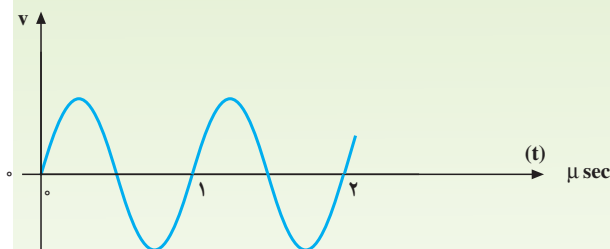


شکل ۵-۱۳

راه حل: یک سیکل کامل را مشخص می‌کنیم زمان انجام آن را از روی محور زمان به دست می‌آوریم.

$$T = 4 \text{ ثانیه}$$

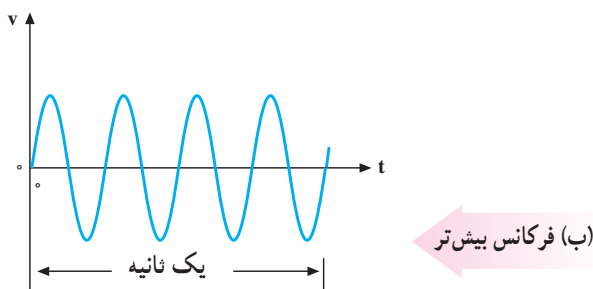
مثال ۲: در شکل ۶-۱۳ سه روش برای اندازه‌گیری زمان تناوب پیدا کنید.



شکل ۶-۱۳

راه حل:

روش اول- زمان تناوب را می‌توان از یکی از صفرها در سیکل اول تا صفر مشابه در سیکل دوم اندازه گرفت.  
روش دوم- زمان تناوب را می‌توان بین دو پیک



شکل ۸-۱۳- نمایش فرکانس

مقدار فرکانس با توجه به کاربرد آن مقادیر خاصی دارد؛ مثلاً فرکانس برق شهر در ایران ۵۰ هرتز یا ۵۰ cps است. یعنی برق شهر در ایران ۵۰ سیکل کامل را در یک ثانیه طی می‌کند. فرکانس برق در بعضی از کشورها ۶۰ هرتز (۶۰ cps) است. فرکانس جریان یا ولتاژ متناوب را می‌توان با فرکانس متر (دستگاه اندازه‌گیری فرکانس) یا اسیلوسکوپ (دستگاه نمایش شکل موج) اندازه گرفت. با توجه به مطالب گفته شده، رابطه‌ی بین فرکانس و زمان تناوب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\text{هرتز } f = \frac{1}{T}$$

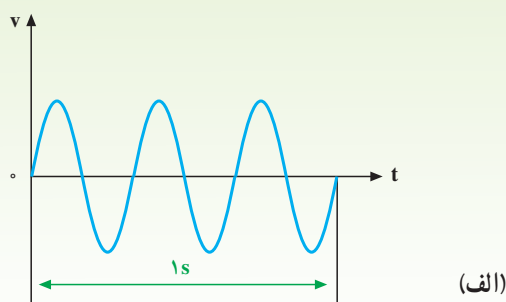
$$\text{ثانیه } T = \frac{1}{f}$$

با توجه به این روابط، هر قدر فرکانس زیادتر شود، به همان اندازه زمان تناوب کاهش پیدا می‌کند؛ مثلاً اگر زمان تناوب یک موج، یک ثانیه باشد فرکانس آن یک هرتز و اگر زمان تناوب، ۲ ثانیه شود، فرکانس آن نصف خواهد شد.

مثال ۳: با توجه به شکل ۹-۱۳

الف - فرکانس کدام موج بیش‌تر است؟

ب - مقادیر زمان تناوب و فرکانس را حساب کنید.

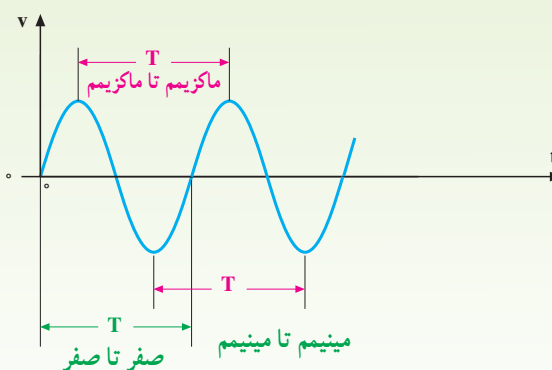


(ماکزیمم) مثبت متوالی اندازه گرفت.

روش سوم - زمان تناوب را می‌توان بین دو پیک (ماکزیمم)

منفی متوالی اندازه گرفت.

شکل ۷-۱۳ سه روش اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۱۳

## ۶-۱۳- فرکانس

بنا به تعریف، تعداد سیکل‌هایی را که در یک ثانیه پیموده

می‌شود، **فرکانس** گویند و آن را با حرف  $f$  نشان می‌دهند.

واحد فرکانس را **سیکل بر ثانیه** (cps) یا اصطلاحاً

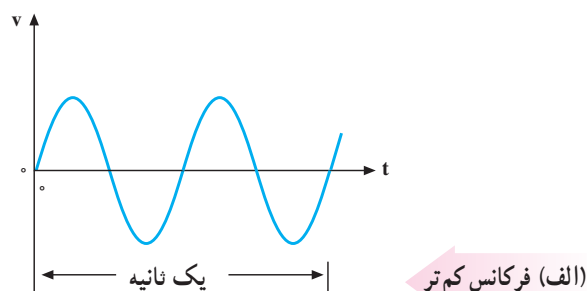
**هرتز** (Hz) می‌نامند. هر چه تعداد سیکل‌ها در ثانیه بیش‌تر باشد،

فرکانس بیش‌تر است. شکل ۸-۱۳ دو موج سینوسی را نشان

می‌دهد که موج (الف) دو سیکل و موج (ب) چهار سیکل را در

ثانیه طی می‌کنند؛ یعنی، فرکانس موج (الف) ۲ هرتز و فرکانس

موج (ب) چهار هرتز است.



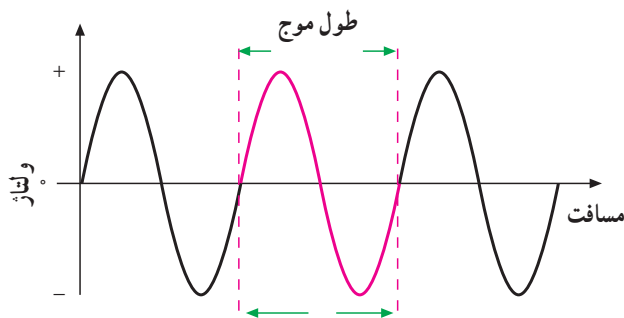
## ۷-۱۳- طول موج

وقتی تغییرات ولتاژ به جای زمان برحسب مسافت بررسی می‌شود، یک سیکل شامل یک طول موج خواهد بود. به تعبیر دیگر، مسافتی را که یک موج در یک سیکل کامل طی می‌کند، **طول موج** گویند (شکل ۱۰-۱۳). طول موج به سرعت انتشار موج و تغییرات فرکانس بستگی دارد. بدین ترتیب که با سرعت انتشار موج، نسبت مستقیم و با تغییرات فرکانس، نسبت عکس دارد. طول موج را با حرف  $\lambda$  (لاندا) نمایش می‌دهند و رابطه‌ی آن به صورت زیر است.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f}$$

$C = v$  سرعت نور یا امواج الکترومغناطیسی، یعنی

$3 \times 10^8$  متر بر ثانیه و  $f$  فرکانس بر حسب هرتز و برحسب متر است.



شکل ۱۰-۱۳- نمایش طول موج در یک موج سینوسی

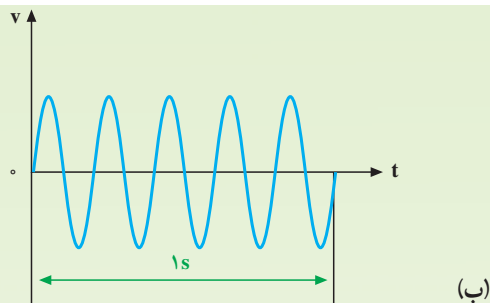
**مثال ۶:** طول موج یک صدا با فرکانس  $10^4 \text{ Hz}$  که به وسیله‌ی بلندگوی پخش می‌شود، چه قدر است؟ (سرعت صوت  $340 \text{ m/sec}$  فرض شود).

**حل:**

$$V = 340 \times 10^2 \text{ متر / ثانیه}$$

$$f = 10^4 \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{340 \times 10^2}{10^4} = 3.4 \text{ (m)}$$



شکل ۹-۱۳

**راه حل:** موج الف ۳ سیکل و موج ب ۵ سیکل را در ثانیه طی کرده‌اند. پس فرکانس موج ب بیش‌تر است.

**موج الف:** ثانیه  $1/3$  و  $f = 3 \text{ Hz}$

**موج ب:** ثانیه  $1/5$  و  $f = 5 \text{ Hz}$

در صنعت برای زمان تناوب از واحدهای کوچک‌تر و برای فرکانس از واحدهای بزرگ‌تر استفاده می‌کنند. این واحدها به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$T \begin{cases} 1 \text{ میلی ثانیه } (1 \text{ ms}) = 10^{-3} \text{ s} \\ 1 \text{ میکرو ثانیه } (1 \mu\text{s}) = 10^{-6} \text{ s} \\ 1 \text{ نانو ثانیه } (1 \text{ ns}) = 10^{-9} \text{ s} \end{cases}$$

$$f \begin{cases} 1 \text{ کیلو هرتز } (1 \text{ kHz}) = 10^3 \text{ Hz} \\ 1 \text{ مگا هرتز } (1 \text{ MHz}) = 10^6 \text{ Hz} \\ 1 \text{ گیگاهرتز } (1 \text{ GHz}) = 10^9 \text{ Hz} \end{cases}$$

**مثال ۴:** اگر زمان تناوب یک موج سینوسی  $10$  میلی ثانیه باشد، فرکانس آن چه قدر است؟

$$\text{حل: } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10 \times 10^{-3} \text{ (s)}} = 10^4 \text{ Hz}$$

**مثال ۵:** فرکانس یک موج سینوسی  $60$  هرتز است. زمان تناوب آن چه قدر است؟

$$\text{حل: } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 16.67 \text{ (ms)}$$

مثال ۷: طول موج یک موج رادیویی با فرکانس ۳ گیگاهرتز چه قدر است؟

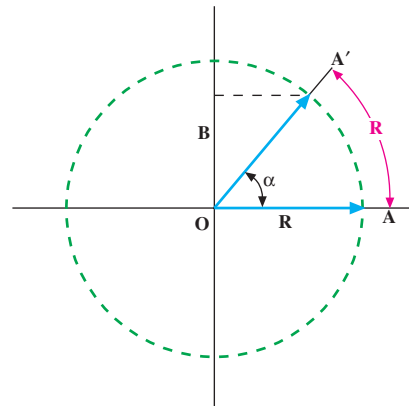
$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$f = 3 \times 10^9 \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 0.1 \text{ m} = 10 \text{ (cm)}$$

## ۸-۱۳- سرعت زاویه‌ای

سرعت را با مقدار مسافتی که یک متحرک در واحد زمان طی می‌کند، می‌سنجند؛ مثلاً وقتی می‌گویند سرعت یک اتومبیل ۸۰ کیلومتر بر ساعت است، یعنی این وسیله‌ی نقلیه در هر ساعت ۸۰ کیلومتر راه می‌رود. اگر سرعت ثابت باشد، رابطه‌ی سرعت و مسافت طی شده در واحد زمان به صورت  $V = \frac{x}{t}$  است که در آن  $V$  سرعت،  $x$  مسافت طی شده و  $t$  زمان می‌باشد. حال اگر این مسافت به صورت خط مستقیم نباشد و پیرامون یک مسیر دایره شکل باشد، برای بیان سرعت از اصطلاح سرعت زاویه‌ای استفاده می‌کنند و آن را با  $\omega$  نشان می‌دهند. برای محاسبه‌ی سرعت زاویه‌ای  $\omega$ ، شکل ۱۱-۱۳ را - که دایره‌ای به شعاع  $R$  است - در نظر می‌گیریم. در این شکل، متحرک  $A'$  از نقطه‌ی  $A$  روی محیط دایره حرکت می‌کند. هرگاه مسافتی از محیط دایره - که به اندازه‌ی شعاع  $(R)$  است - پیموده شود، یک رادیان پیموده شده است.



شکل ۱۱-۱۳- نمایش سرعت زاویه‌ای و مسافت طی شده نسبت به زمان

زاویه‌ای را که متحرک از  $A$  تا  $A'$  پیموده است، با  $\alpha$  نمایش می‌دهند. در صورتی که  $AA'$  برابر  $R$  باشد، مقدار زاویه‌ی  $\alpha$  برابر یک رادیان یا  $30^\circ / 57$  خواهد بود.

زاویه‌ای را که در واحد زمان طی شود، با  $\omega$  نشان می‌دهند و آن را سرعت زاویه‌ای می‌خوانند؛ بنابراین اگر سرعت زاویه‌ای ثابت باشد، رابطه‌ی زیر را برای سرعت زاویه‌ای می‌توان نوشت.

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

این رابطه عیناً شبیه رابطه‌ی  $V = \frac{x}{t}$  است که  $x$  و  $\alpha$  مسافت‌های پیموده شده بر حسب متر و رادیان می‌باشند.

زاویه‌ی پیموده شده در یک دور کامل - یعنی در زمان یک پرید - برابر  $360^\circ$  درجه یا  $2\pi$  رادیان است. در این صورت، رابطه‌ی سرعت زاویه‌ای برابر است با

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi(\text{Rad})}{T(\text{sec})}$$

از طرفی، می‌دانیم،  $T = \frac{1}{f}$ . پس

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

## ۹-۱۳- مقادیر ماکزیمم ولتاژ و جریان موج سینوسی

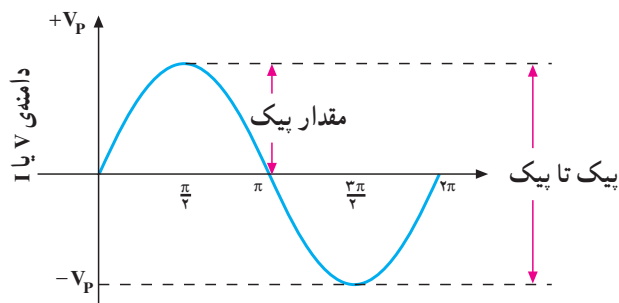
دامنه‌ی ولتاژ مستقیم (DC) همواره ثابت است. ولی در ولتاژ متناوب (AC) در هر لحظه دامنه و جهت ولتاژ در حال تغییر است.

در ولتاژ AC اولین موضوعی که باید مورد ملاحظه قرار گیرد، مقدار پیک ولتاژ یا دامنه‌ی ماکزیمم آن است. فاصله‌ی بین صفر (محور افقی زمان) تا مثبت‌ترین (بالا‌ترین) نقطه‌ی شکل موج یا فاصله‌ی بین صفر تا منفی‌ترین (پایین‌ترین) نقطه‌ی شکل موج، **پیک** نامیده می‌شود. در شکل ۱۲-۱۳ ولتاژ متناوب (AC) نشان داده شده شامل پیک مثبت و پیک منفی است. مقدار پیک تا پیک ولتاژ AC عبارت از فاصله‌ی بالاترین نقطه‌ی پیک مثبت و پایین‌ترین نقطه‌ی پیک منفی شکل موج است. در موج سینوسی مقدار پیک برابر  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  پیک تا پیک است. با استفاده از اسیلوسکوپ

می‌توان مقادیر پیک و پیک تا پیک را اندازه گرفت.

**مقادیر لحظه‌ای یا دامنه می‌گویند.** بدیهی است که در تناوب مثبت، مقادیر لحظه‌ای مثبت و در تناوب منفی، مقادیر لحظه‌ای منفی خواهد بود.

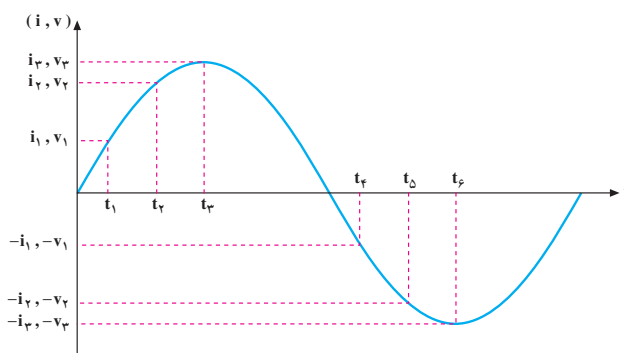
مقادیر لحظه‌ای را با حروف کوچک  $i$  و  $v$  نشان می‌دهند. گاهی ممکن است که به دانستن مقدار لحظه‌ای یک ولتاژ یا جریان نیاز داشته باشیم. در اغلب موارد هیچ کدام از مقادیر پیک تا پیک یا لحظه‌ای قادر نیستند اندازه‌ی واقعی ولتاژ یا جریان را بیان کنند و به جای آن‌ها اغلب از دو مقدار دیگر به نام‌های مقدار متوسط (Average) و مقدار مؤثر (Effective) استفاده می‌کنند.



شکل ۱۲-۱۳

### ۱۰-۱۳- مقادیر لحظه‌ای

طبق شکل موج نشان داده شده در شکل ۱۳-۱۳ ولتاژ یا جریان، در هر زمان مقادیر خاص خود را دارند که به آن‌ها

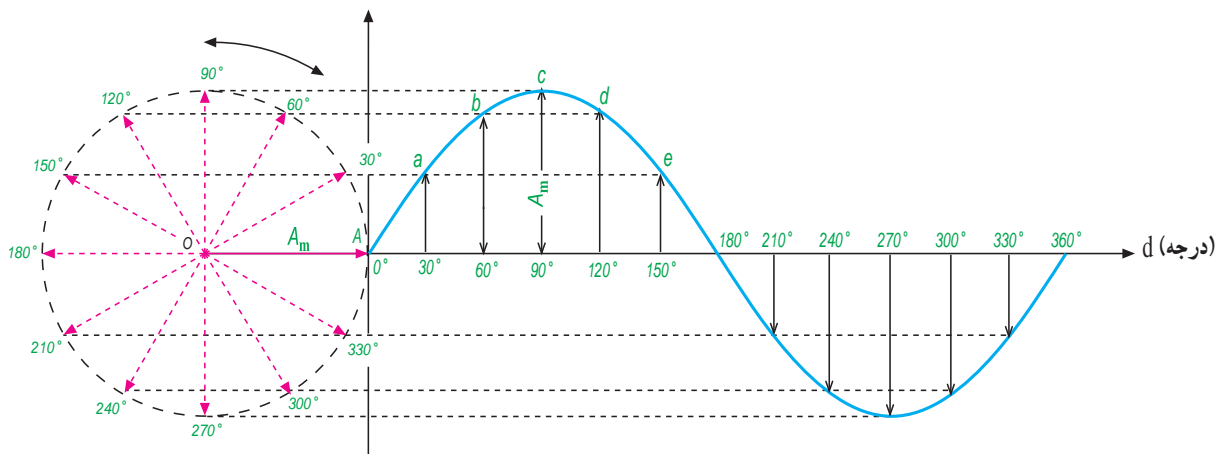


شکل ۱۳-۱۳- نمایش مقادیر لحظه‌ای

سیم پیچ القا یا تولید می‌شود. شکل موج این ولتاژ در لحظات مختلف در شکل ۱۳-۱۴ ترسیم شده است.

### ۱۱-۱۳- معادله‌ی زمانی جریان یا ولتاژ سینوسی

همان گونه که آموختید در اثر گردش یک سیم پیچ با قاب مستطیل شکل در میدان مغناطیسی آهن ربای دائم، ولتاژی روی



شکل ۱۳-۱۴- نمایش موج سینوسی ولتاژ

چون  $\omega t$  بر حسب رادیان و هر رادیان برابر  $57/3^\circ$  درجه است، پس

$$U = 156 \sin(0/754 \times 57/3^\circ)$$

$$U = 156 \sin 43/2^\circ$$

با استفاده از جدول مثلثاتی

$$\sin 43/2^\circ \approx 0/685$$

$$U = 156 \times 0/685 \approx 107 \text{ ولت}$$

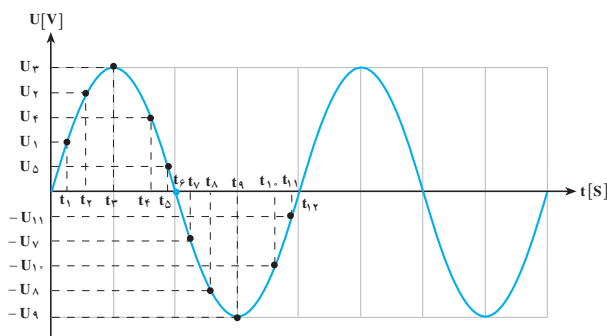
## ۱۲-۱۳- مقدار متوسط (Average) موج سینوسی

مقدار متوسط یک ولتاژ یا جریان متناوب؛ میانگین مقادیر لحظه‌ای آن موج در یک دوره تناوب است.

به‌طور کلی برای محاسبه میانگین هر کمیتی باید حاصل جمع مقادیر آن نقاط مختلف را بر تعداد نقاط تقسیم کرد. مثلاً برای محاسبه میانگین حداقل و حداکثر دمای یک اتاق باید حاصل جمع حداقل دما با حداکثر دمای محیط را جمع و بر ۲ تقسیم کرد و یا برای محاسبه میانگین بین سه عدد  $1^\circ$ ،  $18^\circ$  و  $17^\circ$  به صورت زیر عمل کرد.

$$\text{میانگین سه عدد (معدل)} = \frac{10 + 18 + 17}{3} = \frac{45}{3} = 15$$

بر همین اساس برای محاسبه دقیق مقدار متوسط یک موج باید مقادیر موج در هر لحظه را با هم جمع و بر تعداد نمونه‌های برداشته شده تقسیم کرد. شکل ۱۳-۱۵ یک موج سینوسی ولتاژ متناوب را نشان می‌دهد که در هر نیم سیکل به ۶ قسمت تقسیم شده است و مقدار متوسط آن در هر نیم سیکل حساب شده است.



شکل ۱۳-۱۵

شعاع دایره یعنی OA با ماکزیمم دامنه‌ی موج ایجاد شده برابر است. با گردش سیم‌پیچی OA و طی  $3^\circ$  درجه، ولتاژ القا شده دامنه‌ای برابر a تا محور افقی دارد و در  $6^\circ$  درجه، دامنه‌ی ولتاژ برابر b تا محور افقی خواهد بود. پس با توجه به زاویه‌ی چرخش  $3^\circ$  و دامنه‌ی ولتاژ القا شده (a) می‌توان نوشت:

$$\sin \alpha = \frac{a}{A_m}$$

a دامنه‌ی ولتاژ لحظه‌ای (U) و  $A_m$  دامنه‌ی ولتاژ ماکزیمم ( $U_{\max}$ ) است؛ بنابراین، ولتاژ القا شده در هر لحظه برابر است با حداکثر دامنه‌ی موج در سینوس زاویه‌ی آن، یعنی:

$$a = A_m \sin \alpha$$

$$U = U_{\max} \sin \alpha \quad \text{یا}$$

$$\alpha = \omega t \quad \text{قبلاً دانستیم که}$$

$$U = U_{\max} \sin \omega t \quad \text{پس}$$

معادله‌ی جریان نیز به همین صورت اثبات می‌شود؛ یعنی:

$$i = I_{\max} \sin \omega t$$

$$i = I_{\max} \sin \alpha \quad \text{یا}$$

مثال ۸: معادله‌ی ولتاژ متناوبی را بنویسید که فرکانس آن  $60^\circ$  هرترز و ماکزیمم ولتاژ آن ۱۵۶ ولت باشد.

حل: سرعت زاویه‌ای  $\omega$  برابر با  $2\pi f$  است. پس:

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3/14 \times 60$$

$$\omega = 377 \text{ Rad/sec} \approx 376 \text{ Rad/sec}$$

$$U_{\max} = 156 \text{ V}$$

$$U = U_{\max} \sin \omega t$$

$$U = 156 \sin 377t$$

مثال ۹: مقدار لحظه‌ای ولتاژ مثال شماره‌ی ۸ را در پایان  $t = 0/002$  ثانیه به دست آورید.

حل:

$$U = 156 \sin 377t$$

$$t = 0/002 \text{ sec}$$

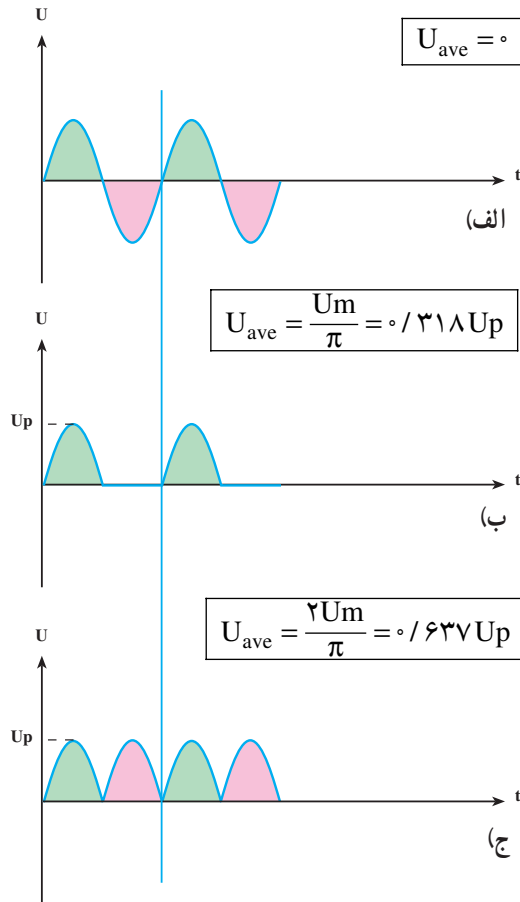
$$U = 156 \sin 377 \times 0/002$$

$$U = 156 \sin 0/754$$

نکته: هر قدر تعداد نقاط بیش تر باشد، مقدار میانگین محاسبه شده دقیق تر است.

$$U_{av}^+ = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6}{6} \quad (\text{میانگین مقادیر لحظه‌ای نیم سیکل مثبت})$$

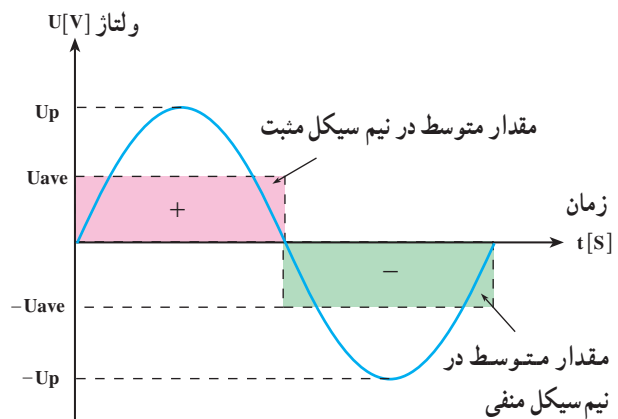
$$U_{av}^- = \frac{(-U_7) + (-U_8) + (-U_9) + (-U_{10}) + (-U_{11}) + (-U_{12})}{6} \quad (\text{میانگین مقادیر لحظه‌ای نیم سیکل منفی})$$



شکل ۱۳-۱۷

لازم به ذکر است برای محاسبه مقدار متوسط شکل موج جریان نیز به همین ترتیب و بر پایه این روابط می‌توان عمل کرد یعنی:

مقدار متوسط هر یک از نیم سیکل‌های یک موج سینوسی در شکل ۱۶-۱۳ نشان داده شده است مساحت زیر هر نیم سیکل با مساحت مقدار متوسط در همان نیم سیکل برابر است.



شکل ۱۳-۱۶

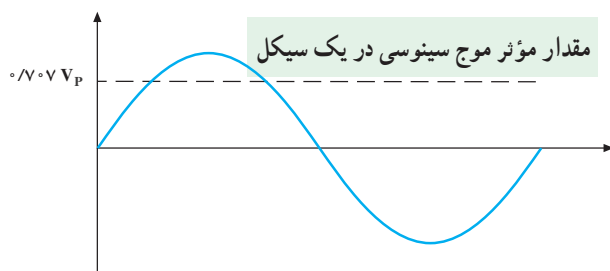
همان‌طوری که از شکل ۱۶-۳ مشخص است مقدار متوسط در یک سیکل کامل که از جمع دو نیم سیکل به دست می‌آید که مقدار آن مساوی صفر می‌شود.

$$U_{ave} = U_{ave}^+ + U_{ave}^- = 0$$

هرگاه شکل موج‌هایی به صورت امواج نشان داده شده در شکل ۱۷-۱۳ داشته باشیم و بخواهیم مقدار متوسط هر یک از آن‌ها را حساب کنیم می‌توانیم از روابط نوشته شده در مقابل آن‌ها استفاده کنیم.<sup>۱</sup>

۱- با چگونگی محاسبه و زمینه کاربرد مقدار متوسط در مباحث الکتریکی و الکترونیکی سال‌های بعد آشنا خواهید شد.

ولتاژ مؤثر در یک موج سینوسی برابر  $0.707 V_p$  یا  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  مقدار ماکزیمم است (شکل ۱۳-۲۰).



شکل ۱۳-۲۰- مقدار مؤثر (Rms) یک موج سینوسی کامل  $0.707$  مقدار پیک موج است.

$$U_{\text{مؤثر}} = U_{\text{rms}} = U_{\text{eff}} = U_e = \frac{1}{\sqrt{2}} U_p \text{ و } 0.707 U_p$$

$$I_{\text{مؤثر}} = I_{\text{rms}} = I_{\text{eff}} = I_e = \frac{1}{\sqrt{2}} I_p \text{ و } 0.707 I_p$$

مثال ۱۰: مقدار مؤثر  $20$  ولت پیک تا پیک را به دست آورید.

راه حل: ابتدا آن را بر  $2$  تقسیم کرده و سپس در  $0.707$  ضرب می‌کنیم. بنابراین:

$$U_p = \frac{1}{2} U_{p-p} = \frac{1}{2} \times 20 = 10 \text{ V}$$

$$U_e = 10 U_p \times 0.707 = 7.07 \text{ ولت}$$

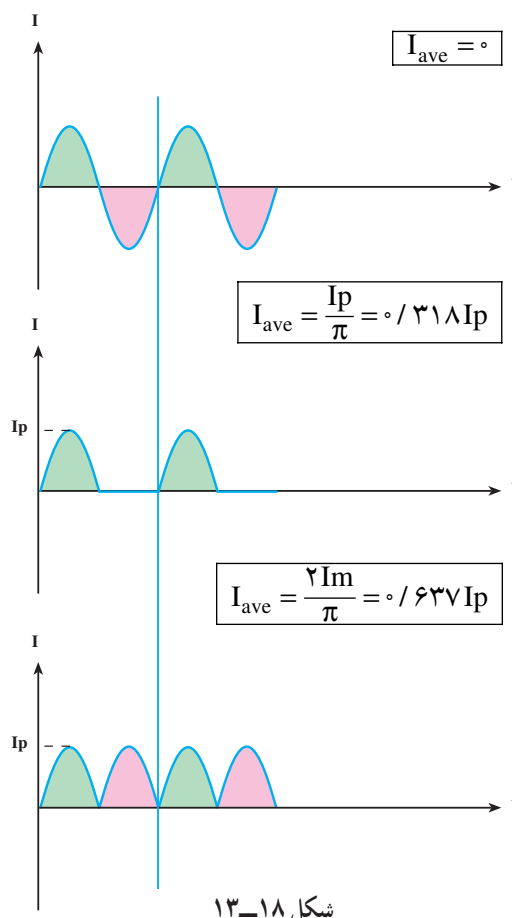
در محاسبه‌ها، فرمول کلی را به صورت:

$$U_p = \sqrt{2} U_e \text{ یا } U_e = \frac{U_p}{\sqrt{2}} = \frac{U_p}{1.41}$$

می‌نویسند. چنانچه فرمول  $U_e$  بر حسب ولتاژ پیک تا پیک نوشته شود، مقدار آن برابر با  $U_{p-p} = 2 / 828 V_{\text{rms}}$  خواهد بود.

مثال ۱۱: مقدار پیک تا پیک ولتاژ  $220$  ولت (برق شهر) چند ولت است؟  
راه حل:

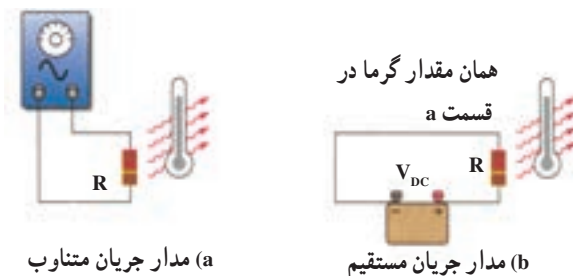
$$U_e = \frac{U_p}{\sqrt{2}}$$



شکل ۱۳-۱۸

### ۱۳-۱۳- مقدار مؤثر (Rms) موج سینوسی

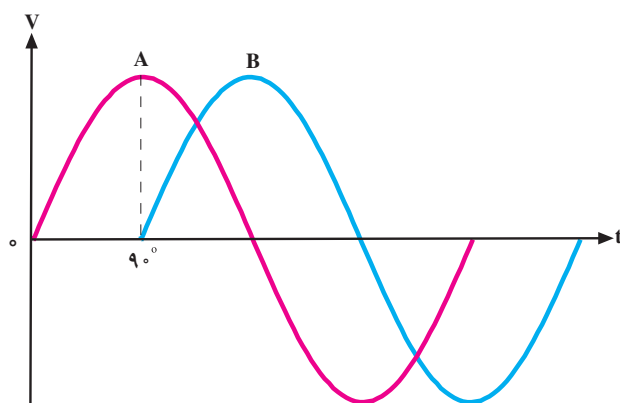
مقدار مؤثر هر ولتاژ متناوب، برابر است با مقدار ولتاژ مستقیم یا DC که در یک مصرف کننده‌ی معین؛ همان مقدار کار یا حرارت تولید می‌کند. به عبارت دیگر، مقدار جریان مستقیمی را که اثر حرارتی آن در یک مدت معین در یک مصرف کننده برابر اثر حرارتی جریان AC مورد نظر باشد، مقدار مؤثر (Effective) آن جریان AC می‌گویند.



شکل ۱۳-۱۹

۱- Rms مخفف کلمات Root mean Square به معنای جذر میانگین مربعات است.

جابه‌جا شده است. بنابراین بین شکل موج A و شکل موج B یک زاویه فاز یا اختلاف فاز  $90^\circ$  درجه به وجود آمده است.



شکل ۱۳-۲۲ - بین شکل موج A و شکل موج B،  $\frac{\pi}{4}$  رادیان یا  $90^\circ$  اختلاف فاز وجود دارد.

در این شکل موج چون پیک ولتاژ (حداکثر دامنه ولتاژ) موج سینوسی B، بعد از پیک ولتاژ شکل موج سینوسی A به وجود آمده است لذا می‌توان گفت که شکل موج سینوسی B، نسبت به شکل موج سینوسی A  $90^\circ$  درجه تأخیر فاز (پس فاز) دارد یا شکل موج A نسبت به B،  $90^\circ$  درجه تقدم فاز (پیش فاز) دارد.

در شکل ۱۳-۲۳ شکل موج سینوسی B، به اندازه  $90^\circ$  درجه ( $\frac{\pi}{4}$  رادیان) به سمت چپ شیفت پیدا کرده و دامنه‌ی شکل موج سینوسی B، زودتر از دامنه‌ی شکل موج سینوسی A به ماکزیمم رسیده است، لذا شکل موج سینوسی B نسبت به شکل موج سینوسی A به اندازه  $90^\circ$  درجه یا  $\frac{\pi}{4}$  رادیان تقدم فاز دارد یا شکل موج سینوسی A نسبت به شکل موج سینوسی B،  $90^\circ$  درجه تأخیر فاز دارد به مقدار فاز بین دو شکل موج سینوسی **اختلاف فاز** نیز می‌گویند.

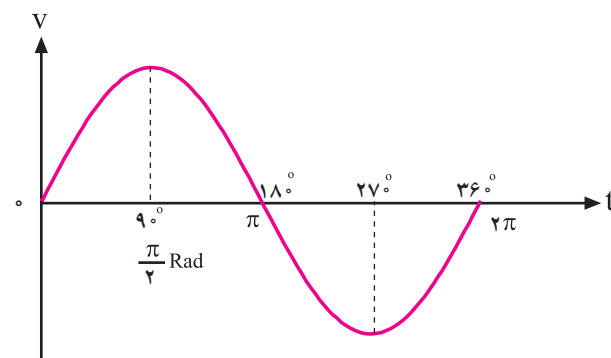
$$U_P = U_e \cdot \sqrt{2} = 220 \times 1.41 = 311 \text{ ولت}$$

$$U_{P-P} = 2U_P = 2 \times 311 = 622 \text{ ولت}$$

## ۱۴-۱۳. اختلاف فاز و زاویه فاز در امواج سینوسی<sup>۱</sup>

در الکتریسیته موقعیت زمانی یک کمیت الکتریکی را نسبت به یک مبدأ فاز (phase) می‌گویند.

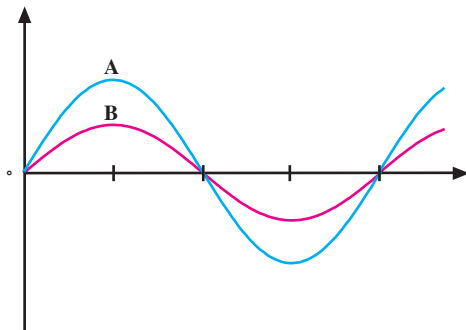
فاز یک موج سینوسی، مقدار زاویه‌ای است که موقعیت یک موج سینوسی را نسبت به مبدأ مشخص می‌کند. در شکل ۱۳-۲۱، یک سیکل کامل از یک موج سینوسی نشان داده شده است. در شکل موج نشان داده شده، نقطه O مبدأ حرکت و نقطه  $90^\circ$  درجه نقطه ماکزیمم دامنه‌ی شکل موج در جهت مثبت است. در نقطه  $180^\circ$  درجه مقدار دامنه به صفر می‌رسد در نقطه  $270^\circ$  درجه مقدار ولتاژ در جهت منفی ماکزیمم می‌شود و در زاویه  $360^\circ$  درجه یا  $2\pi$  رادیان مقدار دامنه به صفر می‌رسد. وقتی شکل موج سینوسی نسبت به شکل موج مبدأ به سمت چپ یا راست جابه‌جا شود، فاز به وجود می‌آید.



شکل ۱۳-۲۱ - یک سیکل کامل از موج سینوسی

در شکل ۱۳-۲۲ شکل موج سینوسی B به اندازه  $90^\circ$  درجه یا  $\frac{\pi}{4}$  رادیان نسبت به شکل ولتاژ مبدأ به سمت راست

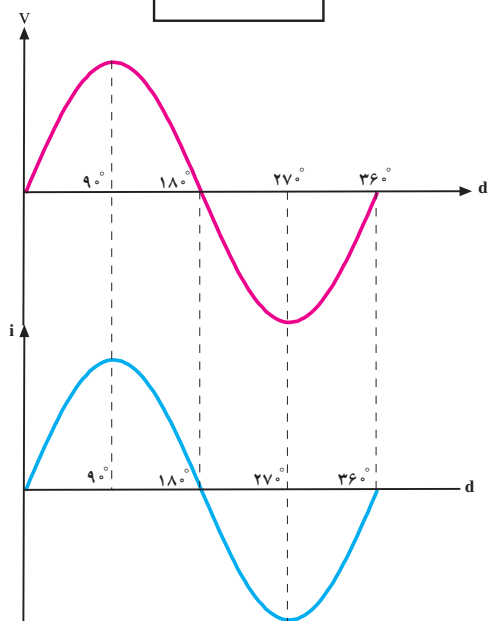
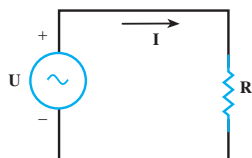
هم فاز هستند.



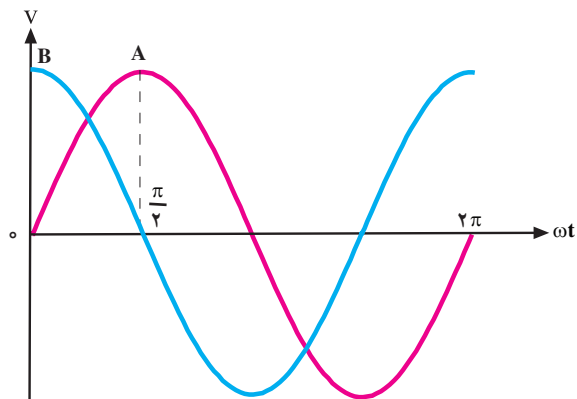
شکل ۱۳-۲۵ - شکل موج A و B با هم هم فاز هستند.

## ۱۳-۱۵ - منحنی ولتاژ و جریان در یک مقاومت اهمی

همان طوری که اشاره شد مقاومت اهمی عنصری است که فقط از خود مخالفت (مقاومت) در برابر عبور جریان الکتریکی نشان می‌دهد. به همین دلیل اثری روی ایجاد فاصله زمانی یا مکانی بین دو موج ولتاژ اعمال شده و جریان عبوری از آن ندارد. در یک مدار اهمی خالص مانند شکل ۱۳-۲۶ بین شکل موج ولتاژ و شکل موج جریان هیچ گونه اختلاف فازی وجود ندارد یا به عبارتی دیگر هم فاز هستند.

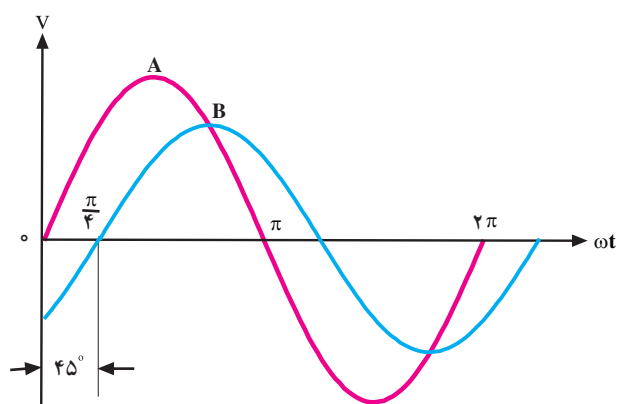


شکل ۱۳-۲۶



شکل ۱۳-۲۳ - شکل موج سینوسی B نسبت به شکل موج سینوسی A تقدم فاز دارد (جلوتر است).

در شکل ۱۳-۲۴ اختلاف فاز بین دو شکل موج سینوسی، ۴۵ درجه است.



شکل ۱۳-۲۴ - اختلاف فاز بین دو شکل موج A و B برابر ۴۵ درجه است.

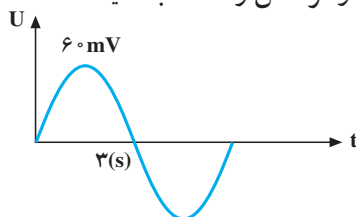
از دو شکل موج A و B، هر دو می‌توانند ولتاژ، هر دو جریان و یا یک شکل موج مربوط به ولتاژ و دیگری مربوط به جریان باشد.

چنانچه دو شکل موج از نظر فاز کاملاً مشابه باشند از کلمه هم‌زمان (هم‌فاز) برای بیان وضعیت دو موج نسبت به هم استفاده می‌شود.

شکل ۱۳-۲۵ دو موج A و B را نشان می‌دهد که نسبت به هم اختلاف فاز ندارند و یا به عبارتی دیگر دو موج A و B



- ۱- هر یک از مفاهیم زیر را تعریف کنید.  
ولتاژ ثابت، ولتاژ متناوب، فرکانس، زمان تناوب، مقدار مؤثر و متوسط یک موج سینوسی
- ۲- دو سیکل کامل یک موج دندانه اره‌ای و مربعی را که دارای مقدار پیک تا پیک  $40^\circ$  ولت است، رسم کنید.
- ۳- مقدار ولتاژ پیک یک موج سینوسی برابر با یک ولت است مقدار مؤثر، متوسط، پیک تا پیک ولتاژ را به دست آورید.
- ۴- با رسم سه موج سینوسی، اختلاف زاویه‌ی آنها را که اولی نسبت به دومی  $30^\circ$  درجه جلوتر و دومی نسبت به سومی  $45^\circ$  درجه جلوتر است، نشان دهید.
- ۵- مقدار ولتاژ لحظه‌ای برق شهر را که دارای فرکانس  $50$  هرتز و مقدار مؤثر  $220^\circ$  ولت است، در زاویه‌های صفر،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $90^\circ$ ،  $180^\circ$ ،  $270^\circ$ ،  $360^\circ$  درجه پیدا کنید.
- ۶- زاویه‌ی فاز  $90^\circ$  برابر با چند رادیان است؟
- ۷- منبع ولتاژ  $220^\circ$  ولت AC را به یک مقاومت  $20$  اهمی اتصال داده‌ایم؛  
الف) مقدار جریان rms در مقاومت را محاسبه کنید.  
ب) فرکانس جریان برق چه قدر است؟ اگر  $\omega = 10^\circ$  رادیان بر ثانیه باشد.  
پ) مقدار اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان را تعیین کنید.  
ت) چه مقدار ولتاژ (dc) مورد نیاز است تا معادل ولتاژ مؤثر در این مقاومت حرارت تولید شود؟
- ۸- فرکانس امواج (AC) زیر چه قدر است؟  
الف - ده سیکل در یک ثانیه  
ب - یک سیکل در  $\frac{1}{3}$  ثانیه  
پ -  $50^\circ$  سیکل در یک ثانیه  
ت -  $50^\circ$  سیکل در  $5$  ثانیه
- ۹- پریود T را برای فرکانس‌های زیر محاسبه کنید.  
الف -  $50^\circ$  هرتز (Hz)  
ب -  $5$  مگا هرتز (MHz)  
پ -  $5$  گیگاهرتز (GHz)
- ۱۰- در شکل ۲۷-۱۳ مقادیر  $U_{rms}$ ، پریود (T) و فرکانس را محاسبه کنید.



شکل ۲۷-۱۳

۱- جریان متناوبی دارای ماکزیم مقدار  $2^\circ A$  است، معادله‌ی زمانی آن را بنویسید و مقدار لحظه‌ای آن را در موقعی که زاویه‌ی  $\alpha$  برابر با  $18^\circ$ ،  $67^\circ$ ،  $136^\circ$ ،  $242^\circ$  و  $326^\circ$  درجه باشد، مشخص کنید.

۲- مقدار لحظه‌ای نیروی محرکه‌ی جریان متناوبی در  $17^\circ$  برابر با  $34/2$  ولت است. مقدار ماکزیم آن چه قدر است؟

(جواب:  $116/97$  ولت)

۳- مقدار لحظه‌ای نیروی محرکه‌ی متناوبی در  $334/4$  درجه برابر با  $190$  ولت است. مقدار ماکزیم آن را به دست آورید.

(جواب:  $439/8$  ولت)

۴- مقدار لحظه‌ای ولتاژ متناوب سینوسی را در  $2\pi$  رادیان به دست آورید؛ در صورتی که مقدار ماکزیم ولتاژ آن  $165$  ولت باشد.

(جواب: صفر)

۵- سیم‌پچی در داخل میدان مغناطیسی دارای حرکت دورانی است. در چه زاویه‌ای مقدار ولتاژ لحظه‌ای  $7^\circ$  برابر مقدار ماکزیم خواهد بود؟

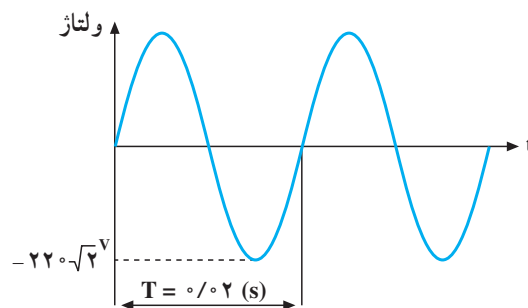
(جواب: تقریباً  $45^\circ$ )

۶- جریانی به معادله‌ی  $i = 100 \sin \omega t$  از یک مقاومت  $10$  اهمی عبور می‌کند. معادله‌ی ولتاژ آن را بنویسید.

(جواب:  $v = 1000 \sin \omega t$ )

۷- مقدار ولتاژ منحنی شکل ۲۸-۱۳ را در  $\frac{T}{4}$  حساب کنید. فرکانس و مقدار مؤثر آن چه قدر است؟

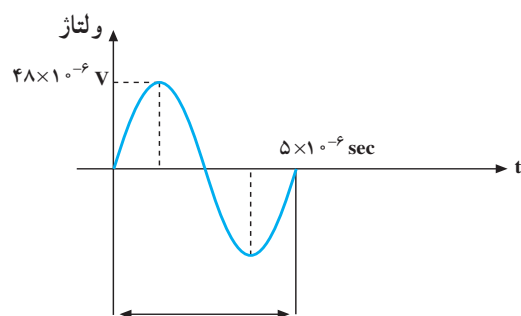
(جواب:  $7^\circ$ ،  $5^\circ$  هرتز،  $22^\circ$  ولت)



شکل ۲۸-۱۳

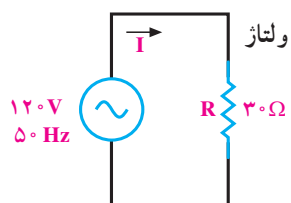
۸- مطلوب است محاسبه‌ی مقادیر مؤثر، زمان تناوب، فرکانس و دامنه P-P شکل ۲۹-۱۳.

(جواب:  $33/9 \mu V$  -  $33 \times 10^{-6} \text{ se}$  -  $200 \text{ KHz}$  -  $96 \mu V$ )



شکل ۱۳-۲۹

۹- در مدار شکل ۱۳-۳۰ شکل موج منبع سینوسی است. مقادیر  $V_{ave}$ ،  $V_{P-P}$ ،  $V_{max}$ ،  $I_t$  و توان (P) را در مقاومت R به دست آورید.



شکل ۱۳-۳۰

## بوبین (سلف)

### هدف‌های رفتاری

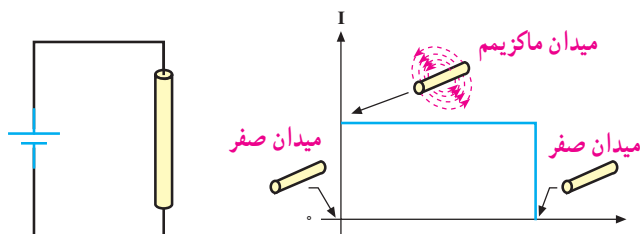
- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود:
- ۱- بوبین را تعریف کند و انواع آن را نام ببرد.
- ۲- میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب را شرح دهد.
- ۳- خودالقا را تعریف کند.
- ۴- مقدار و جهت نیروی محرکه‌ی الکتریکی خودالقا را توضیح دهد.
- ۵- قانون لنز را تعریف کند.
- ۶- ضریب خودالقا و عوامل مؤثر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.
- ۷- رابطه‌ی اندوکتانس و نیروی ضد محرکه را توضیح دهد و نیروی ضد محرکه را محاسبه کند.
- ۸- واحد خودالقا را تعریف کند.
- ۹- بوبین ایده‌آل و واقعی را شرح دهد.
- ۱۰- مقاومت خودالقا و عوامل مؤثر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.
- ۱۱- ثابت زمانی را تعریف و محاسبه کند.
- ۱۲- منحنی‌های ولتاژ داده شده، جریان و نیروی ضد محرکه را تجزیه و تحلیل کند.
- ۱۳- تأثیر هسته‌ی مغناطیسی را در اندوکتانس بیان کند.
- ۱۴- اتصال سری و موازی بوبین‌ها را توضیح دهد و مقادیر معادل را محاسبه کند.
- ۱۵- القای متقابل و ضریب کوپلاژ را توضیح دهد.
- ۱۶- انرژی ذخیره شده در سلف و عوامل مؤثر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.

### ۱۴-۱- تعریف بوبین

بوبین‌هایی را که هسته‌ی فلزی دارند و اغلب دارای تعداد دور استاندارد هستند، در اصطلاح چوک (choke) می‌گویند. چوک‌ها معمولاً حفاظ خارجی دارند؛ مانند: چوک مهتابی، چوک بلندگو و ... از چوک مهتابی در مصارف برقی و از چوک بلندگو در مصارف الکترونیکی استفاده می‌شود.

اگر مقداری سیم به دور محور یا هسته‌ای پیچانده شود، بوبین یا سیم‌پیچ به وجود می‌آید. از هسته علاوه بر اثرات القایی - به جای تکیه‌گاه - جهت پیچاندن و نگهداری سیم استفاده می‌شود. در شکل ۱-۱۴ تعدادی بوبین با هسته‌ی هوایی و فلزی را مشاهده می‌کنید.

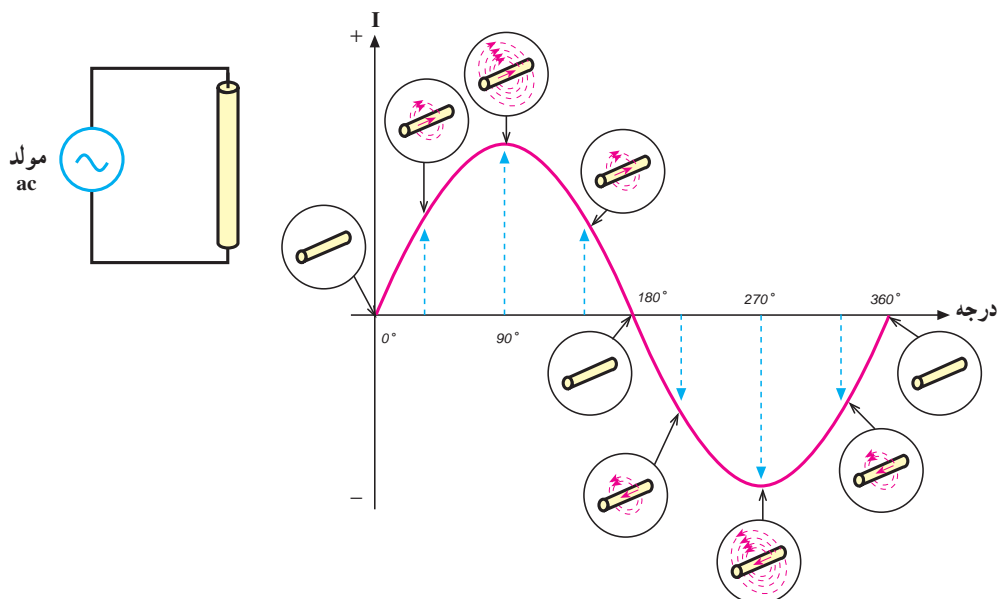
ماکزیم مقدار خود می‌رسد و میدان مغناطیسی در اطراف هادی نیز به ناگاه از صفر به مقدار ماکزیم خود افزایش می‌یابد. تا موقعی که جریان در هادی جاری است، میدان در ماکزیم مقدار خود باقی می‌ماند. چنانچه مدار باز شود جریان، صفر شده و میدان نیز به صفر کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴-۲- میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیله‌ی جریان مستقیم

اگر دو سر یک هادی را مطابق شکل ۱۴-۳ به یک جریان متناوب وصل کنیم، مقدار جریان و در نتیجه، شدت میدان مغناطیسی در اطراف هادی پیوسته تغییر می‌کنند. با اضافه شدن تدریجی جریان، میدان حاصل نیز قوی‌تر می‌شود و برعکس، با کم شدن جریان میدان نیز کم‌تر خواهد شد.

از آنجا که جریان متناوب در هر نیم سیکل تغییر جهت می‌دهد، جهت میدان نیز معکوس می‌شود؛ بنابراین، جهت میدان مغناطیسی در هر لحظه به وسیله‌ی جهت جریان مشخص می‌شود.



شکل ۱۴-۳- میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب



شکل ۱۴-۱- انواع بوبین‌ها با هسته‌های مختلف

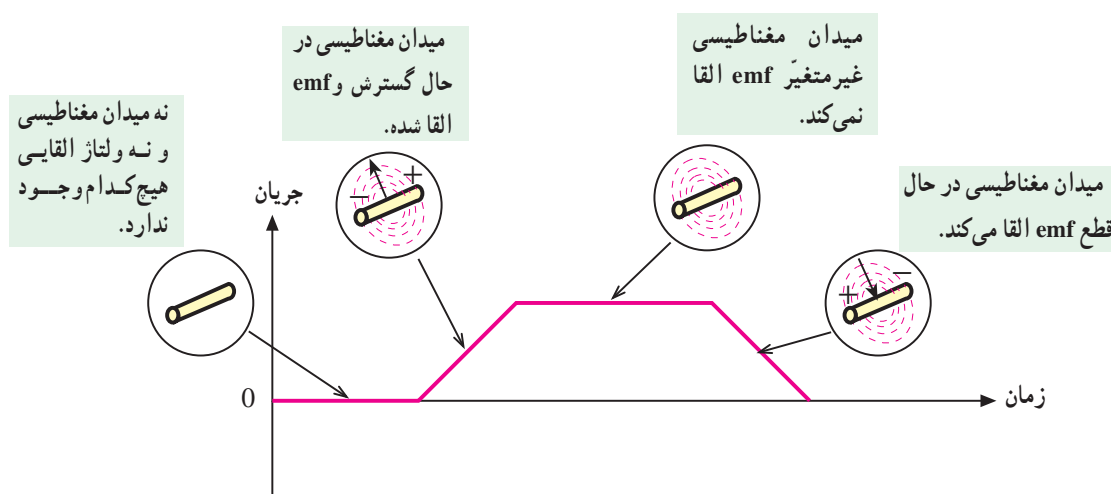
## ۱۴-۲- میدان مغناطیسی حاصل از یک جریان مستقیم و متناوب

اگر دو سر یک هادی را مطابق شکل ۱۴-۲ به یک جریان مستقیم وصل کنیم، شدت جریان به طور ناگهانی از صفر به

### ۱۴-۳- خودالقایی<sup>۱</sup>

با کم شدن میدان و قطع خطوط قوا به وسیله‌ی هادی، باز هم یک نیروی محرکه‌ی الکتریکی در هادی القا می‌شود. بنابراین، افزایش یا کاهش جریان در هادی سبب گسترش یا فروکش کردن میدان مغناطیسی در اطراف آن می‌شود و نیروی محرکه‌ای متناسب با تغییرات میدان در هادی القا می‌گردد. این خاصیت را **خودالقایی** می‌گویند. توجه داشته باشید که اگر جریان عبوری از هادی ثابت باشد، میدان مغناطیسی ایجاد شده نیز ثابت خواهد بود و لذا نیروی محرکه‌ای در هادی القا نمی‌شود. شکل ۱۴-۴

با طی نیم پرپود از جریان متناوب عبوری از یک هادی، میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و سپس به تدریج از بین می‌رود. در نیم سیکل بعدی نیز میدان در جهت مخالف ایجاد می‌شود و به تدریج از بین می‌رود. زمانی که میدان مغناطیسی در حال ایجاد شدن است، خطوط قوای مغناطیسی از مرکز هادی به طرف خارج گسترش می‌یابند. میدان در حال گسترش به وسیله‌ی هادی قطع می‌شود و یک نیروی محرکه‌ی الکتریکی (emf)<sup>۲</sup> در هادی تولید می‌گردد.



شکل ۱۴-۴- نمایش تولید emf

مقدار نیروی محرکه‌ی القا شده؛ با فرکانس جریان متناسب است. با افزایش فرکانس، نیروی محرکه‌ی القا شده افزایش و با کاهش فرکانس نیروی محرکه القا شده، کاهش می‌یابد. مقدار جریان نیز از عوامل دیگری است که مقدار نیروی محرکه‌ی القا شده را معین می‌کند؛ یعنی، هر چه شدت جریان عبوری از هادی بیش‌تر باشد، میدان ایجاد شده قوی‌تر و هرچه جریان کم‌تر باشد، میدان ایجاد شده ضعیف‌تر می‌شود. پس به‌طور کلی می‌توان گفت که مقدار نیروی محرکه‌ی القا شده (خودالقا) به دامنه و فرکانس جریان عبوری از هادی بستگی دارد. شکل ۱۴-۵ عوامل ذکر شده را به خوبی نشان می‌دهد.

### ۱۴-۴- مقدار نیروی محرکه‌ی الکتریکی خودالقا

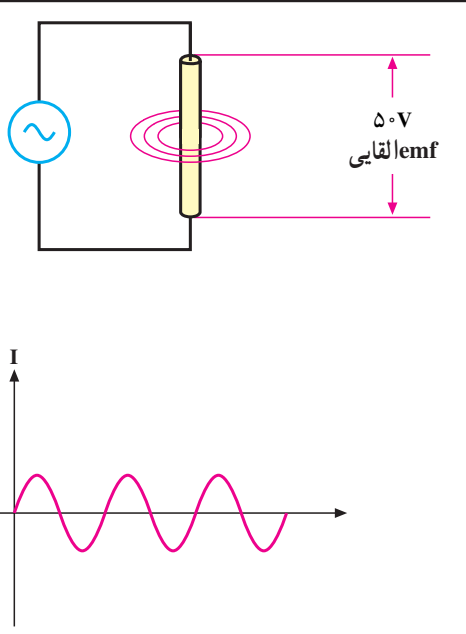
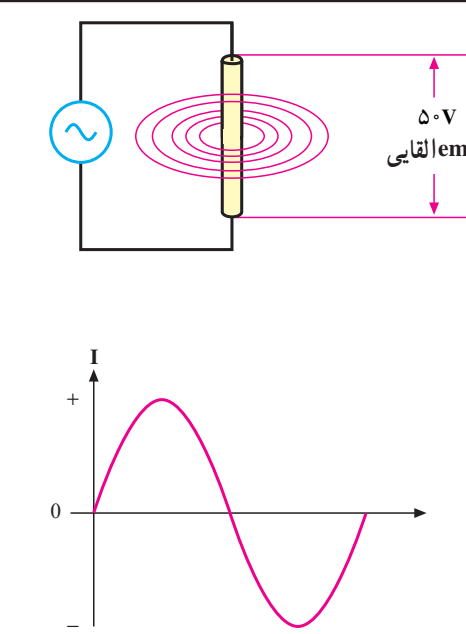
نیروی محرکه‌ی الکتریکی القا شده در یک هادی به وسیله‌ی تغییر در شدت جریان عبوری از آن، همانند هر نیروی محرکه‌ای دارای مقدار و جهت است. از جمله عواملی که مقدار نیروی محرکه‌ی القا شده را معین می‌کند، میزان تغییرات شدت میدان مغناطیسی است. به طوری که می‌توان نوشت:

$$\text{مقدار emf} = \frac{\Phi}{\Delta T}$$

و  $\Delta T$  تغییرات زمان را نشان می‌دهد. شدت میدان مغناطیسی به سرعت تغییرات جریان یا تغییرات فرکانس بستگی دارد؛ بنابراین

۱- self-induction

۲- Electro motive force یا نیروی الکتروموتوری

جریان با فرکانس زیاد و دامنه‌ی کم	جریان با فرکانس پایین و دامنه‌ی زیاد
	
جریان‌های فرکانس بالا می‌توانند emf‌های قوی ایجاد کنند؛ علی‌رغم این که دامنه‌شان نسبتاً کم است.	جریان‌های فرکانس پایین اگر دامنه‌شان زیاد باشند، می‌توانند emf‌های قوی ایجاد کنند.

شکل ۱۴-۵- تأثیر دامنه و فرکانس جریان بر مقدار emf القایی

## ۱۴-۵- جهت نیروی محرکه‌ی خودالقایی

شاید تصور شود که پلاریته یا جهت نیروی محرکه‌ی القایی همیشه باید در جهت جریان به وجود آورنده‌ی آن باشد. این تصور درست نیست. می‌دانیم که افزایش جریان هادی از صفر تا مقدار ماکزیمم، سبب افزایش میدان مغناطیسی و نیروی محرکه‌ی القایی می‌شود. اگر نیروی محرکه‌ی القا شده در همان جهت جریان باشد، شدت جریان را افزایش می‌دهد. افزایش جریان، نیروی محرکه‌ی بیش‌تری را سبب می‌شود و افزایش نیروی محرکه نیز به نوبه‌ی خود افزایش جریان را به دنبال دارد. این دوره‌ی تناوب تکرار می‌شود تا جایی که عنصری را در مدار می‌سوزاند اما می‌دانیم که چنین اتفاقی نمی‌افتد؛ یعنی جهت نیروی محرکه‌ی القایی همیشه طوری است که اثر آن مخالف با

تغییر جهت جریان به وجود آورنده‌ی آن است.

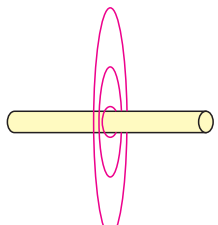
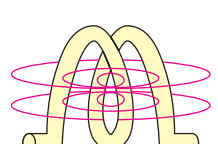
## ۱۴-۶- قانون لنز

در سال ۱۸۳۴ یک فیزیک‌دان آلمانی به نام **لنز**<sup>۱</sup> قانونی را به جهانیان ارائه داد که بیانگر جهت نیروی محرکه‌ی القایی در یک هادی بود و ما اکنون آن را به نام **قانون لنز** می‌شناسیم. بر اساس قانون لنز، هر تغییر در جریان عبوری از یک هادی باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی خودالقایی می‌شود که اثر آن با جهت تغییرات جریان مخالفت می‌کند؛ به عبارت دیگر، هنگامی که جریان کاهش می‌یابد، نیروی محرکه‌ی القایی در جهتی است که با کاهش جریان مخالفت می‌کند و هنگامی که جریان افزایش می‌یابد، باز جهت نیروی محرکه‌ی خودالقایی طوری است که با

۱- نام این فیزیک‌دان آلمانی Heinrich F.E. Lenz است.

بیشتر باشد، نیروی ضد محرکه‌ی تشکیل شده قوی‌تر خواهد بود. به طوری که می‌توان نوشت:  $\text{Cemf} = -N \frac{\Phi}{\Delta t}$  که در این رابطه،  $N$  تعداد دور سیم پیچ است.

شکل ۷-۱۴ تأثیر شکل فیزیکی هادی بر خودالقای ایجاد شده را نشان می‌دهد.

هادی مستقیم		خطوط میدان، هادی را تنها در یک نقطه قطع می‌کنند.
هادی بویین شکل		خطوط میدان، هادی را در بیش از یک نقطه قطع می‌کنند.

اگر هادی بویین شکل باشد، نیروی ضد محرکه‌ی بیش‌تری بر اثر خودالقا ایجاد می‌گردد.

شکل ۷-۱۴- نیروی ضد محرکه در یک هادی صاف و یک سیم پیچ

## ۸-۱۴- اندوکتانس یا ضریب خودالقا

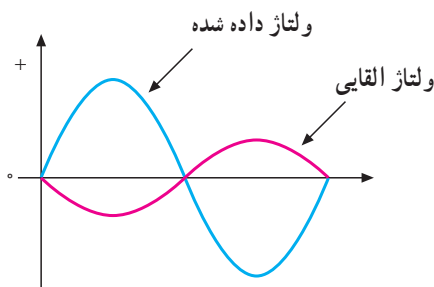
هرگاه تعداد خطوط قوای قطع شده توسط یک هادی در واحد زمان را در ضریبی که توسط شکل هادی تعیین می‌شود ضرب کنیم، مقدار نیروی ضد محرکه‌ی ایجاد شده در آن به دست می‌آید؛ یعنی:

$$U_{\text{Cemf}} = L \times \frac{\text{تغییرات جریان}}{\text{تغییرات زمان}}$$

ضریب مورد بحث - یعنی  $L$  - را که مقدار آن به شکل هادی بستگی دارد، ضریب خودالقا یا اندوکتانس آن هادی می‌گویند. قبلاً گفتیم که نیروی ضد محرکه‌ی القا شده در یک سیم پیچ، بسیار قوی‌تر از نیروی محرکه‌ی القا شده در یک هادی است؛ زیرا اندوکتانس یک هادی مستقیم بسیار کوچک و اندوکتانس یک سیم پیچ - بسته به تعداد حلقه‌های آن - نسبتاً بزرگ می‌باشد.

افزایش جریان مخالفت می‌کند. شکل ۶-۱۴ رابطه‌ی بین ولتاژ یا نیروی محرکه‌ی القا شده را با ولتاژی که باعث ایجاد جریان می‌شود (ولتاژ داده شده)، با اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه نشان می‌دهد.

با زیاد یا کم شدن ولتاژ داده شده در یک جهت، نیروی محرکه‌ی القا شده در جهت مخالف آن زیاد یا کم می‌شود. از آنجا که عمل نیروی محرکه‌ی القایی مخالف با ولتاژ داده شده است، آن را نیروی ضد محرکه‌ی القایی می‌نامند و با  $\text{Cemf}$  نمایش می‌دهند. مقدار آن را از رابطه‌ی  $\text{Cemf} = -\frac{\Phi}{\Delta t}$  محاسبه می‌کنند.



شکل ۶-۱۴- نیروی محرکه‌ی القایی همیشه با ولتاژ داده شده مخالفت می‌کند.

## ۷-۱۴- تأثیر شکل هادی بر خودالقایی

پیش از این دو عامل دامنه و فرکانس جریان را که بر خودالقایی مؤثرند، بررسی کردیم. عامل سومی که بر خودالقایی تأثیر می‌گذارد، شکل فیزیکی هادی است که مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

تاکنون از هادی‌های مستقیم برای مطالعه‌ی میدان مغناطیسی و نیروی ضد محرکه‌ی القایی ایجاد شده کمک می‌گرفتیم. اکنون اگر یک هادی به صورت بویین (سیم پیچ) باشد اولاً، به دلیل این که طول آن بیش‌تر است، نیروی ضد محرکه‌ی بیش‌تری القا می‌شود. ثانیاً چون هر خط میدان، در بیش از یک نقطه از هادی نیروی ضد محرکه‌ی القایی ایجاد می‌کند، نیروی ضد محرکه‌ی حلقه‌ها به هم کمک کرده نیروی ضد محرکه‌ی قوی‌تری تشکیل می‌شود. هر چه تعداد حلقه‌های یک سیم پیچ

## ۹-۱۴ عوامل مؤثر در ضریب خودالقا (اندوکتانس)

عوامل مؤثر در ضریب خودالقا یا اندوکتانس یک سلف را به دو دسته تقسیم می‌کنیم:

الف - جنس هسته

ب - عوامل فیزیکی

**الف - جنس هسته:** همان‌طور که می‌دانیم، اصولاً سلف از یک سیم پیچ درست شده است و ماده‌ای که سیم به دور آن پیچیده می‌شود، **هسته** نام دارد. این هسته‌ها ممکن است از مواد مغناطیسی یا غیرمغناطیسی باشند. هسته‌های با مواد مغناطیسی، خطوط قوای مغناطیسی ایجاد شده توسط سیم پیچ را به راحتی از خود عبور می‌دهند؛ یعنی قابلیت نفوذپذیری (ضریب نفوذ) آن‌ها زیاد است. این مواد را معمولاً مواد **فرومغناطیسی** می‌نامند.

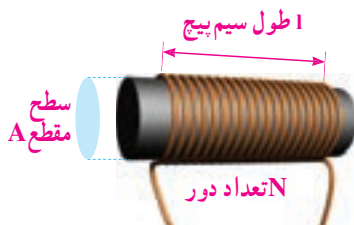
ضریب نفوذ هسته را با حرف  $\mu$  (مو) مشخص می‌کنند. ضریب نفوذ مغناطیسی هسته تعیین کننده‌ی ضعف میدان مغناطیسی در هسته است. ضریب نفوذ مواد ( $\mu$ ) نسبت به ضریب نفوذ هوا ( $\mu_0$ ) سنجیده و به صورت  $\mu_r \cdot \mu_0 = \mu$  بیان می‌شود. در این رابطه  $\left(\frac{H}{m}\right)^{-1} \cdot 10^{-7} = 4\pi \times 10^{-7}$  برای مواد فرومغناطیسی بزرگ‌تر از  $10^6$  و برای مواد غیرمغناطیسی حدود یک است.

**ب - عوامل فیزیکی:** پارامترهای زیر - همان‌گونه که در شکل ۸-۱۴ نشان داده شده است - بر اندوکتانس سلف مؤثرند.

۱- تعداد دور سیم پیچ

۲- طول سیم پیچ

۳- سطح مقطع هسته



شکل ۸-۱۴ پارامترهای مهم در یک سلف

اندوکتانس در حقیقت یکی از خصوصیت‌های فیزیکی یک هادی یا سیم پیچ است اما اغلب آن را بر اساس تأثیری که بر عبور جریان دارد، تعریف می‌کنند. بنابراین، اندوکتانس عبارت است از خاصیت هر هادی در مقابل هر تغییر در شدت جریان عبوری از آن. لذا بدیهی است که اندوکتانس در جریان مستقیم اثری ندارد و تنها اثرش - که مخالف با تغییر شدت جریان است - هنگامی ظاهر می‌شود که شدت جریان متغیر باشد. اندوکتانس در واقع معیاری است برای سنجش این که به ازای هر تغییری در شدت جریان چه مقدار نیروی ضد محرکه تولید می‌شود. پس به طور کلی، اندوکتانس هر سیم پیچ نشان می‌دهد که به ازای یک آمپر در ثانیه تغییر در جریان، چند ولت نیروی محرکه در آن القا می‌گردد.

واحد اندوکتانس هانری<sup>۱</sup> است که از نام دانشمند کاشف آن گرفته شده است. هانری مقدار اندوکتانس یک هادی است، اگر تغییر جریان یک آمپر در ثانیه در آن نیروی ضد محرکه‌ی یک ولت ایجاد کند. چون هانری واحد نسبتاً بزرگی است، غالباً اندوکتانس را برحسب واحدهای کوچک‌تری چون میلی هانری ( $10^{-3} H$ ) و میکروهانری ( $10^{-6} H$ ) به کار می‌برند. از آنجا که مقدار نیروی ضد محرکه‌ی ایجاد شده در هادی جزئی از تعریف هانری است، مقدار نیروی محرکه را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد.

$$U_{Cemf} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

علامت منفی نشان می‌دهد که نیروی ضد محرکه‌ی ایجاد شده، با ولتاژ داده شده در فاز مخالف است.

**مثال ۱:** در یک بوبین اگر شدت جریان در یک ثانیه از ۵۰۰ میلی آمپر به ۱۰۰ میلی آمپر برسد و نیروی ضد محرکه‌ای مساوی یک ولت در آن تولید کند، مقدار ضریب خودالقا (اندوکتانس) بوبین را به دست آورید.

$$U_{Cemf} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -L \frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1} \quad \text{راه حل:}$$

$$1V = -L \frac{(0/10^{-3} / 5)A}{1sec}$$

$$L = \frac{1}{0/4} = 2/5H$$

۱- ژوزف هانری نام فیزیک‌دان آمریکایی است که همراه با مایکل فاراده خاصیت القایی را کشف کرده است.

۲-  $\Delta i$  و  $\Delta t$  که دلالتی بر تغییرات شدت جریان و تغییرات زمان است.

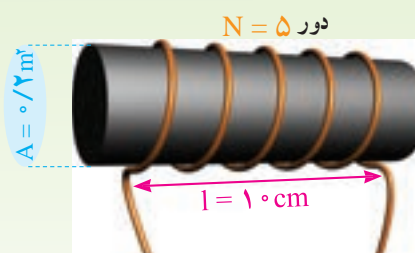
اندوکتانس با توجه به عوامل مؤثر در آن به صورت زیر نوشته می‌شود.

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

$L$  اندوکتانس بر حسب هانری،  $\mu$  ضریب نفوذ هسته بر حسب هانری بر متر،  $A$  سطح مقطع هسته بر حسب مترمربع و  $l$  طول سیم پیچی بر حسب متر است.

مثال ۲: با توجه به شکل ۹-۱۴ مقدار اندوکتانس بوبین

چه قدر است؟



شکل ۹-۱۴

راه حل:

$$L = \frac{\mu \cdot A \cdot N^2}{l} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 0.001 / 2 \times 5^2}{10 \times 10^{-2}} = 62.8 \mu H$$

## ۱۰-۱۴- ثابت زمانی

در یک مدار مقاومتی جریان مستقیم، شدت جریان به طور لحظه‌ای تغییر می‌کند؛ یعنی، با بستن کلید، جریان به طور ناگهانی از صفر به ماکزیمم و با قطع کلید، دفعه‌تاً از ماکزیمم به صفر می‌رسد. در صورتی که اگر بوبینی به مدار اضافه شود، جریان دیگر نمی‌تواند به این صورت تغییر کند؛ بنابراین، با بستن کلید، جریان سعی دارد به طور آنی افزایش یابد اما نیروی ضد محرکه‌ی ایجاد شده با افزایش آنی جریان مخالفت می‌کند. در نتیجه، مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان به مقدار ماکزیمم

خود برسد. با قطع کلید نیز جریان به طور آنی به صفر نمی‌رسد؛ زیرا نیروی ضد محرکه‌ی تولید شده، با این تغییر سریع مخالفت می‌کند. لذا جریان به تدریج به صفر می‌رسد.

طی این تغییرات، رابطه‌ای مابین جریان به دست آمده و مدت زمان رسیدن به این جریان، به وجود می‌آید که به وسیله‌ی کمیّتی به نام ثابت زمانی بیان می‌شود و آن را با حرف  $\tau$  (تاو) نمایش می‌دهند. بر حسب تعریف، ثابت زمانی به مدت زمانی گفته می‌شود که جریان در یک سلف به  $63/2\%$  درصد مقدار ماکزیمم یا مینیمم خود برسد. مقدار ثابت زمانی در یک مدار سلفی به مقدار مقاومت ( $R$ ) و اندوکتانس ( $L$ ) بستگی دارد و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\tau = \frac{L}{R}$$

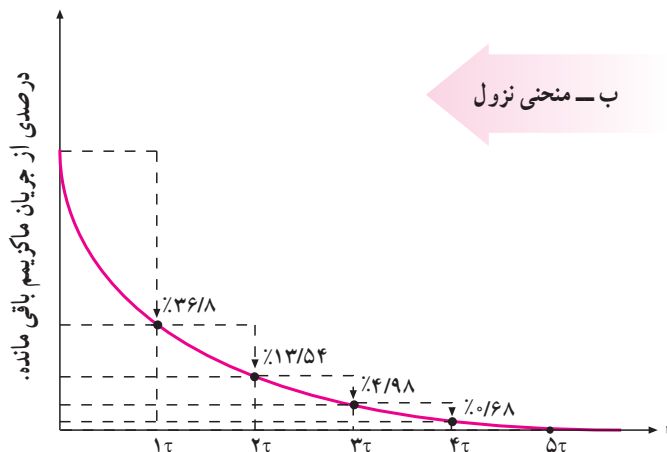
همان گونه که از رابطه‌ی گفته شده برمی‌آید، ثابت زمانی با اندوکتانس نسبت مستقیم و با مقاومت، نسبت عکس دارد؛ بنابراین، هرچه اندوکتانس بزرگ‌تر یا مقاومت کوچک‌تر باشد، ثابت زمانی طولانی‌تر خواهد شد و برعکس. اگر اندوکتانس ( $L$ ) بر حسب هانری و مقاومت ( $R$ ) بر حسب اهم باشد، ثابت زمانی ( $\tau$ ) بر حسب ثانیه به دست خواهد آمد.

معمولاً ۵ ثابت زمانی طول می‌کشد تا جریان در یک سلف به مقدار ماکزیمم یا مینیمم خود برسد. مقدار درصد افزایش یا کاهش شدت جریان را در ثابت‌های زمانی مختلف با توجه به منحنی‌های شکل ۱۱-۱۴ تحت عناوین صعود و نزول جریان بررسی می‌کنیم.

در ثابت زمانی اول جریانی به اندازه‌ی  $63/2\%$  درصد کل جریان نهایی از سیم پیچ می‌گذرد. در ثابت زمانی دوم، جریان به  $86/4\%$  درصد می‌رسد. در ثابت‌های زمانی سوم، چهارم و پنجم نیز به همین منوال. به طوری که در ثابت زمانی پنجم تقریباً به مقدار حداکثر خود می‌رسد. منحنی ۱۱-۱۴ الف روند افزایش جریان و مقادیر هر ثابت زمانی را نشان می‌دهد.

۱- این فرمول در حالتی صادق است که  $l$  از قطر مقطع هسته بسیار بزرگ‌تر باشد.

در ۵ ثابت زمانی، جریان به کم‌تر از ۱٪ مقدار ماکزیمم سقوط می‌کند. که عملاً همان صفر است.



شکل ۱۱-۱۴ - منحنی صعود و نزول شدت جریان در مدار سلفی

مثال ۴: در مثال ۳ اگر بویینی با اندوکتانس ۲۰ mH به جای بویین ۱۰ mH قرار گیرد، ثابت زمانی چگونه تغییر می‌کند؟  
راه حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{20 \times 10^{-3}}{2} = 10 \text{ (ms)}$$

با توجه به رابطه‌ی فوق و مقدار به دست آمده، ثابت زمانی دوبرابر می‌شود.

مثال ۵: حداکثر جریان در یک مدار RL، ۱۰ آمپر است. مقدار جریان صعودی در پایان ثابت زمانی دوم چه قدر است؟

مقدار جریان در پایان ثابت زمانی اول

$$I_1 = 10 \times \frac{63/2}{100} = 6.32 \text{ (A)}$$

باقیمانده‌ی جریان

$$10 - 6.32 = 3.68 \text{ (A)}$$

افزایش جریان در ثابت زمانی دوم

$$3.68 \times \frac{63/2}{100} = 2.32 \text{ (A)}$$

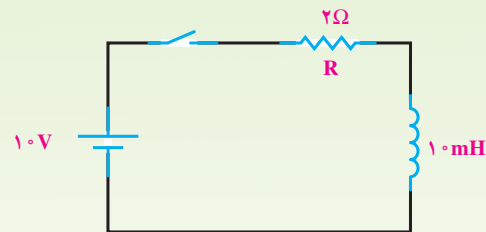
مقدار جریان در پایان ثابت زمانی دوم

$$I_2 = 6.32 + 2.32 = 8.64 \text{ (A)}$$

تمرین: مقدار جریان را در پایان ثابت زمانی سوم و چهارم به دست آورید.

با قطع جریان در مدار - همان گونه که در منحنی شکل ۱۱-۱۴ - ب مشهود است - در ثابت زمانی اول جریان به اندازه‌ی ۶۳/۲ درصد از مقدار ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند و به ۳۶/۸ درصد می‌رسد. در ثابت زمانی دوم به ۱۳/۶ درصد می‌رسد. در ثابت‌های زمانی سوم، چهارم و پنجم کاهش جریان به همین منوال ادامه پیدا می‌کند و در ثابت زمانی پنجم تقریباً به صفر می‌رسد.

مثال ۳: در مدار شکل ۱۴-۱ پس از بستن کلید، مدت زمانی را که شدت جریان به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد، حساب کنید.



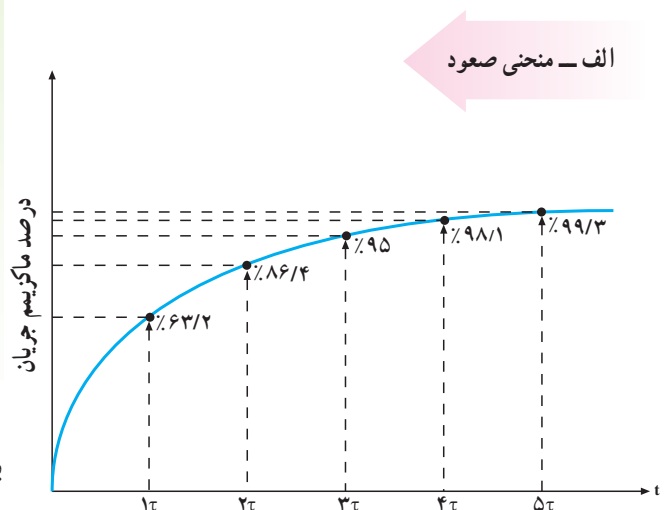
شکل ۱۴-۱۰

حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{10 \times 10^{-3} \text{ (H)}}{2 \text{ (}\Omega\text{)}} = 5 \text{ (ms)}$$

$$5\tau = 5 \times 5 \text{ ms} = 25 \text{ (ms)}$$

در طول ۵ ثابت زمانی، جریان به ۹۹٪ مقدار ماکزیمم می‌رسد. این مقدار عملاً همان ۱۰۰٪ است.



الف - منحنی صعود

## ۱۱-۱۴- بوبین در جریان متناوب

باشد، مقاومت القایی بیش‌تر و هر چه فرکانس کم‌تر باشد، مقدار مقاومت القایی کم‌تر خواهد بود.

از طرفی،  $2\pi f$  همان سرعت زاویه‌ای ( $\omega$ ) است که سرعت تغییرات جریان را نمایش می‌دهد و برحسب رادیان بر ثانیه بیان می‌شود. هر قدر جریان با سرعت بیش‌تری تغییر کند، افت ولتاژ القایی در دو سر سلف نیز زیادتر خواهد شد. بنابراین، با توجه به قانون اهم می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت.

$$X_L = 2\pi f L = \frac{U_L}{I_L}$$

## ۱۳-۱۴- اتصال بوبین‌ها

برای دست‌یابی به اندوکتانس مناسب، اغلب مجبوریم بوبین‌ها را به طور سری یا موازی ببندیم. در چنین مواردی، بدون در نظر گرفتن اثر میدان‌ها بر یک دیگر، اندوکتانس کل عیناً شبیه مقاومت معادل در مدارهای سری و موازی به دست می‌آید.

**الف- اتصال سری بوبین‌ها:** با اتصال پی‌درپی (متوالی) بوبین‌ها، اندوکتانس کل برابر مجموع تک‌تک اندوکتانس‌های موجود در مدار است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$L_t = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

در صورت مساوی بودن اندوکتانس‌ها، اندوکتانس کل برای  $n$  بوبین برابر است با

$$L_t = nL$$

**ب- اتصال موازی بوبین‌ها:** در اتصال موازی بوبین‌ها اندوکتانس کل از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\frac{1}{L_t} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

در صورت مساوی بودن بوبین‌ها اندوکتانس کل برای  $n$  بوبین، برابر است با

$$L_t = \frac{L}{n}$$

برخلاف مدارهای DC که در آن‌ها جریان فقط هنگام باز و بسته شدن مدار تغییر می‌کند، در مدارهای AC جریان پی‌درپی تغییر می‌کند. لذا اندوکتانس اثری دائمی بر کار مدار می‌گذارد؛ یعنی، از لحظه‌ی بسته شدن مدار تا لحظه‌ی قطع مدار اندوکتانس بر عملکرد مدار تأثیر دارد.

بوبین‌ها معمولاً ایده‌آل نیستند. لذا هر بوبین در مدار AC علاوه بر خاصیت القایی از خاصیت اهمی نیز برخوردار است. به علاوه، منبع و سیم‌های رابط نیز مقداری مقاومت دارند. حال اگر این مقاومت‌ها به قدری کوچک باشند که اثرشان بر مدار در مقابل اثر اندوکتانس ناچیز باشد، می‌توان فقط اثر سلفی را در مدار در نظر گرفت و از اثر اهمی آن صرف‌نظر کرد.

## ۱۲-۱۴- مقاومت القایی

می‌دانیم که مقاومت اهمی در مقابل جریان DC و AC به‌ازای ولتاژ ثابتی عکس‌العمل مشابهی دارد اما اگر مداری تنها شامل اندوکتانس باشد، مقدار جریان به نیروی ضدّ محرکه‌ی ایجاد شده بستگی دارد که با عبور جریان مخالفت می‌کند اما چون نیروی ضدّ محرکه ( $E_{cmf}$ ) برحسب ولت بیان می‌شود، نمی‌توان آن را به جای اهم قرار داد و جریان را به دست آورد. لذا تأثیر نیروی ضدّ محرکه بر مدار را می‌توان بر حسب اهم به دست آورد. این اثر را **مقاومت القایی** می‌گویند و با  $X_L$  نمایش می‌دهند.

مقدار نیروی ضدّ محرکه‌ی ایجاد شده در مدار، توسط مقدار  $L$  و فرکانس جریان عبوری از مدار، تعیین می‌شود؛ بنابراین، مقاومت القایی نیز باید وابسته به همین عوامل باشد. یعنی:

$$X_L = 2\pi f L$$

در رابطه‌ی فوق،  $X_L$  مقاومت القایی بر حسب اهم،  $2\pi$  عدد ثابت و برابر  $6.28$  و  $f$  فرکانس جریان برحسب هرتز و  $L$  اندوکتانس است که برحسب هانری در فرمول قرار می‌گیرد. با توجه به رابطه‌ی یاد شده هر چه فرکانس یا اندوکتانس بیش‌تر

$$L_t = 15 + 6 + 10 = 31(\text{mH})$$

۲- اتصال موازی

$$\frac{1}{L_t} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} = \frac{1}{15} + \frac{1}{6} + \frac{1}{10}$$

$$\frac{1}{L_t} = \frac{2+5+3}{30} = \frac{10}{30}(\text{mH})$$

$$L_t = \frac{30}{10} = 3(\text{mH})$$

مثال ۷: در مثال ۶، اگر فرکانس مدار ۱۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شود، مقاومت القایی معادل را در هر حالت به دست آورید.

۱- حالت سری

$$L_t = 31(\text{mH})$$

$$XL_t = 2\pi f L_t = 2 \times 3 / 14 \times 1000 \times 31 \times 10^{-3} ( )$$

$$XL_t = 194 / 68$$

۲- حالت موازی

$$L_t = 3\text{mH}$$

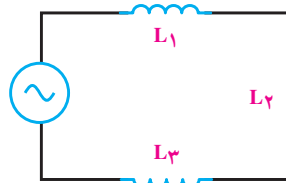
$$XL_t = 2\pi f L_t = 2 \times 3 / 14 \times 1000 \times 3 \times 10^{-3}$$

$$XL_t = 18 / 84$$

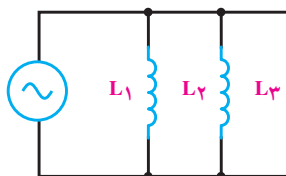
## ۱۴-۱۴- القای متقابل

هرگاه دو سیم پیچ طوری در نزدیکی یک دیگر قرار گیرند که خطوط قوای تولید شده توسط یکی حلقه‌های سیم پیچ دیگری را قطع کند، در سیم پیچ دوم ولتاژی القا می‌شود. ولتاژ القا شده در سیم پیچ دوم - در صورت بسته بودن مدارش با مصرف کننده - به نوبه‌ی خود جریانی را تولید می‌کند که با تولید خطوط قوای جدید، حلقه‌های سیم پیچی اول را قطع می‌کند و در سیم پیچ اول ولتاژی القا می‌شود. به این عمل **القای متقابل** گفته می‌شود؛ یعنی، دو سیم پیچ متقابلاً بر یک دیگر اثر می‌گذارند. با توجه به این که هیچ گونه ارتباط الکتریکی بین دو سیم پیچ وجود ندارد ولی حلقه‌های آن‌ها توسط میدان مغناطیسی با هم در ارتباط‌اند،

شکل‌های ۱۲-۱۴ و ۱۳-۱۴ اتصال سری و موازی را برای سه بوبین که با فاصله‌ی زیاد از یک دیگر قرار دارند (بدون داشتن ارتباط مغناطیسی)، نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۱۴ - اتصال سری بوبین‌ها



شکل ۱۳-۱۴ - اتصال موازی بوبین‌ها

هم‌چنین، برای محاسبه‌ی مقاومت القایی معادل در مدارهای سری و موازی نیز می‌توان مشابه محاسبه‌ی اندوکتانس معادل بوبین‌ها عمل کرد. روابط محاسبه‌ی مقاومت القایی معادل، در مدار سری و موازی به صورت زیر است.

$$\text{مدار سری} \quad X_{L_t} = X_{L_1} + X_{L_2} + \dots + X_{L_n}$$

$$\text{مدار موازی} \quad \frac{1}{X_{L_t}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \dots + \frac{1}{X_{L_n}}$$

تذکر: در هر یک از اتصالات سری یا موازی بوبین‌ها مقاومت القایی کل را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$X_{L_t} = 2\pi f L_t = W \cdot L_t$$

مثال ۶: سه بوبین با اندوکتانس‌های ۱۵ و ۶ و ۱۰ میلی‌هائری یک بار به صورت سری و یک بار به صورت موازی بسته شده‌اند. اندوکتانس کل را در هر حالت به دست آورید.

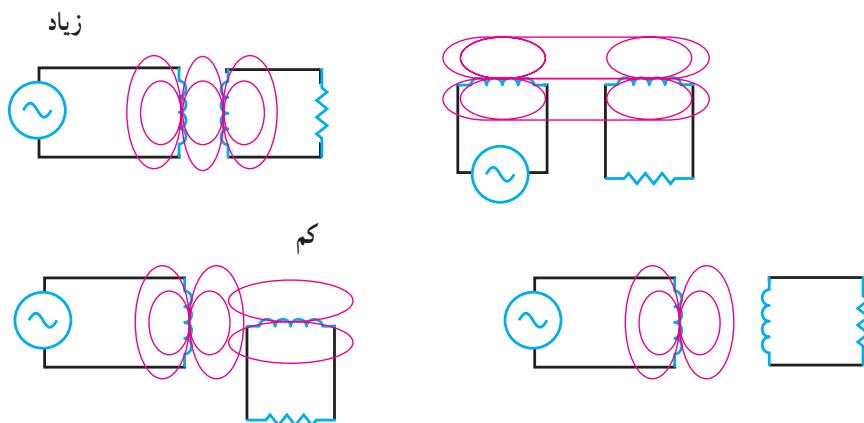
راه حل:

۱- اتصال سری

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3$$

این ارتباط، متقابل است.

از یک خواهد بود. در صورتی که بین دو بوبین هیچ گونه القای متقابلی وجود نداشته باشد، ضریب ترویج برابر صفر خواهد بود. هرگاه ضریب ترویج  $k$  که آن را با حرف  $k$  نمایش می دهند برابر یک باشد، ترویج را کامل یا سفت گویند. چنانچه ضریب ترویج  $(k)$  کم تر از یک باشد، ترویج را ناقص یا سست می گویند. ترویج حداکثر (واحد) زمانی اتفاق می افتد که خطوط قوای یک بوبین، تمام حلقه های بوبین دیگر را قطع کند. شکل ۱۴-۱۴ درجه ی ترویج را در حالت های مختلف نشان می دهد.



شکل ۱۴-۱۴ — نمایش درجه ی ترویج بین بوبین ها

اندوکتانس باشد، نیروی ضد محرکه و تأخیر ایجاد شده توسط اندوکتانس در جریان، بین ولتاژ داده شده و جریان عبوری از آن، اختلاف فاز ایجاد می کند. به عبارت دیگر، جهت نیروی ضد محرکه چنان است که همیشه با تغییرات جریان مخالفت می کند. به علاوه، می دانیم که ولتاژ داده شده با ولتاژ القا شده در سیم پیچ همفاز نیستند و کاملاً در جهت مخالف یک دیگرند. منحنی های شکل ۱۴-۱۵ ارتباط بین منحنی های جریان، ولتاژ داده شده و نیروی ضد محرکه را به خوبی نشان می دهد. زمانی که دامنه ی جریان ماکزیمم است، به دلیل اینکه تغییرات آن صفر است، دامنه ی نیروی ضد محرکه صفر است. زمانی که جریان از صفر می گذرد، تغییرات آن بیش ترین مقدار را دارا است. پس نیروی ضد محرکه بسته به جهت تغییرات جریان، ماکزیمم یا مینیمم می باشد. به تعبیر دیگر در  $90^\circ$  و  $270^\circ$  درجه، جریان تغییرات ناچیزی دارد و ولتاژ داده شده صفر است. لذا نیروی ضد محرکه ای ایجاد نمی شود. در صفر،  $180^\circ$  و  $360^\circ$  درجه تغییرات جریان، زیاد و ولتاژ داده

مقدار ولتاژ القایی ناشی از القای متقابل دو بوبین، به وضع قرار گرفتن آن ها نسبت به یک دیگر و تعداد خطوط قوایی که ارتباط بین دو بوبین را برقرار می کنند، بستگی دارد. درجه ی ارتباط خطوط قوا، توسط ضریبی به نام **ضریب ترویج** بیان می شود. وقتی همه ی خطوط قوای یک بوبین توسط بوبین دیگر قطع شود، ضریب ترویج برابر یک و هرگاه قسمتی از خطوط قوای تولید شده توسط بوبین دیگر قطع شود، ضریب ترویج کم تر

برای نشان دادن میزان القای متقابل بین دو بوبین از ضریبی استفاده می شود، که آن را ضریب القای متقابل می نامند و با حرف  $M$  نمایش می دهند. ضریب القای متقابل به اندوکتانس دو سیم پیچ و ضریب ترویج بین آن ها وابسته است و از رابطه ی زیر محاسبه می شود.

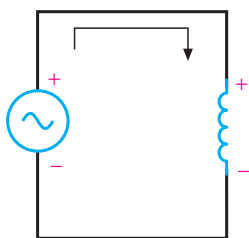
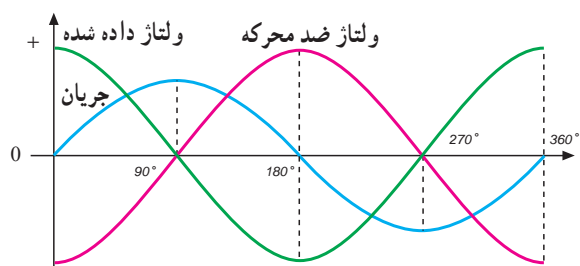
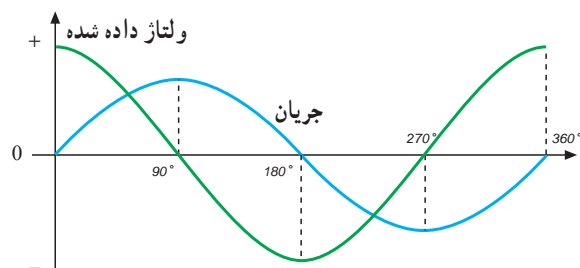
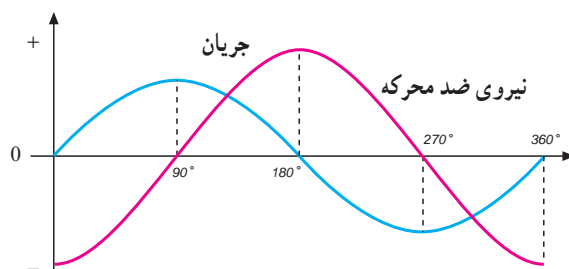
$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

در این رابطه  $M$  ضریب القای متقابل بر حسب هانری  $L_1$  و  $L_2$  اندوکتانس بوبین ها بر حسب هانری و  $k$  ضریب ترویج است که بدون واحد می باشد.

## ۱۴-۱۵ — منحنی جریان و ولتاژ بوبین در جریان متناوب

در یک مدار با مقاومت اهمی اختلاف فاز بین ولتاژ دو سر مقاومت با جریان عبوری از آن برابر صفر است؛ یعنی، جریان با ولتاژ دو سر یک مقاومت هم فاز می باشد. اما اگر مداری شامل

شده ماکزیمم است. لذا حداکثر نیروی ضد محرکه در خلاف جهت ولتاژ داده شده تولید می شود.



شکل ۱۵-۱۴- نمایش منحنی های جریان و ولتاژ داده شده و نیروی ضد محرکه

انرژی ذخیره شده، (W) برحسب وات ثانیه یا ژول است.

مثال ۸: از یک سیم پیچ با ضریب خودالقایی ۳ هانری، جریان مستقیمی برابر با ۶۰ آمپر می گذرد. هنگام قطع این سیم پیچ چه قدر انرژی آزاد می شود؟

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

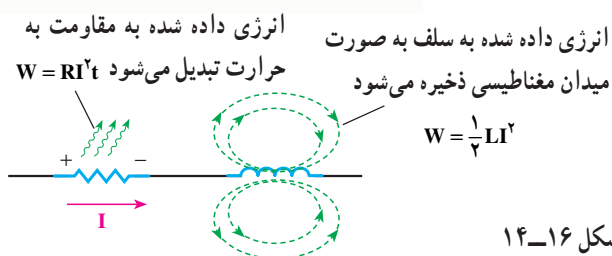
$$W = \frac{1}{2} \times 3 \times (60)^2 = \frac{3 \times 3600}{2} = 5400 \text{ J} = 5.4 \text{ kJ}$$

## ۱۶-۱۴- انرژی ذخیره شده در سلف

میدان مغناطیسی وابسته به جریان در یک سیم پیچ دارای انرژی الکتریکی است که از طریق منبع ولتاژی که جریان را تولید می کند، تأمین می شود. این انرژی در میدان مغناطیسی ذخیره می شود و به اندوکتانس (L) و مجذور جریان بستگی دارد؛ یعنی:

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

در رابطه ی فوق I برحسب آمپر، L برحسب هانری و



شکل ۱۶-۱۴



- ۱- خودالقایی و ضریب خودالقایی را تعریف کنید.
- ۲- تغییرات جریان چه اثراتی بر سیم پیچ می گذارد؟
- ۳- قانون لنز چیست؟
- ۴- اثرات جریان AC و DC را بر سیم پیچ با یک دیگر مقایسه کنید.
- ۵- فرق بین  $emf$  و  $Cemf$  چیست؟
- ۶- عوامل مؤثر بر مقدار ضریب القا و خودالقا کدام اند؟
- ۷- القای متقابل یعنی چه؟
- ۸- اثرات جریان DC در القای متقابل چیست؟
- ۹- اثرات هسته را در سیم پیچ ها توضیح دهید.
- ۱۰- انرژی ذخیره شده در سلف یعنی چه؟
- ۱۱- اثر مقاومت القایی را در جریان متناوب توضیح دهید.
- ۱۲- دلیل سری یا موازی بستن سیم پیچ ها را بیان کنید.
- ۱۳- رابطه ی فازی بین ولتاژ و جریان یک بوبین چیست؟ چرا؟

- ۱- سیم پیچی به طول  $50$  سانتی متر و سطح مقطع  $2/0$  متر مربع با هسته ی هوا دارای  $1000$  دور است؛ اولاً ضریب خودالقایی آن تقریباً چند میلی هانری است؟ ثانیاً اگر بخواهیم ضریب خود القا دو برابر شود، تعداد دور سیم پیچ باید چند دور شود؟  
(جواب:  $50\text{mH}$  و دور  $1410$ )
- ۲- دو بوبین با ضریب خودالقایی  $100$  میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی به هم وصل می کنیم. ضریب خودالقایی کل در هر دو حالت چه قدر می شود؟  
(جواب:  $200$  و  $50$  میلی هانری)
- ۳- ضریب خود القایی سیم پیچی  $2\text{mH}$  و جریان عبوری از آن  $10$  آمپر است. چه مقدار انرژی در سیم پیچ ذخیره می شود؟  
(جواب: ژول  $1$   $W=1$ )
- ۴- چهار بوبین با ضریب های خودالقایی  $50$ ،  $25$ ،  $100$  و  $25$  میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی ببندید. ضریب خودالقایی کل را در هر حالت به دست آورید.

(جواب: ۲۰۰ و ۹ میلی هانری)

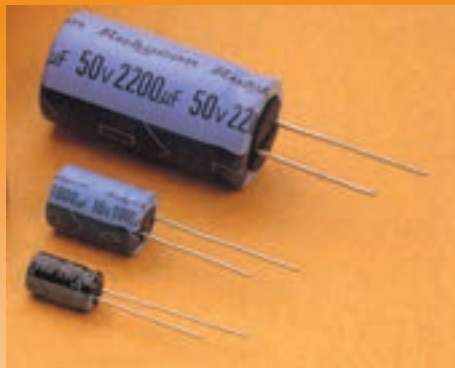
۵- از یک بوبین با ضریب خودالقایی  $10\text{ mH}$  جریان متناوبی با فرکانس  $50^\circ$  هرتز عبور می‌کند. مقاومت القایی بوبین چند اهم است؟ اگر فرکانس به یک کیلو هرتز تغییر یابد، مقاومت القایی بوبین چند اهم می‌شود؟  
(جواب:  $3/14$  و  $62/8$ )

۶- در یک بوبین با ضریب خودالقایی ۳ میلی‌هانری، جریان در مدت دو ثانیه از یک آمپر به ۷ آمپر افزایش می‌یابد و ولتاژ خودالقایی در بوبین چند میلی ولت است؟ اگر ضریب خودالقایی ۳ هانری باشد، ولتاژ القایی چند میلی‌ولت می‌شود؟  
(جواب: ۹- و ۹۰۰۰-)

۷- یک بوبین با ضریب خودالقایی ۲ هانری و مقاومت اهمی  $5^\circ$  اهمی در دست است. اگر این بوبین را به ولتاژ  $1/5$  ولت مستقیم وصل کنیم، ماکزیمم جریان مدار چند آمپر می‌شود؟ چه مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان ماکزیمم شود؟  
(جواب: ۳ آمپر و ۲۰ ثانیه)

## 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.

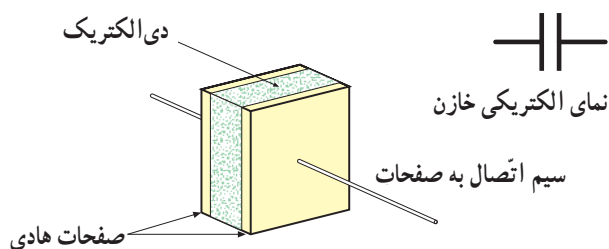
خازن‌ها به اشکال گوناگون ساخته می‌شوند و متداول‌ترین

### 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 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

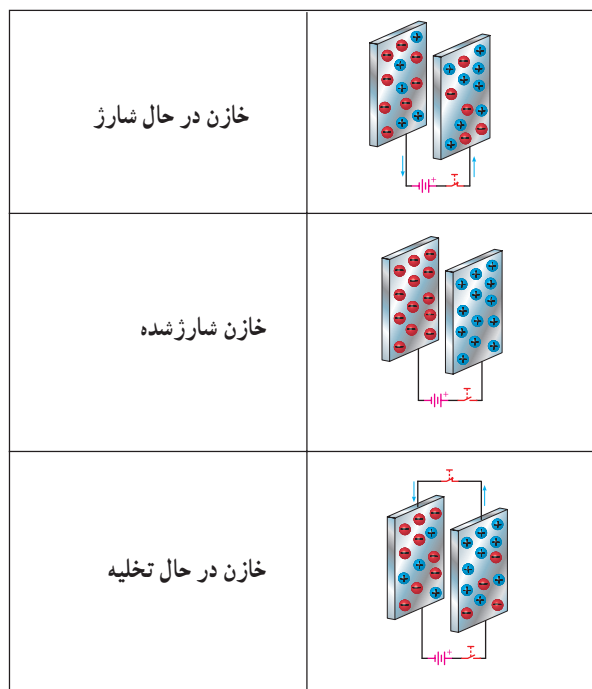
هنگامی که یک خازن شارژ می گردد، یک صفحه ی آن دارای بار منفی و صفحه ی دیگر دارای بار مثبت می شود. چون بار منفی به وسیله یک بار مثبت جذب می شود، الکترون های صفحه ی منفی مایل اند به طرف صفحه ی مثبت بروند اما عایق بین صفحات، امکان این حرکت را نمی دهد. الکترون ها نمی توانند از طریق عایق به طرف صفحه ی مثبت 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.

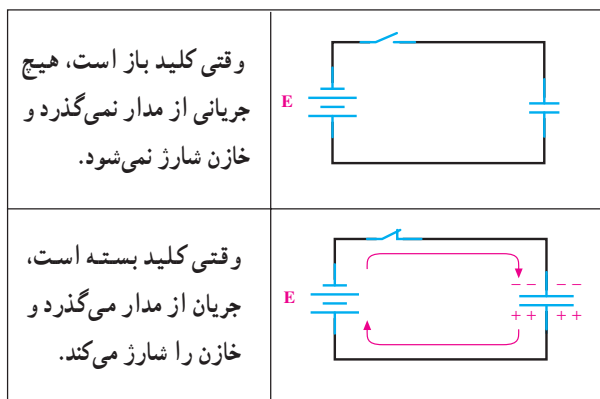
عمل از دست دادن شارژ را **دشارژ شدن** می نامند. برای دشارژ خازن تنها لازم است یک مسیر هادی بین دو صفحه ایجاد شود. با ایجاد مسیر، الکترون های صفحه ی منفی به طرف پتانسیل مثبت در صفحه ی مثبت جاری می شوند. تبادل الکترون بین صفحات آن قدر ادامه پیدا می کند تا صفحات خنثی شوند. در این موقع، خازن هیچ گونه ولتاژی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

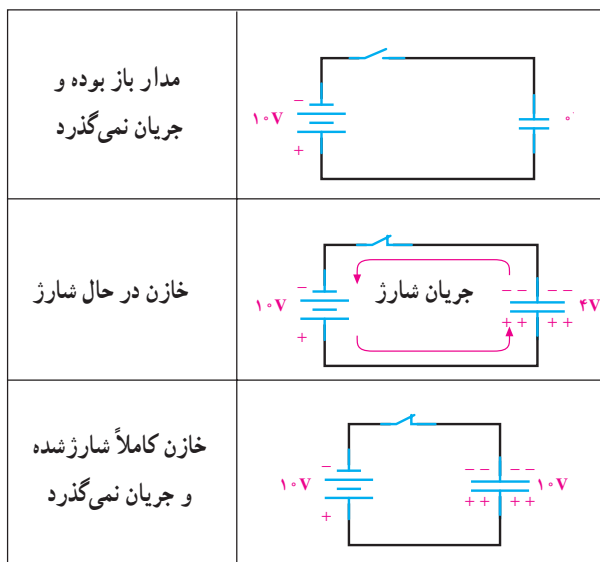
## ۵-۱۵- ظرفیت خازن

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



شکل ۳-۱۵- اتصال باتری و شارژ خازن

باید به این نکته توجه کرد که جریان شارژ و ولتاژ خازن مخالف یک دیگر عمل می کنند؛ یعنی، در ابتدای شارژ جریان ماکزیم و ولتاژ خازن صفر است. هرچه به ولتاژ خازن اضافه می شود، شدت جریان کاهش می یابد. وقتی ولتاژ خازن به مقدار ماکزیم 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

## 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  $40 \mu F$  را به ولتاژ  $50$  ولت اتصال می‌دهیم. مقدار بار ذخیره شده چه قدر است؟  
راه حل:

$$Q = CV$$

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

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

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

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

## ۱۵-۶- عوامل مؤثر بر ظرفیت خازن

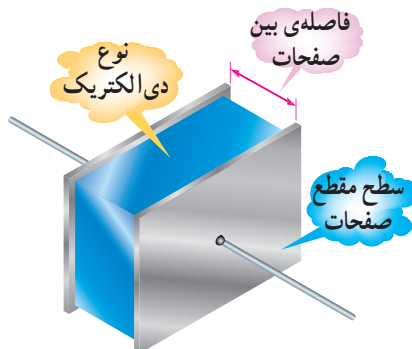
مهم ترین عوامل مؤثر در تعیین ظرفیت خازن عبارت‌اند از:

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 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 ۱-۱۵ واحدهای کوچکتر خازن و ضرایب آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱۵

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

مثال ۱: یک خازن در اثر اعمال  $20$  ولت به دو سر آن باری معادل  $80$  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.

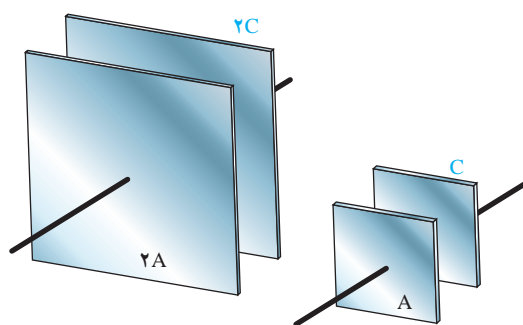
۲- فرکانس ولتاژ دو سر خازن، درجه حرارت و مدت زمانی که خازن مورد استفاده قرار می‌گیرد از عوامل دیگری است که بر ظرفیت خازن تأثیر ناچیزی می‌گذارند؛ به طوری که می‌توان در بعضی مواقع از آن‌ها صرف نظر کرد.

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: همان گونه 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.

کم ترین 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

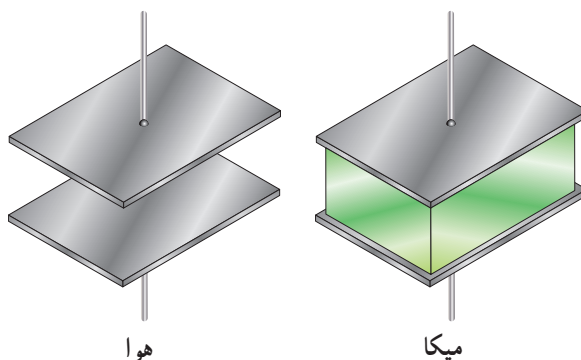
ظرفیت زیاد	ظرفیت متوسط	ظرفیت کم
فاصله‌ی صفحات کم	فاصله‌ی صفحات متوسط	فاصله‌ی صفحات زیاد

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، خلأ، 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  $\epsilon_r$  در نظر می گیرند. مقدار  $\epsilon_r$  برابر است با

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$$

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

$\epsilon_r$  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  $0.5$  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.

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \times 5 \left( \frac{F}{m} \right)$$

$$A = 0.5 m^2$$

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

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

$$C = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 5 \times 0.5}{1 \times 10^{-2}} = 0.00221 \mu f$$

۱- خوانده می شود اسیلون صفر.

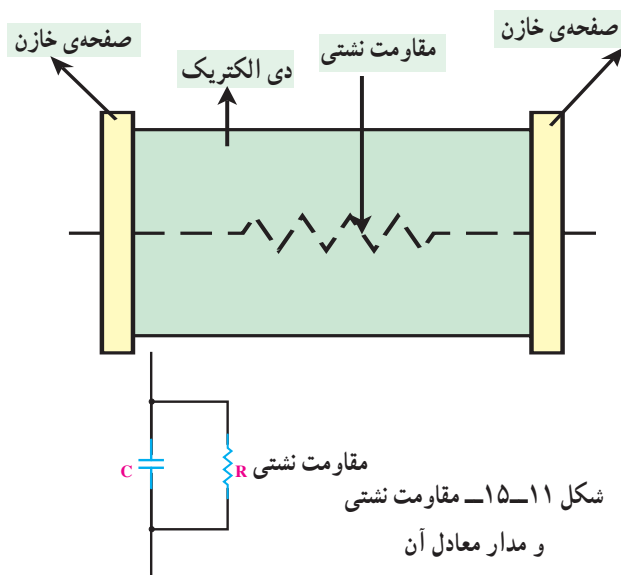
۲-  $254 cm = 1000 \times 0.254 cm = V/mil$   $3947 V/cm$  است.

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

نوع عایق	ضریب دی‌الکتریک ( $\epsilon_r$ )	قابلیت تحمل دی‌الکتریک (V/mil)	قابلیت تحمل دی‌الکتریک V/cm
هوا	۱	۸۰	$394 \times 80$
تفلون	۲	۱۵۰۰	$394 \times 1500$
کاغذ آغشته به پارافین	۲/۵	۱۲۰۰	$394 \times 1200$
روغن	۴	۳۷۵	$394 \times 375$
میکا	۵	۱۵۰۰	$394 \times 1500$
اکسید آلومینیم	۷	۱۶۰۰	$394 \times 1600$
شیشه	۷/۵	۲۰۰۰	$394 \times 2000$
اکسید تانتالیم	۲۶	۱۴۰۰	$394 \times 1400$
سرامیک	۱۲۰۰	۱۰۰۰	$394 \times 1000$

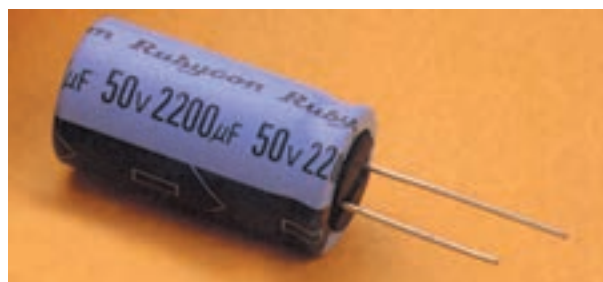
## ۱۵-۹- نشت در خازن‌ها

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.



شکل ۱۵-۱۱- مقاومت نشتی و مدار معادل آن

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  $50V/220\mu F$  نوشته شده است، می‌تواند تا ۵۰ ولت DC را تحمل کند و به کار خود ادامه دهد.



شکل ۱۵-۱۰

## ۱۵-۸- 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.

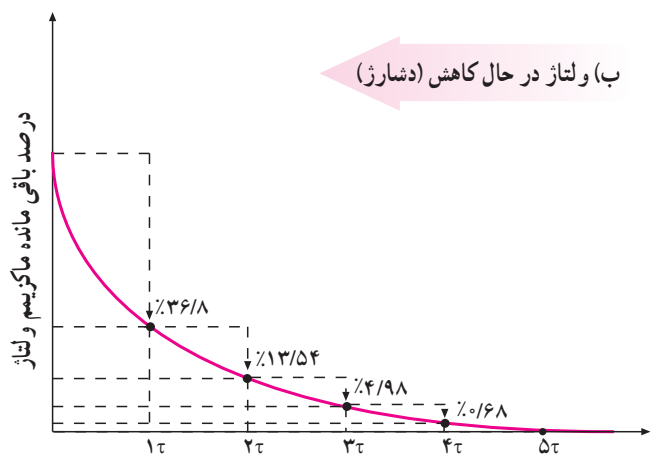
## ۱۰-۱۵- ثابت زمانی خازن

که ولتاژ خازن به  $63/2$  درصد ولتاژ کل آن برسد. در هر ثابت زمانی بعدی، خازن به اندازه  $63/2$  درصد از ولتاژ باقی مانده شارژ می شود. شارژ کل خازن در حدود ۵ ثابت زمانی طول می کشد و خالی شدن خازن نیز در حدود همین مدت زمان انجام می گیرد. در ثابت زمانی اول  $63/2$  درصد از شارژ کامل خازن از بین می رود و در ثابت زمانی های بعدی به ترتیب  $63/2$  درصد از شارژ باقی مانده تخلیه می شود. در انتهای ۵ ثابت زمانی، خازن کاملاً تخلیه شده است. در جدول ۳-۱۵ رابطه ی شارژ و دشارژ با ثابت زمانی و در شکل ۱۲-۱۵ منحنی های شارژ و دشارژ خازن را مشاهده می کنید.

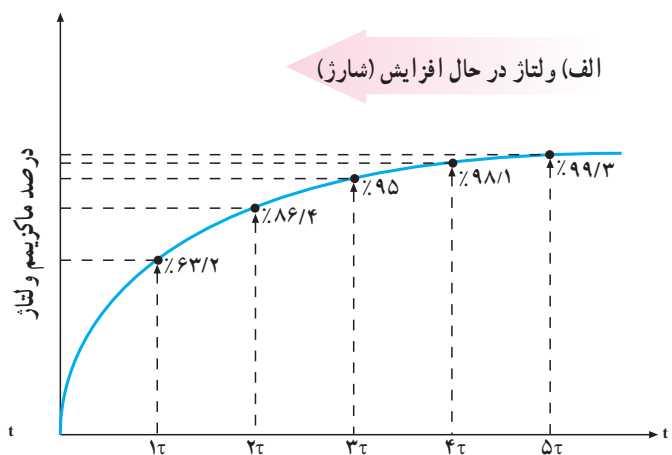
چنانچه خازنی به تنهایی در یک مدار DC قرار گیرد، به سرعت شارژ می شود. شارژ سریع خازن به این دلیل اتفاق می افتد که در مسیر شارژ هیچ گونه مقاومتی وجود ندارد. حال اگر مقاومتی را به مدار اضافه کنیم، وجود آن در مسیر شارژ، زمان شارژ را طولانی تر می کند. مقدار دقیق زمان شارژ به مقدار مقاومت قرار گرفته در مسیر شارژ (R) و ظرفیت خازن (C) بستگی دارد و به کمک رابطه ی زیر مشخص می شود.

$$\tau = RC$$

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



در ۵ ثابت زمانی، ولتاژ به کم تر از ۱٪ مقدار ماکزیمم می رسد که این مقدار عملاً صفر است.



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

شکل ۱۲-۱۵- منحنی های 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 باقی مانده ی 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 مرحله شارژ 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 برحسب فاراد، V ولتاژ دو سر خازن برحسب ولت و W مقدار انرژی ذخیره شده برحسب ژول است.

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

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

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

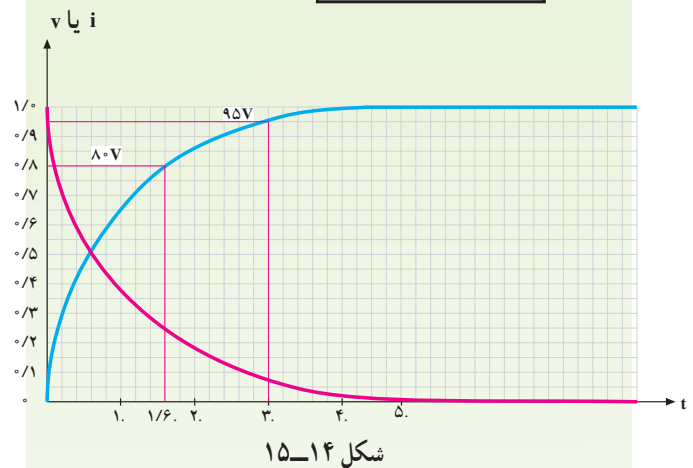
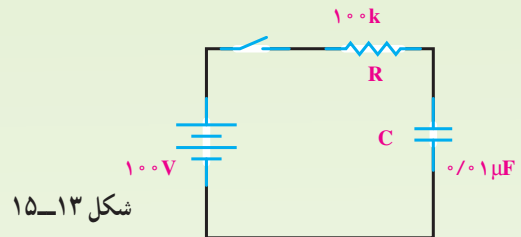
$$W = 0.08 \text{ ژول}$$

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  $3$  میلی ثانیه، ولتاژ دو سر خازن چه قدر می شود؟



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  $63/2$  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 آن جا نیز خطی موازی محور عمودی (ولتاژ) رسم می کنیم تا محور زمان را قطع کند. محل تقاطع محور زمان عدد  $1/6$  را نشان می دهد؛ یعنی،  $1/6$  میلی ثانیه طول می کشد تا خازن به مقدار  $80^\circ$  ولت شارژ شود.  
در  $3$  میلی ثانیه یا  $3$  ثابت زمانی، ولتاژ دو سر خازن به  $95$  ولت می رسد. چرا؟ با رسم خطوطی موازی محورهای مختصات - همان طور که قبلاً گفته شد - مقدار  $95$  ولت به دست می آید.

## ۱۲-۱۵- اتصال خازن‌ها

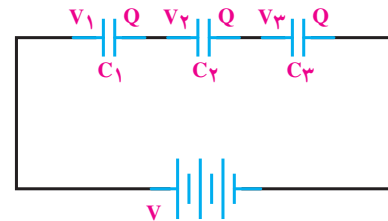
خازن‌ها را بسته به نوع استفاده از آن‌ها می‌توان به سه طریق سری، موازی و مختلط به هم متصل کرد.

**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.

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

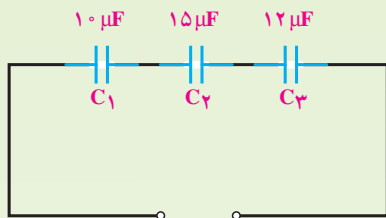
با حذف Q از طرفین رابطه چنین می‌شود:

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

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:

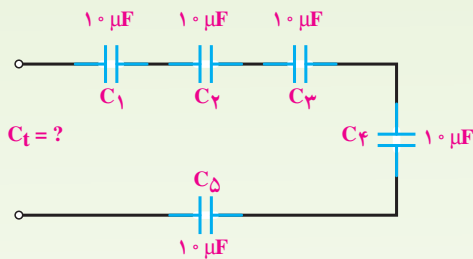
$$C_t = \frac{C}{n}$$

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



$$C_t = ?$$

شکل ۱۵-۱۶



شکل ۱۵-۱۷

راه‌حل: مدار ۱۵-۱۶:

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

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

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

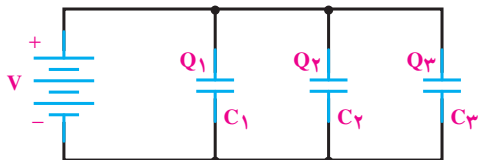
راه‌حل: مدار ۱۵-۱۷:

$$C_t = \frac{C}{n} = \frac{10 \mu F}{5}$$

$$C_t = 2 \mu F$$

**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 زیاده‌تر 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.

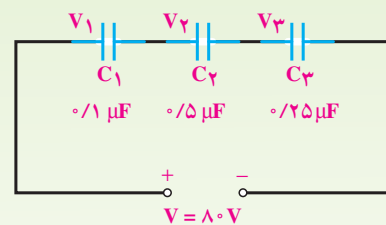
$$C_t = C_1 + C_2 + C_3$$

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:**

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{1} + \frac{1}{5} + \frac{1}{25} = \frac{5+1+2}{5} = \frac{8}{5}$$

$$C_t = \frac{5}{8} \mu F$$

در مدار سری مقدار بار خازن‌ها یکسان و برابر است با

$$Q_t = Q_1 = Q_2 = Q_3 = C_t V = \frac{5}{8} \times 80 = 50 \mu C$$

در این جا ولتاژ دو سر خازن‌ها برابر می‌شود با

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{50}{1} = 50 V$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{50}{5} = 10 V$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{C_3} = \frac{50}{25} = 2 V$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V = 50 + 10 + 2 = 62 V$$

### 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:

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

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

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

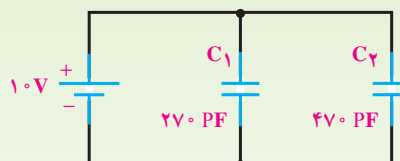
البته می‌توانستیم ابتدا ظرفیت  $C_{3,4}$  را حساب کنیم و سپس ظرفیت معادل را به صورت مجموعه‌ی سه خازن سری به دست آوریم.

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

مدار سری	<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 موازی	<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>

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

دو سر 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.

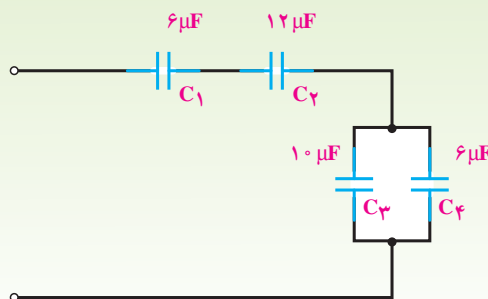
$$C_t = nC_1$$

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

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



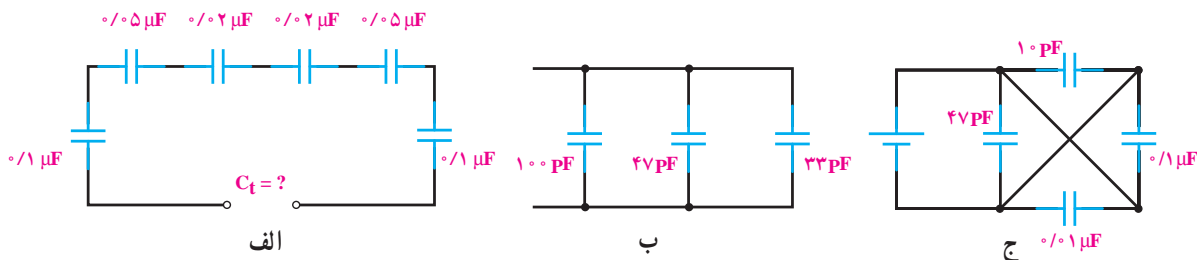
## پرسش

- 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.

## تمرین

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

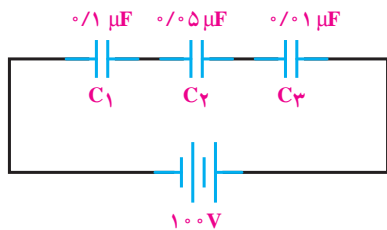
(جواب: ج -  $110.57 \text{ pF}$     ب -  $180 \text{ pF}$     الف -  $6/25 \text{ nF}$ )



شکل ۱۵-۲۲

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

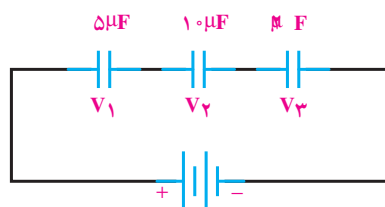
(جواب:  $V_1 = \frac{1000}{13} \text{ V}$ ,  $V_2 = \frac{1000}{65} \text{ V}$ ,  $V_3 = \frac{1000}{13} \text{ V}$ )



شکل ۱۵-۲۳

۳- در مدار شکل ۱۵-۲۴ اگر مقدار بار ذخیره‌شده در مجموعه‌ی خازن‌ها  $۱۰^{-۵}$  میکروکولن باشد، ولتاژ دو سر هر خازن چه قدر است؟

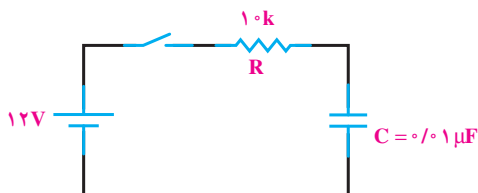
(جواب:  $V_3 = 50V, V_2 = 10V, V_1 = 20V, C_t = 1/25 \mu F$ )



شکل ۱۵-۲۴

۴- در مدار شکل ۱۵-۲۵ اگر خازن خالی باشد و کلید را به مدت  $2 \times 10^{-3}$  میلی ثانیه ببندیم، خازن چه قدر شارژ می‌شود؟

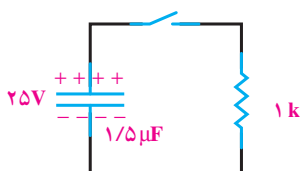
(جواب: شارژ کامل)



شکل ۱۵-۲۵

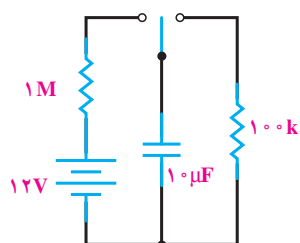
۵- در مدار شکل ۱۵-۲۶ خازن دارای شارژ کامل است. کلید را به مدت  $3 \times 10^{-3}$  میلی ثانیه می‌بندیم. چه ولتاژی از خازن خالی می‌شود؟

(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

## خازن در جریان متناوب

### هدف‌های رفتاری

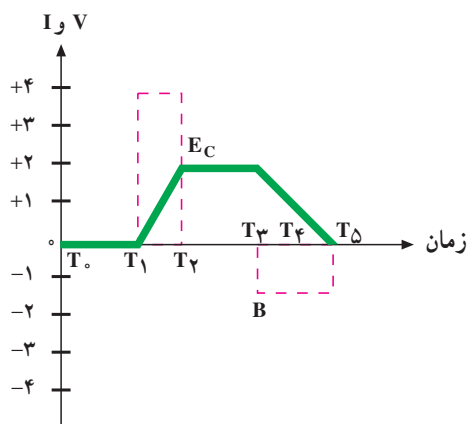


- در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود:

  - ۱- منحنی‌های ولتاژ و جریان خازن را در جریان متناوب رسم کند.
  - ۲- اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان خازن را رسم کند.
  - ۳- اثرات فرکانس را بر راکتانس خازن شرح دهد.
  - ۴- انواع اتصال خازن‌ها را شرح دهد.
  - ۵- مقاومت معادل خازن‌ها را در اتصال سری و موازی محاسبه کند.

برای درک بهتر مطلب، عمل خازن را در مدار شکل

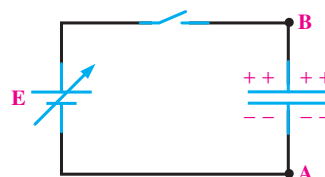
۱۶-۱ با افزایش و کاهش ولتاژ منبع بررسی می‌کنیم. از زمان  $T_0$  تا  $T_1$  کلید باز است. لذا ولتاژ و جریان مدار هر دو صفرند. از  $T_1$  تا  $T_2$  کلید را می‌بندیم و ولتاژ منبع را به صورت خطی (یک‌نواخت) از صفر افزایش می‌دهیم (خط ممتد). ولتاژ لحظه‌ای در  $T_1$  صفر (حداقل شارژ روی خازن) است. این ولتاژ حداقل اجازه می‌دهد تا حداکثر جریان (خط مقطع) در مدار جاری شود و خازن را شارژ کند. چون ولتاژ داده شده به صورت یک‌نواخت



شکل ۱۶-۲- منحنی تغییرات ولتاژ و جریان خازن

### ۱۶-۱- مدارهای جریان متناوبی خازنی

در فصل ۱۵ رفتار خازن در جریان مستقیم بررسی شد. اکنون چگونگی رفتار خازن را وقتی که جریان متناوب به آن وارد می‌شود، مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این قسمت، به روابط فازی بین جریان و ولتاژ و عکس‌العمل خازنی می‌پردازیم. با توجه به شکل ۱۶-۱ یک خازن را به یک منبع ولتاژ DC متغیر وصل کرده‌ایم: در شکل ۱۶-۲ منحنی تغییرات ولتاژ دو سر خازن نسبت به جریانی که خازن را شارژ می‌کند، رسم شده است. خط ممتد ولتاژ و خط مقطع، جریان را نشان می‌دهد. جریان عبوری از خازن سبب شارژ خازن می‌شود و در جهت عکس، ولتاژ حاصل از شارژ خازن عمل می‌کند.



شکل ۱۶-۱- مدار خازنی با منبع DC متغیر

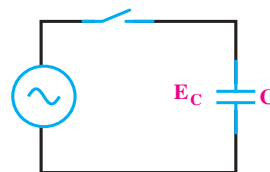
جریان لحظه‌ای در  $T_0$  حداکثر  $(+4)$  و ولتاژ صفر است. از  $T_0$  تا  $T_1$  خازن شروع به شارژ شدن می‌کند و ولتاژ آن به مقدار ماکزیمم خود  $(+1/5)$  می‌رسد. در حالی که جریان با شارژ شدن تدریجی خازن از حداکثر به صفر می‌رسد. از این لحظه به بعد — یعنی  $T_1$  تا  $T_2$  که ولتاژ منبع کاهش می‌یابد — خازن شروع به دشارژ شدن در منبع می‌کند و ولتاژ آن به صفر می‌رسد. در حالی که جریان در جهت مخالف حالت اولیه به مقدار ماکزیمم می‌رسد. از  $T_2$  تا  $T_3$  با تغییر جهت قطب‌های ولتاژ داده شده جریان خازن رفته رفته کم می‌شود و زمانی که خازن در جهت مخالف شارژ شد، جریان آن صفر می‌شود. از  $T_3$  تا  $T_4$  با تغییر ولتاژ، مجدداً خازن دشارژ و در جهت مخالف شارژ می‌شود. جریان خازن مخالف جهت جریان از  $T_1$  تا  $T_3$  است و در این فاصله به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و دوباره به صفر برمی‌گردد.

**نتیجه:** با یک موج سینوسی داده شده به خازن وقتی خازن حداکثر شارژ خود را دارد ( $T_1$  و  $T_3$ ) جریان آن صفر است. هم‌چنین زمانی که ولتاژ روی خازن صفر می‌شود جریان حداکثر مقدار خود را دارد ( $T_2$  و  $T_4$ ).

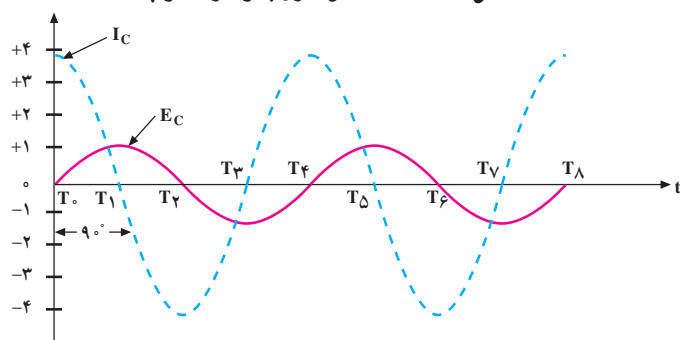
منحنی ولتاژ و جریان، هر دو به صورت سینوسی تغییر می‌کنند. به طوری که جریان از ولتاژ به اندازه‌ی  $90^\circ$  درجه جلوتر است یا تقدم فاز دارد. با توجه دقیق به منحنی‌های ولتاژ و جریان، این نتیجه حاصل می‌شود که خازن در زمانی که ولتاژ زیاد می‌شود (چه در جهت مثبت، چه در جهت منفی) انرژی ذخیره می‌کند و در زمانی که ولتاژ داده شده کاهش می‌یابد (زمان‌های  $T_2$  تا  $T_1$  و  $T_4$  تا  $T_3$ ) در هر سیکل انرژی ذخیره شده را پس می‌دهد. دامنه‌ی شارژ و دشارژ خازن با ظرفیت آن و سرعت تغییرات ولتاژ متناسب است. با وجود این که جریان از داخل خازن عبور نمی‌کند ولی اگر آمپر متری در مدار داشته باشیم، جریان عبوری از مدار را نشان می‌دهد؛ درست مانند این است که مقاومتی در مدار قرار دارد و جریان را محدود می‌کند. مخالف خازن در مقابل جاری شدن جریان را **عکس‌العمل راکتانس خازنی** یا **مقاومت خازنی** می‌گویند و آن را با  $X_C$  نمایش می‌دهند.

اضافه می‌شود، الکترون‌ها به تدریج صفحه‌ی B خازن را ترک می‌کنند و روی صفحه‌ی A جمع می‌شوند. این عمل به طور یک‌نواخت ادامه پیدا می‌کند تا ولتاژ  $E_C$  مخالف، تولید شود. ولتاژ  $E_C$  همان ولتاژ شارژ خازن است. وقتی ولتاژ داده شده در یک مقدار مثبت نگه‌داشته شود، جریانی جاری نمی‌شود؛ بنابراین، از  $T_2$  تا  $T_3$  ولتاژ خازن با ولتاژ داده شده برابر و جریان خازن صفر است.

اکنون اگر از  $T_3$  تا  $T_4$  ولتاژ داده شده را به طور یک‌نواخت کاهش دهیم، خازن در طول این زمان خالی می‌شود. توجه داشته باشید که این زمان دو برابر طول زمان  $T_1$  تا  $T_2$  است. بنابراین خازن با یک جریان یک‌نواخت خالی می‌شود؛ در حالی که از نظر زمان دو برابر شارژ شدن طول می‌کشد و از لحاظ دامنه نصف دامنه‌ی شارژ شدن است. اگر یک آمپر متر عقربه‌ای و یک ولت‌متر عقربه‌ای را به مدار اضافه کنیم و با تغییر ولتاژ منبع به حرکت عقربه‌های ولت‌متر و آمپر متر توجه داشته باشیم، متوجه می‌شویم که به مجرد وصل کلید و تغییر ولتاژ از صفر عقربه‌ی آمپر متر ماکزیمم جریان عبوری را نشان می‌دهد. در صورتی که در همان لحظه عقربه‌ی ولت‌متر صفر را نشان می‌دهد. اکنون یک منبع ولتاژ متناوب (سینوسی) را مطابق شکل ۱۶-۳ به خازن وصل می‌کنیم. با بستن کلید، تغییرات لحظه‌ای ولتاژ و جریان را در مدار شکل ۱۶-۴ مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل ۱۶-۳ — اتصال خازن به ولتاژ متناوب

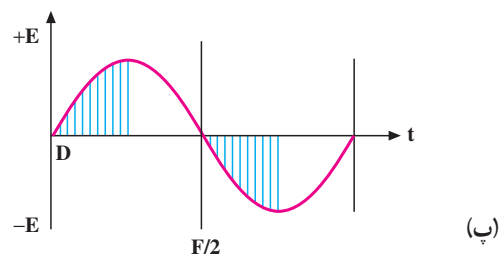
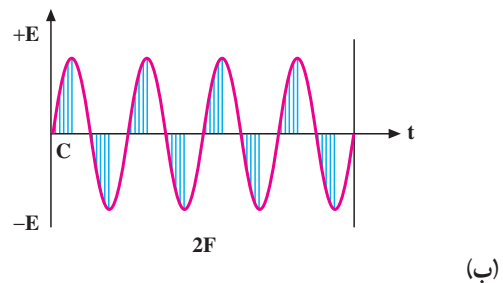
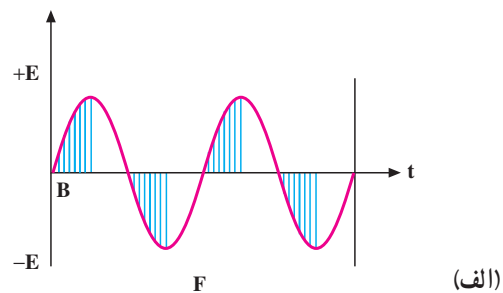
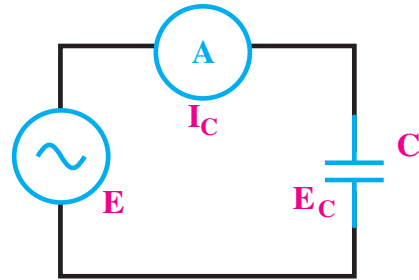


شکل ۱۶-۴ — منحنی تغییرات ولتاژ نسبت به جریان عبوری از خازن

## ۱۶-۲- عوامل مؤثر بر عکس‌العمل خازنی

عوامل مؤثر در عکس‌العمل (مقاومت) خازنی عبارت‌اند از: فرکانس و ظرفیت خازنی که در این جا به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

مدار شکل ۱۶-۵ را در نظر می‌گیریم. در این مدار، وقتی خازن C به مقدار ولتاژ E شارژ می‌شود، مقداری بار الکتریکی (Q) روی خود ذخیره می‌کند. بار ذخیره شده در خازن



شکل ۱۶-۵- تأثیر فرکانس در زمان ذخیره شدن انرژی در خازن

از حاصل ضرب ولتاژ در ظرفیت - یعنی  $Q = CV$  - به دست می‌آید. این مقدار بار در دو فاصله‌ی زمانی (از صفر تا  $+E$  و از صفر تا  $-E$ ) در یک سیکل از ولتاژ داده شده در خازن ذخیره می‌شود (قسمت‌های هاشور خورده از شکل ۱۶-۵ الف). زمان ذخیره شدن بار در خازن به فرکانس بستگی دارد؛ یعنی:

$$f = \frac{1}{T}$$

اگر فرکانس، مطابق شکل ۱۶-۵ ب افزایش یابد، (بدون تغییر در مقادیر E و C) مثلاً دو برابر شود مقدار بار Q در فاصله‌ی نصف زمان حالت (الف) در خازن ذخیره می‌شود؛ یعنی، خازن با دو برابر جریان حالت الف شارژ می‌شود؛ زیرا مقاومت خازنی نصف شده است. اگر فرکانس مطابق شکل (۱۶-۵ پ) نصف شود، مقدار Q در دو برابر فاصله‌ی زمانی الف در خازن ذخیره می‌شود؛ یعنی، خازن با نصف جریان حالت الف شارژ می‌شود؛ زیرا مقاومت خازنی دو برابر شده است. قسمت‌های هاشور خورده زمان‌های ذخیره‌ی بار و قسمت‌های هاشور نخورده زمان‌های تخلیه‌ی بار را نشان می‌دهند.

پس معلوم شد که عکس‌العمل خازنی به فرکانس بستگی معکوس دارد؛ یعنی، با افزایش فرکانس عکس‌العمل خازنی کاهش و با کاهش فرکانس عکس‌العمل خازنی افزایش می‌یابد. عکس‌العمل خازنی به اندازه‌ی ظرفیت خازنی نیز بستگی دارد؛ یعنی، اگر ظرفیت خازن زیاد شود (بدون تغییر در مقادیر E و F)، جریان بیش‌تری از مدار می‌گذرد و اجازه‌ی شارژ بیش‌تری را می‌دهد. در نتیجه، عکس‌العمل خازنی کاهش می‌یابد و برعکس، با کم شدن ظرفیت خازن عکس‌العمل خازنی زیاد می‌شود.

اکنون با مشخص شدن عوامل مؤثر در امپدانس یا عکس‌العمل خازنی، می‌توانیم رابطه‌ی بین آن‌ها را مشخص کنیم.

$$X_C = \frac{1}{2\pi FC}$$

$X_C$  عکس‌العمل خازنی برحسب اهم، F فرکانس برحسب هرتز و C ظرفیت خازنی برحسب فاراد است.

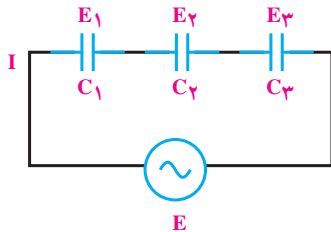
عکس العمل خازنی ( $X_c$ ) با نام‌های **راکتانس خازنی** و **کاپاسیتیو** نیز بیان می‌شود.

با فاکتورگیری و حذف I از طرفین خواهیم داشت :

$$X_{c_t} = X_{c_1} + X_{c_2} + X_{c_3}$$

که  $X_{c_t}$  مقاومت خازنی معادل است.

رابطه‌ی گفته شده عیناً شبیه رابطه‌ی محاسبه‌ی مقاومت معادل در مدارهای سری مقاومتی است.



شکل ۱۶-۷

ب- اتصال موازی خازن‌ها: مدار شکل ۱۶-۸ اتصال

چند خازن موازی را نشان می‌دهد. با موازی بستن خازن‌ها ظرفیت کل افزایش می‌یابد؛ زیرا سطوح صفحات افزایش یافته است.

برای محاسبه‌ی مقاومت معادل چند خازن موازی، می‌گوییم که شدت جریان کل از جمع شدت جریان‌های شاخه‌های موازی به دست می‌آید، یعنی :

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

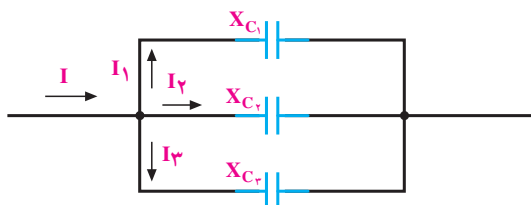
به علاوه، طبق قانون اهم می‌دانیم که  $I = \frac{E}{X_c}$  . هم چنین

می‌دانیم که در مدار موازی، ولتاژ برای همه‌ی شاخه‌ها یکسان است. پس خواهیم داشت :

$$\frac{E}{X_{c_t}} = \frac{E}{X_{c_1}} + \frac{E}{X_{c_2}} + \frac{E}{X_{c_3}}$$

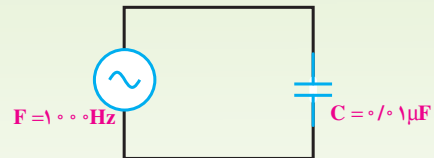
با حذف E از طرفین داریم :

$$\frac{1}{X_{c_t}} = \frac{1}{X_{c_1}} + \frac{1}{X_{c_2}} + \frac{1}{X_{c_3}}$$



ظرفیت معادل خازن‌های موازی برابر مجموع تک تک ظرفیت هاست.

مثال ۱: فرکانس مولد موج سینوسی مدار شکل ۱۶-۶ ۱۰۰۰ هرتز و ظرفیت خازن آن  $0.1 \mu F$  است. عکس العمل خازنی را به دست آورید.



شکل ۱۶-۶

حل:

$$X_c = \frac{1}{2\pi FC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1000 \times 0.1 \times 10^{-6}}$$

$$X_c = \frac{10^5}{6.28} = 15.92 k$$

### ۱۶-۳- نحوه محاسبه‌ی مقاومت خازنی معادل

الف- اتصال سری خازن‌ها: برای محاسبه‌ی مقاومت

معادل چند خازن سری از شکل ۱۶-۷ و قانون دوم کیرشهف (KVL) استفاده می‌کنیم. ولتاژ کل داده شده به مدار با مجموع تک تک افت ولتاژهای ایجاد شده در مدار برابر است؛ یعنی :

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3$$

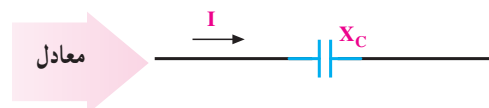
با استفاده از قانون اهم می‌دانیم که به طور کلی

$$E = IX_c \Rightarrow \text{مقاومت} \times \text{جریان} = \text{ولتاژ}$$

با توجه به این که در مدار سری جریان یکسان است،

پس :

$$IX_{c_t} = IX_{c_1} + IX_{c_2} + IX_{c_3}$$



راکتانس خازنی معادل را می‌توان با موازی فرض کردن تک تک راکتانس‌ها با یک دیگر به دست آورد.

شکل ۱۶-۸- اتصال موازی خازن‌ها

تذکر: در هر یک از اتصالات سری یا موازی خازن‌ها مقاومت خازنی را می‌توان از رابطه‌ی زیر به‌دست آورد.

$$X_{cT} = \frac{1}{\sum \pi f C_T} = \frac{1}{\omega \cdot C_T}$$

## تحقیق کنید



در مورد نقش خازن در راه اندازی موتورهای الکتریکی تکفاز تحقیق کرده و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

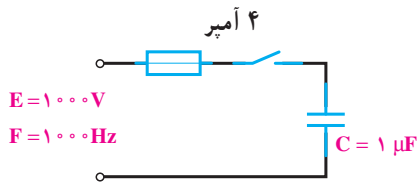
شکل ۹-۱۶- موتور الکتریکی تک فاز



## پرسش

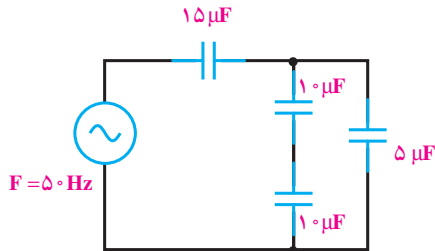
- ۱- چرا خازن از عبور جریان DC جلوگیری می‌کند؟
- ۲- رابطه‌ی بین جریان و ولتاژ دو سر خازن را با ولتاژ منبع بنویسید.
- ۳- فرکانس بر جریان خازن و امپدانس خازن چه تأثیری دارد؟
- ۴- رابطه‌ی  $X_c$  و واحد آن را بنویسید.

۱- در مدار شکل ۱۶-۱۰ با بستن کلید چه اتفاقی می افتد؟  
(جواب: فیوز عمل می کند)



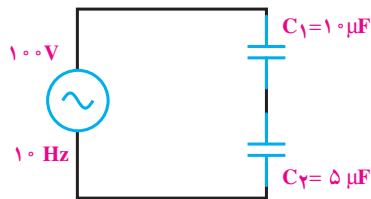
شکل ۱۶-۱۰

۲- در مدار شکل ۱۶-۱۱ مقدار  $X_C$  کل چه قدر است؟  
(جواب: ۵۳۰)



شکل ۱۶-۱۱

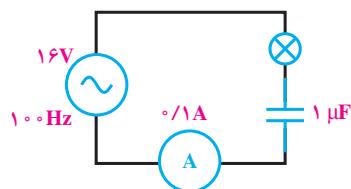
۳- در مدار شکل ۱۶-۱۲ صفحات کدام خازن بالاترین مقدار بار را دارد؟ ولتاژ دو سر خازن چه قدر است؟  
(جواب: هر دو خازن در یک لحظه دارای بار ذخیره ای برابرند.)



شکل ۱۶-۱۲

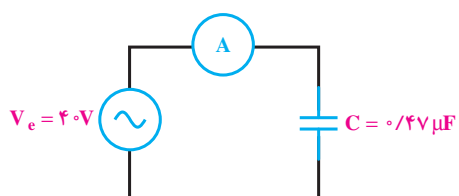
$$\frac{100}{3} \text{ V و } \frac{200}{3} \text{ V}$$

۴- افت ولتاژ دو سر یک خازن  $20 \mu\text{F}$  در فرکانس ۱ kHz برابر ۵ ولت است. شدت جریان عبوری از خازن چه قدر است؟  
(جواب: ۰/۶۲۹ A)



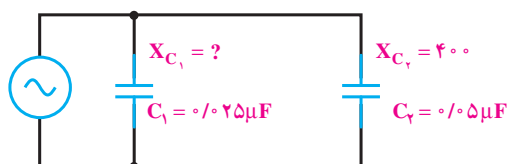
شکل ۱۶-۱۳

۵- در مدار شکل ۱۶-۱۳ اگر ظرفیت خازن دو برابر شود، نور لامپ چگونه تغییر می کند (کم می شود - ثابت می ماند - زیاد می شود)؟  
(جواب: زیاد می شود)



شکل ۱۴-۱۶

۶- در مدار شکل ۱۴-۱۶، آمپر متر  $100$  میلی آمپر مؤثر را نشان می دهد. فرکانس منبع چه قدر است؟  
(جواب:  $F \approx 847 \text{ Hz}$ )



شکل ۱۵-۱۶

۷- در مدار شکل ۱۵-۱۶،  $X_{C_1}$  معادل چند اهم است؟ اگر ظرفیت  $C_2$  دو برابر شود،  $X_{C_2}$  چه قدر می شود؟ چنان چه فرکانس مدار کم شود،  $X_{C_1}$  (افزایش - کاهش) می یابد.

۱ جواب:  $800$ ،  $200$ ، افزایش  
۲ راهنمایی: از تناسب استفاده کنید.  
۳

## منابع و مآخذ

- ۱- اصول الکترونیک، گروپ، ترجمه‌ی احمد ریاضی - سید محمود صموتی و محمود همتایی، مجتمع آموزش و پژوهش تکنولوژی تهران.
- ۲- فلوید توماس، اصول و مبانی مدارهای الکتریکی، (مهرداد عابدی، مترجم)، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه امیرکبیر.
- ۳- تشریح اصول مهندسی الکترونیک، - (حسین چشمه قصابانی، مترجم)، انتشارات بخش فرهنگی دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی.
- ۴- اندرسن چارلز، دوره‌ی جامع برق و الکترونیک، (محمدرضا محمدی‌فر، مترجم)، انتشارات سپهر.
- ۵- ماشین‌های الکتریکی، احمد ریاضی و ...، انتشارات مرعشی، سال ۶۹.
- ۶- دسور، چارلز، کوه، ارنست، نظریه‌ی اساسی مدارها و شبکه‌ها (جبه‌دار. پرویز، مترجم)
- ۷- خدا دادی، شهرام. (۱۳۸۵). مبانی الکتریسیته. شرکت صنایع آموزشی (وابسته به وزارت آموزش و پرورش)

- ۸ - Introductory Analysis Circuits Robert Boylestad 11<sup>th</sup> Edition Printic Hall
- ۹ - Electricity made Simple
- ۱۰ - Electricity One-Seven Harry Mileaf 3<sup>rd</sup> Edition Printic Hall
- ۱۱ - Fundamental of Communications
- ۱۲ - How to read Electronic Circuit Diagrams
- ۱۳ - Understanding Electricity and Electronics G. Randy Slone 4<sup>th</sup> Edition McGraw-Hill
- ۱۴ - Transistor Fundamentals
- ۱۵ - Principles of Electric Circuits Thomas Floyd 8<sup>th</sup> Edition Printic Hall

