بسم الله الرحمن الرحیم

مبانی برق

رشته‌های الکترونیک ـ الکتروتکنیک ـ الکترونیک و مخابرات دریایی

زمینهٔ صنعت

شاخهٔ آموزش فنی وحرفه‌ای

شمارهٔ درس ۲۰۷۱

۶۲۱ مبانی برق/ مؤلفان :فریدون قیطرانی ... [و دیگران]. ــ تهران : شرکت چاپ و نشرکتاب‌های
/۳۱ درسی ایران، ۱۳۹۱.
۲۱۴م ۱۵۴ص. : مصور. ــ (آموزش فنی و حرفه‌ای ؛ شمارهٔ درس ۲۰۷۱)
۱۳۹۱ متون درسی رشته‌های الکترونیک ــ الکتروتکنیک ــ الکترونیک ومخابرات دریایی، زمینهٔ صنعت.
برنامه‌ریزی و نظارت، بررسی و تصویب محتوا : کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشته‌های الکترونیک ــ الکتروتکنیک ــ الکترونیک و مخابرات دریایی دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزش‌های فنی وحرفه‌ای وکاردانش وزارت آموزش و پرورش.
۱. برق. الف. قیطرانی، فریدون. ب. ایران. وزارت آموزش و پرورش. کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشته‌های الکترونیک ــ الکتروتکنیک ــ الکترونیک و مخابرات دریایی. ج. عنوان. د. فروست.

۱۳۹۱

همکاران محترم و دانش‌آموزان عزیز:

پیشنهادات و نظرات خـود را دربارهٔ محتوای این کتاب بـه نشانی تهران ـ صندوق پستی شمارهٔ ۴۸۷۴/۱۵ دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزش‌های فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایند.

پیام‌نگار (ایمیل) info@tvoccd.sch.ir

وب‌گاه (وب سایت) www.tvoccd.sch.ir

پیام‌نگار (ایمیل) کمیسیون تخصصی رشتهٔ الکترونیک

nick@tvoccd.sch.ir

پیام‌نگار (ایمیل) کمیسیون تخصصی رشتهٔ الکتروتکنیک

tech@tvoccd.sch.ir

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

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

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

نام کتاب : **مبانی برق ـ ۳۵۸/۱۸**

مؤلفان : **مهندس فریدون قیطرانی، مهندس عین‌اللّه احمدی، مهندس حسین مظفری، مهندس محمود همتائی و مهندس مسعود تجلی‌پور**

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : **ادارهٔ کلّ چاپ و توزیع کتاب‌های درسی**

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن: ۹ـ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹،

وب‌سایت: www.chap.sch.ir

رسام : **مریم دهقان‌زاده**

صفحه‌آرا : **صغریٰ عابدی**

طراح جلد : **طاهره حسن‌زاده**

ناشر : **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران : تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادّهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (دارو پخش)**

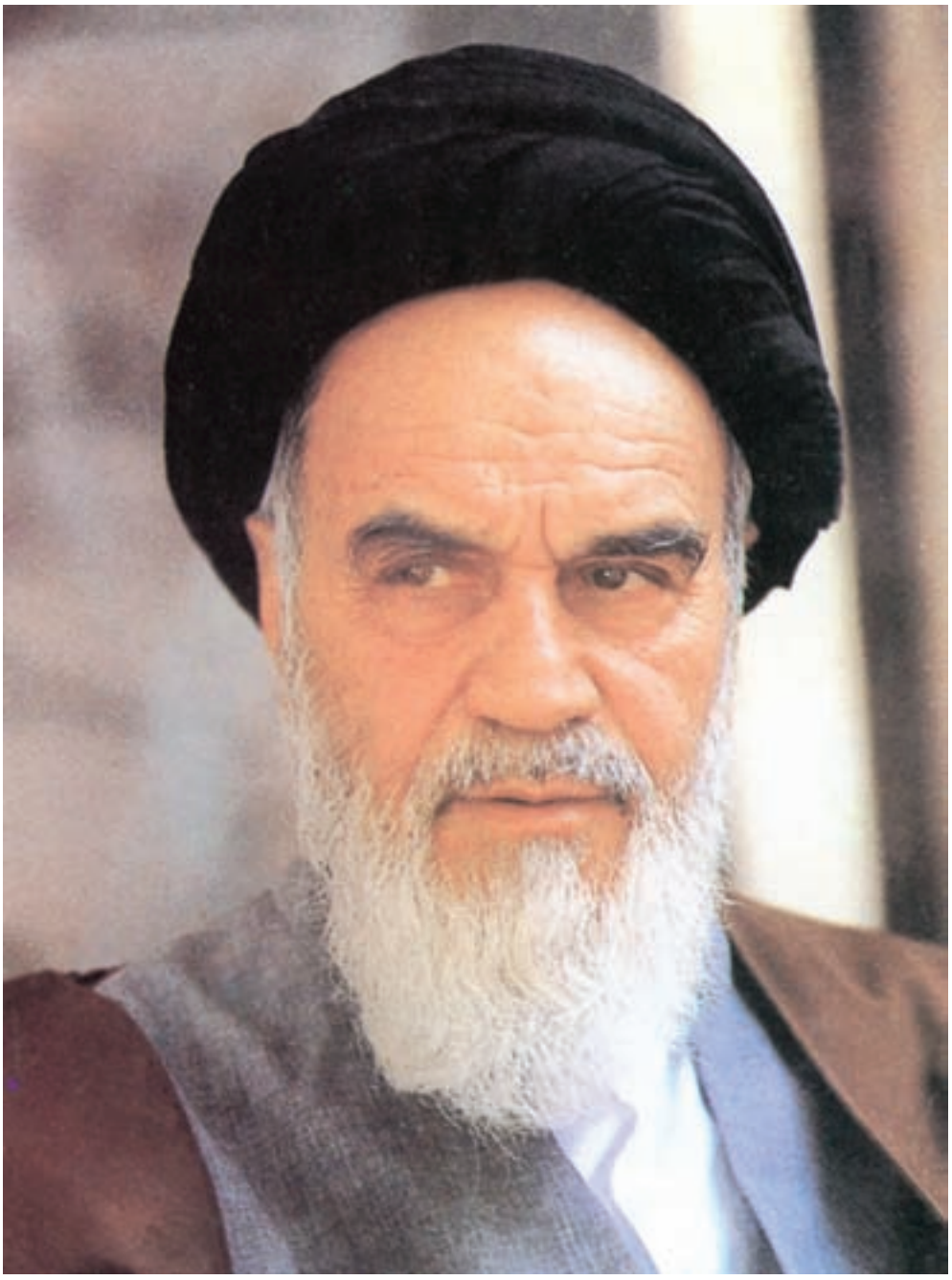
تلفن: ۵ ـ ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵

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

سال انتشار و نوبت چاپ : **چاپ دوازدهم ۱۳۹۱**

حقّ چاپ محفوظ است.

شابک ۴-۰۹۶۰-۰۵-۹۶۴ ISBN 964-05-0960-4

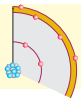
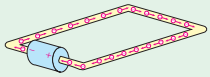
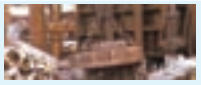
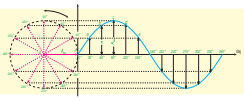


شما عزیزان کوشش کنید که از این وابستگی بیرون آیید و احتیاجات کشور خودتان را برآورده سازید، از نیروی انسانی ایمانی خودتان غافل نباشید و از اتّکای به اجانب بپرهیزید.

امام خمینی «قدّس سرّه الشّریف»

فهرست

سخنی با هنرآموزان محترم

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

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 به‌منظور 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)
ـ بار الکتریکی
ـ جسم رسانا و نارسانا
ـ پایستگی بار الکتریکی
ـ القای بار الکتریکی
ـ اختلاف پتانسیل الکتریکی
ـ مولد
ـ مدار الکتریکی
ـ جریان الکتریکی و محاسبات آن
ـ مقاومت الکتریکی
ـ قانون اهم و محاسبات آن
ـ انرژی الکتریکی و محاسبات آن
ـ توان الکتریکی و محاسبات آن
ـ بهای انرژی الکتریکی و محاسبات آن

علوم تجربی (پایه سوم راهنمایی)
ـ مدل‌های گوناگون برای اتم
ـ ذرات سازنده اتم
ـ پیوند میان اتم‌ها
ـ تشکیل مولکول‌ها و ترکیب مولکولی
ـ یون‌ها، ذراتی با بار الکتریکی
ـ کار و انرژی و محاسبه آن
ـ توان
ـ بار الکتریکی
ـ دو نوع نیرو، دو نوع بار الکتریکی
ـ القای بار الکتریکی
ـ رسانا، نارسانا
ـ اختلاف پتانسیل
ـ شدت جریان
ـ مقاومت الکتریکی
ـ قانون اهم
ـ آهنربا و اثر قطب‌های آن
ـ ساختن آهنربا
ـ القای مغناطیسی
ـ آهنربای الکتریکی

فصل اوّل

الکتریسیته ی ساکن

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ نظریه‌ی اتمی را در ارتباط با ماهیت الکتریسیته توضیح دهد.

۲ــ ذرات اصلی اتم و ذرات باردار الکتریکی را نام ببرد.

۳ــ قانون کولن را تعریف کند.

۴ــ بار الکتریکی و واحد آن را تعریف کند.

۵ ــ روش‌های مختلف باردار کردن اجسام را نام ببرد.

۶ ــ خطرهای الکتریسیته‌ی ساکن را شرح دهد و چگونگی رفع هریک را بیان کند.

۷ــ کاربردهای الکتریسیته‌ی ساکن را نام ببرد و ساختمان وسایلی را که با الکتریسیته‌ی ساکن کار می‌کنند، توضیح دهد.

۸ ــ اختلاف پتانسیل و میدان الکتریکی را توضیح دهد و مقدار آن‌ها را محاسبه کند.

۹ــ تفاوت هادی‌ها، نیمه‌هادی‌ها و عایق‌ها را از نظر تعداد الکترون‌های آخرین لایه بیان کند و دلایل این تفاوت‌ها را توضیح دهد.

۱۰ــ اختلاف فلزاتی چون نقره، طلا و مس را با توجه به هدایت الکتریکی آن‌ها بیان کند.

مقدمه

امروزه انرژی الکتریکی بیش از انواع دیگر انرژی مورداستفاده قرار می‌گیرد. بدون انرژی الکتریکی کاربرد وسایل روشنایی، تلویزیون، تلفن و اغلب وسایل خانگی غیرممکن است. به‌علاوه، در بیش‌تر وسایل نقلیه انرژی الکتریکی نقش مهمی بازی می‌کند. به‌این‌ترتیب، می‌توان گفت انرژی الکتریکی تقریباً درهمه‌جا به‌کار می‌رود.

شکل ۱ــ۱ــ کاربردهای انرژی الکتریکی

اگرچه الکتریسیته در قرون اخیر مورد استفاده قرار گرفته است ولی یونانی‌ها در حدود ۲۰۰۰ سال پیش آن را کشف کردند. آن‌ها پی بردند 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[1] 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.

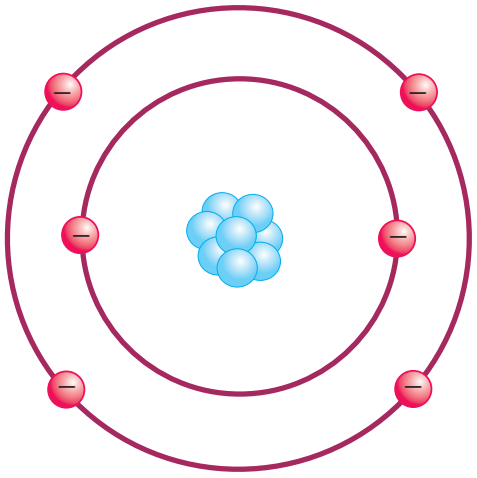
امروزه دانشمندان بر این عقیده‌اند که الکتریسیته از ذرات بسیار ریزی به نام **الکترون** و **پروتون** تولید می‌شود.

وقتی موهای خود را شانه می‌کنید، شانه دارای بار الکتریکی می‌شود و مانند میله‌ی کهربا عمل می‌کند و می‌تواند ذرات کاغذ را جذب کند.

شکل ۲ــ۱ــ یکی از روش‌های تولید الکتریسیته

۱ــ۱ــ ساختمان اتم

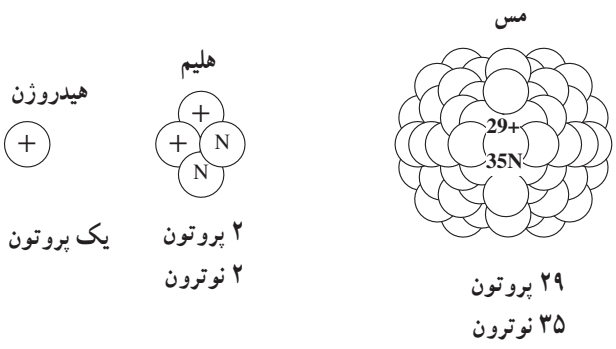
هر اتم از سه نوع ذره تشکیل می‌شود :الکترون، پروتون و نوترون. پروتون‌ها و نوترون‌ها در مرکز یا هسته‌ی اتم قرار گرفته‌اند و الکترون‌ها در مدارهایی به دور هسته گردش می‌کنند. شکل ۳ــ۱ ساختمان اتم کربن را نشان می‌دهد. هسته‌ی اتم کربن از شش پروتون با بار مثبت و شش نوترون (خنثی) تشکیل شده است و شش الکترون با بار منفی به دور هسته می‌چرخند.



شکل ۳ ــ۱ــ ساختمان اتم کربن

۱ــ 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.

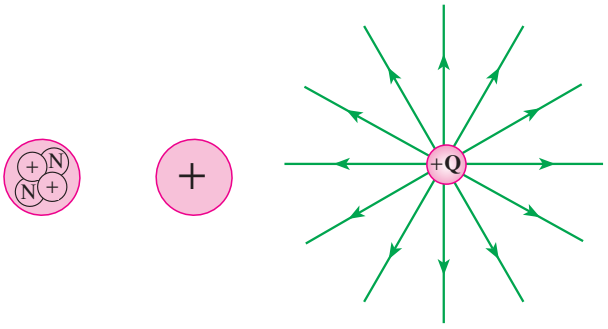


شکل ۴ــ۱ــ هسته‌ی چند اتم

۱ــ CHARLES DUFAY

۲ــ پروتون: پروتون بسیار کوچک است و قطر آن $\frac{۱}{۳}$ قطر الکترون است. پروتون‌ها در عبور یا انتقال انرژی الکتریکی نقش فعالی ندارند آن‌ها بار الکتریکی مثبت دارند و بنابر قرارداد، خطوط نیروی الکتریکی به‌صورت شعاعی و به‌طور مستقیم در تمام جهات از پروتون خارج می‌شوند.

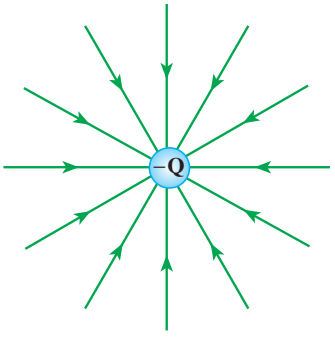
در شکل ۵ــ۱ هسته‌ی اتم شامل نوترون خنثی و پروتون مثبت است ؛ بنابراین، هسته‌ی همه‌ی اتم‌ها همیشه مثبت است. خطوط نیرو به‌صورت شعاعی در تمام جهات از پروتون خارج می‌شوند.



شکل ۵ــ۱ــ خطوط نیروی الکتریکی پروتون

۳ــ 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 ازنظر الکتریکی خنثی است و بنابراین، در ماهیت الکتریکی اتم‌ها چندان مهم تلقی نمی‌شود.

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



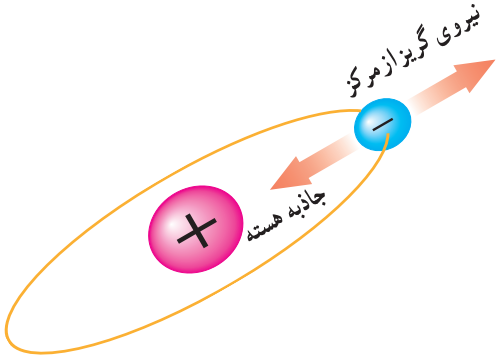
شکل ۶ ــ۱ــ خطوط نیروی الکتریکی ناشی از الکترون

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

۲ــ۱ــ نظریه‌ی الکترونی

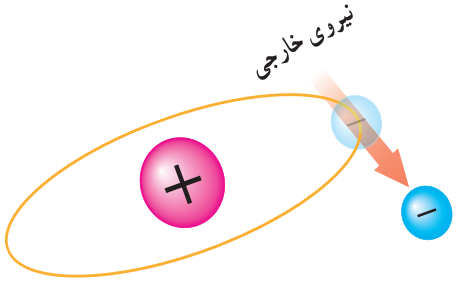
همان‌طور که گفتیم، الکتریسیته هنگامی به‌وجود می‌آید که الکترون‌ها از اتمشان خارج شوند.

طبق شکل ۷ــ۱ الکترون‌ها با سرعت بسیار زیادی در مدار خود به‌دور 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 ۷ــ۱ــ تعادل الکترون در مدار خود

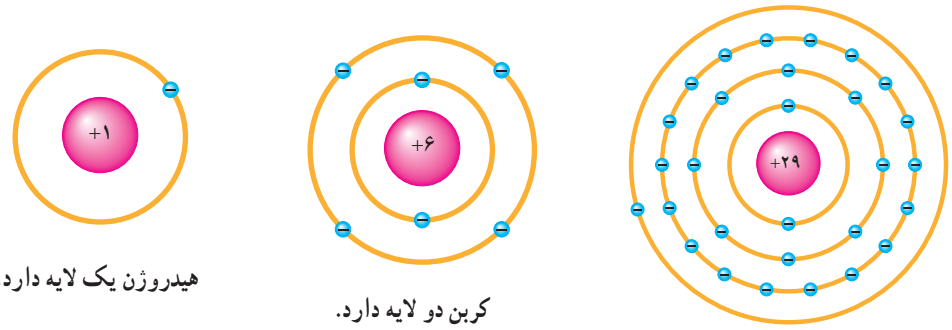
طبق شکل ۸ ــ۱ اگر یک نیروی خارجی خیلی قوی به‌اتم داده شود تا به این نیروی گریز از مرکز کمک کند، الکترون آزاد می‌شود.



شکل ۸ ــ۱ــ نیروی خارجی باعث آزادی الکترون می‌شود.

لایه‌ها: الکترون‌های مدارِ 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 الکترون‌ها را معمولاً لایه (shell) می‌گویند.

اتم‌های تمام عناصر شناخته شده می‌توانند تاهفت لایه داشته باشند. در شکل ۹ــ۱ لایه‌های عناصر مس، کربن و هیدروژن را می‌بینید.



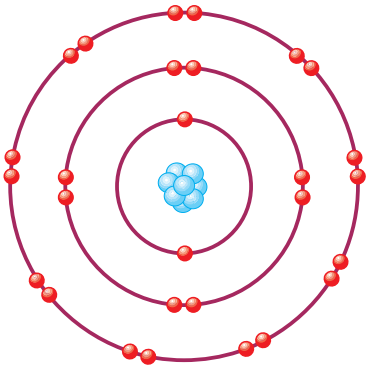
هیدروژن یک لایه دارد.

کربن دو لایه دارد.

مس چهار لایه دارد.

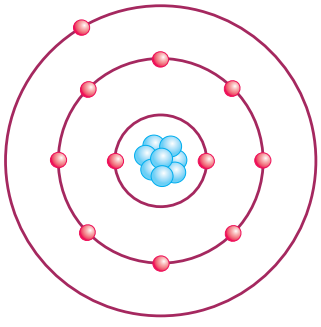
شکل ۹ــ۱ــ لایه‌های عناصر مس ، کربن و هیدروژن

ظرفیت لایه: هر لایه می‌تواند تعداد معینی الکترون را درخود 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 $2n^2$ به‌دست آورد که در آن n شماره‌ی لایه است (شکل ۱۰ــ۱).



شکل ۱۰ــ۱ــ حداکثر تعداد الکترون‌های لایه‌های ۱ تا ۳

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 ۱۱ــ۱).

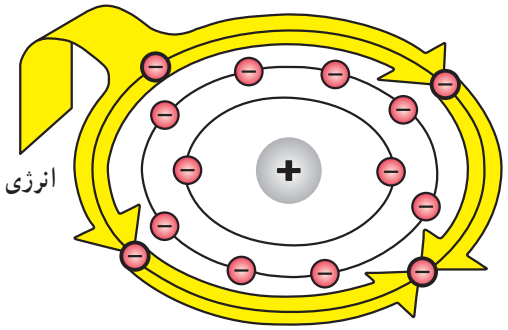


شکل ۱۱ــ۱ــ لایه‌ی والانس و الکترون والانس

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 داده شده به لایه‌ی والانس بین الکترون‌های آن لایه تقسیم می‌شود. درنتیجه، به ازای مقدار معینی انرژی، هرچه الکترون‌های والانس موجود بیش‌تر باشد هر الکترون انرژی کم‌تری دریافت می‌کند.



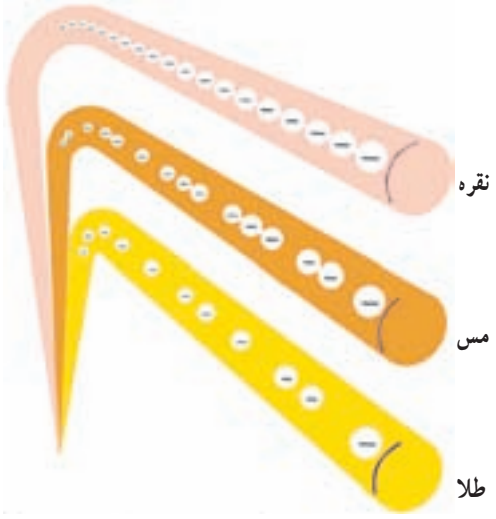
شکل ۱۲ــ۱ــ تقسیم انرژی خارجی به چهار الکترون والانس

۳ــ۱ــ 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.

به‌ماده‌ای 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.

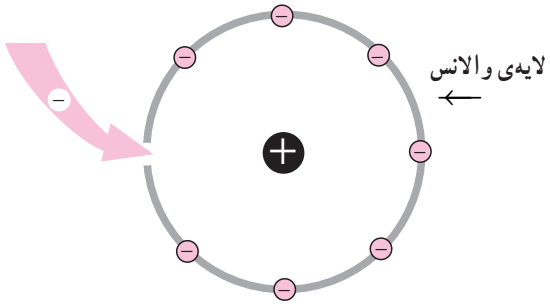
قابلیت هدایت بعضی فلزات از سایر فلزات بهتر است. برای مثال، با آن‌که اتم‌های مس و نقره و طلا هر یک فقط یک الکترون والانس دارند که به آسانی آزاد می‌شوند اما نقره بهترین هادی است و پس از آن مس و طلا قرار دارند. این بدان علت است که نقره در مقدار معینی ماده، نسبت به فلزات دیگر دارای اتم‌های بیش‌تری است و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



شکل ۱۳ــ۱ــ مقایسه‌ی هادی‌های خوب

۴ــ۱ــ 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 داده شده 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.



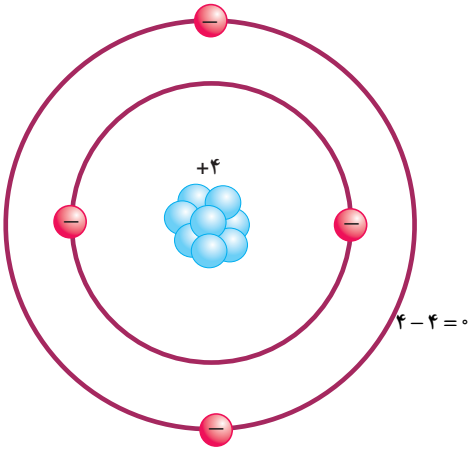
شکل ۱۴ــ۱ــ عایق خوب

۵ ــ۱ــ 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.

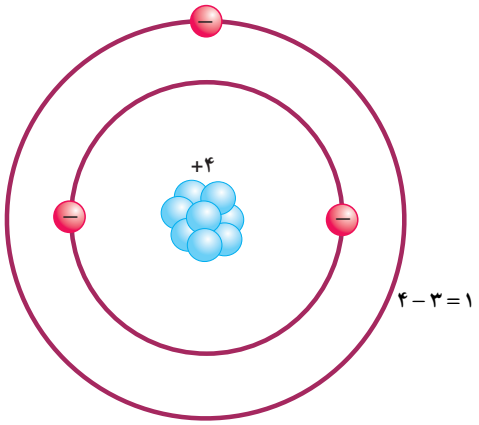
۶ ــ۱ــ اتم‌های باردار

طبق شکل ۱۵ــ۱ 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 ازنظر الکتریکی خنثی نگه می‌دارند.



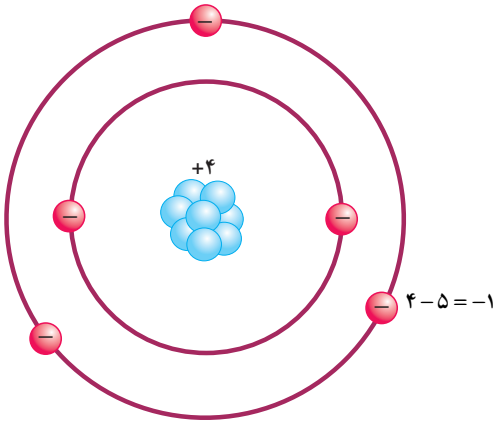
شکل ۱۵ــ۱ــ اتم خنثی

طبق شکل ۱۶ــ۱ اگر در اتمی تعداد الکترون‌ها از پروتون‌ها کم‌تر باشد، اتم بار مثبت دارد و یون مثبت ایجاد می‌کند.



شکل ۱۶ــ۱ــ یک یون مثبت

طبق شکل ۱۷ــ۱ چنان‌چه تعداد الکترون‌های اتمی از پروتون‌های آن بیش‌تر باشد، اتم بار منفی دارد و یون منفی ایجاد می‌کند.



شکل ۱۷ــ۱ــ یک یون منفی

۷ــ۱ــ 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 :

۱ــ باردار شدن اجسام از راه اصطکاک (مالش)

۲ــ باردار کردن اجسام از طریق تماس

۳ــ باردار کردن اجسام از طریق القا

فکر کنید

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

فکر کنید

نحوه کار دستگاه فتوکپی چگونه است؟

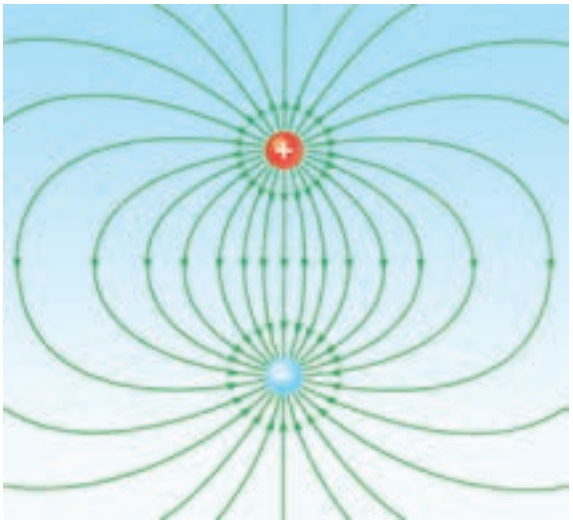
شکل ۱۸ــ۱ــ نمایی از یک دستگاه فتوکپی

۸ــ۱ــ قانون بارهای الکتریکی

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

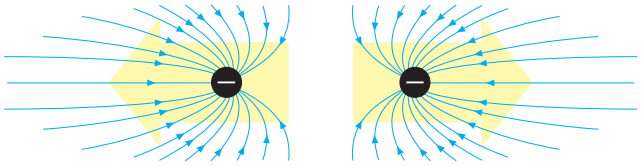
خطوط نیروی هریک از این بارها میدان‌های الکترواستاتیک تولید می‌کنند. به‌علت اثر متقابل این دو میدان، ذرات باردار یک‌دیگر را جذب یا دفع می‌کنند. بر اساس قانون بارهای الکتریکی، ذراتی که بارهای همنام دارند، یک‌دیگر را دفع و ذراتی که بارهای مخالف دارند، هم‌دیگر را جذب می‌کنند.

طبق شکل ۱۹ــ۱ پروتون(+)، الکترون (−) را جذب می‌کند.



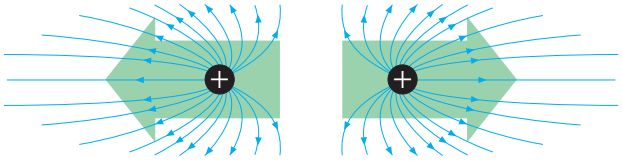
شکل ۱۹ــ۱ــ نیروی جاذبه‌ی بین الکترون و پروتون

طبق شکل ۲۰ــ۱ الکترون (−)، الکترون (−) دیگر را دفع می‌کند.



شکل ۲۰ــ۱ــ نیروی دافعه‌ی بین دو الکترون

طبق شکل ۲۱ــ۱ پروتون (+)، پروتون (+) را دفع می‌کند.



شکل ۲۱ــ۱ــ نیروی دافعه‌ی بین دو پروتون

پروتون‌ها مثبت هستند و باید یک‌دیگر را دفع کنند اما نوعی نیروی جاذبه درون هسته‌ی 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.

۹ــ۱ــ میدان‌های الکترواستاتیک

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

در یک جسم باردار منفی، خطوط نیروی الکترون‌های

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

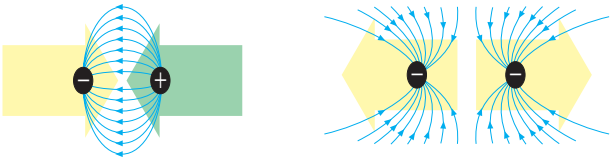
در جسم باردار مثبت، کمبود الکترون‌ها باعث می‌شود که خطوط نیروی پروتون‌های اضافی با هم جمع شوند و میدان الکترواستاتیکی تولید کنند که در آن خطوط نیرو در تمام جهات از درون جسم به‌طرف بیرون است.

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 به‌طرف 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 دورشوند، 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 ۲۲ــ۱ــ میدان‌های الکترواستاتیک

۱۰ــ۱ــ قانون کولن

کولن آزمایش‌های خود را در دو مرحله انجام داد ؛ درمرحله‌ی 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 دوبار الکتریکی دوبرابر شود، نیروی بین آن‌ها به $\frac{۱}{۴}$ مقدار اولیه می‌رسد و هنگامی که فاصله‌ی بین دو بار الکتریکی سه برابر شود، نیروی بین آن‌ها به $\frac{۱}{۹}$ 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 به‌وجود می‌آید، به‌طور مستقیم با مقدار بار الکتریکی روی هریک از کره‌ها متناسب است و در نتیجه، با حاصل ضرب آن‌ها تناسب دارد.

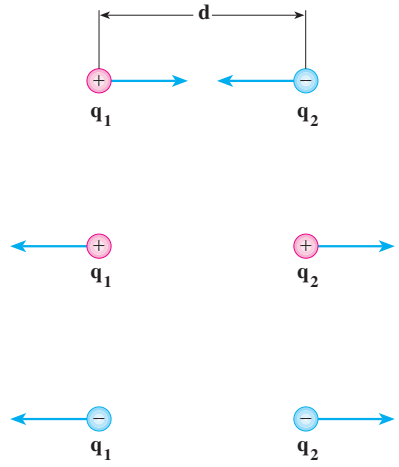
اگر دو بار الکتریکی را با $q_۱$ و $q_۲$ و فاصله‌ی بین آن‌ها را با d و نیرو را با F نمایش دهیم، قانون کولن به‌صورت رابطه‌ی زیر نوشته می‌شود :

$$F = K\frac{q_۱q_۲}{d^۲}$$

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 $K = ۹\times۱۰^۹\ \frac{N.m^۲}{c^۲}$.

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.

از رابطه‌ی $F = K\frac{q_1 q_2}{d^2}$ فقط اندازه‌ی نیروی کولن به‌دست 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 هرکدام یک کولن است، وقتی که فاصله‌ی آن‌ها یک کیلومتر باشد چه‌قدر است؟

$$q_1 = q_2 = 1C$$

$$d = 1000m \quad F = K\frac{q_1 \cdot q_2}{d^2} = 9\times10^9 \times \frac{1\times1}{(10^3)^2} = 9000N$$

نیروی ۹۰۰۰ نیوتن نیروی زیادی است. مقدار بارهای ساکن معمولاً از یک کولن بسیار کم‌ترند.

۱۱ــ۱ــ 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 :

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

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

مثال ۲: در نقطه‌ای از یک میدان الکتریکی، بر بار الکتریکی مثبتی معادل 10^{-5} کولن نیرویی برابر با ۰/۲ نیوتن وارد می‌شود. شدت میدان الکتریکی در این نقطه چه‌قدر است؟

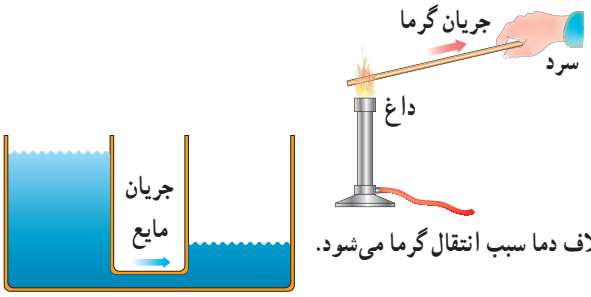
$$E = \frac{F}{q'} = \frac{0/2}{10^{-5}} = 2\times10^4 \frac{N}{C}$$

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، هم‌جهت با میدان و نیروی وارد بر بار منفی، در خلاف جهت میدان است.

۱۲ــ۱ــ اختلاف پتانسیل الکتریکی

وقتی یک جسم رسانا که بار الکتریکی منفی دارد به زمین متصل می‌شود، الکترون‌ها (یعنی بارهای منفی) از آن جسم به‌زمین می‌روند. هم‌چنین، اگر یک جسم رسانا با بار الکتریکی مثبت با زمین اتصال پیدا کند، تعدادی الکترون از زمین به جسم منتقل می‌شود. حرکت الکترون‌ها و به‌عبارت 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 به‌نقطه‌ی دیگر می‌شود. با توجه به این واقعیت، می‌توان اختلاف پتانسیل را با اختلاف دما ــ که سبب انتقال گرما در یک جسم می‌شود ــ یا اختلاف فشار مایع بین دو ظرف به‌هم پیوسته ــ که سبب جاری شدن مایع بین دو ظرف می‌گردد ــ 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 هم‌جهت جریان یافتن الکتریسیته را تعیین می‌کند.



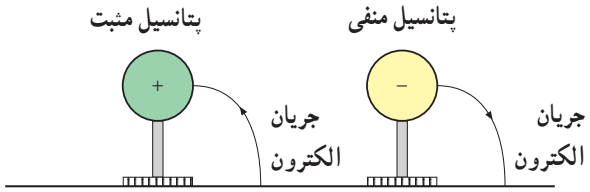
اختلاف دما سبب انتقال گرما می‌شود.

اختلاف فشار مایع را جابه‌جا می‌کند.

شکل ۲۳ــ۱ــ 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 به‌عنوان مبدأ مقایسه یا نقطه‌ی صفر قبول شده است، در عمل زمین را نیز به‌عنوان 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 صفردرجه دارای انرژی داخلی نیست. درحقیقت، زمین بار منفی دارد ولی اندازه‌ی این بار منفی به‌قدری زیاد است که دادن مقداری بار الکتریکی به آن یا گرفتن بار از آن در بار الکتریکی‌اش، تأثیرمحسوسی نخواهد داشت.



شکل ۲۴ــ۱ــ زمین درحکم 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 درنظر می‌گیرند. هنگامی که یک جسم باردار به وسیله‌ی یک رشته سیم به‌زمین متصل می‌شود، اگر الکترون‌ها از زمین به‌سوی جسم جریان یابند پتانسیل جسم مثبت است. برعکس، اگر در این ارتباط الکتریکی، الکترون‌ها از جسم به‌زمین بروند پتانسیل جسم منفی است. بنابراین، پتانسیل اجسام باردار رسانا پس از اتصال به‌زمین 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 بارالکتریکی 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.

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

اختلاف پتانسیل بین دوجسم 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:

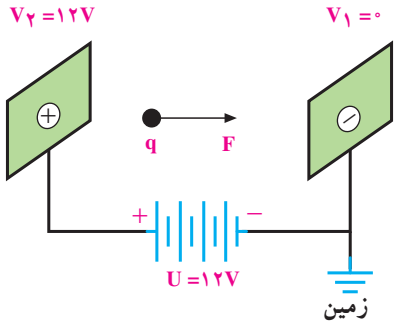
$$U = V_2 - V_1$$

مثلاً وقتی می‌گوییم اختلاف پتانسیل میان دو قطب یک باتری اتومبیل ۱۲ ولت است، یعنی برای انتقال واحد بارالکتریکی (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 ۱۲ولتی را مطابق شکل ۲۵ــ۱ 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

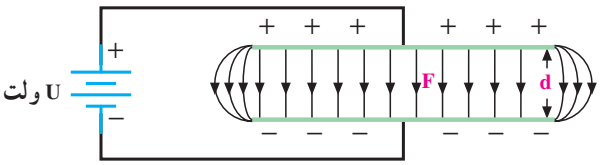
$-q$ را از V_2 به V_1 انتقال دهیم، باید به اندازه‌ی $W = U.q$ انرژی مصرف کنیم. برعکس، اگر همین بارالکتریکی را از V_1 به V_2 برگردانیم، انرژی به مقدار $W = U.q$ آزاد خواهد شد.

در این مثال، اگر V_1 و V_2 با یک رشته سیم به هم متصل شوند، الکترون‌ها به‌سوی V_2 جریان می‌یابند و انرژی آزاد شده به گرما تبدیل می‌شود.



شکل ۲۵ــ۱ــ وقتی بار الکتریکی q از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر که بین آن‌ها اختلاف پتانسیل U موجود است انتقال می‌یابد، انرژی U.q آزاد می‌شود.

میدان الکتریکی یک‌نواخت: میدان یک‌نواخت، 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 ۲۶ــ۱ به‌طور موازی در مقابل یک‌دیگر قرار گرفته‌اند، به‌دو قطب یک باتری متصل کنیم. در این صورت، در فضای بین دو صفحه میدان الکتریکی یک‌نواختی ایجاد می‌شود ولی در فضای بیرونِ دو صفحه و در مجاورت لبه‌ی صفحه‌ها ــ همان‌طور که در شکل دیده می‌شود ــ میدان الکتریکی یک‌نواخت نیست.



شکل ۲۶ــ۱ــ میدان الکتریکی یک‌نواخت

فرض کنید می‌خواهیم بار مثبت $+q$ را از صفحه‌ی بالایی به صفحه‌ی پایینی منتقل کنیم. انرژی لازم برای انجام این کار، با حاصل‌ضرب نیرو در تغییر مکان برابر است؛ یعنی : $W = Fd$

برای به‌دست آوردن هم‌ارز الکتریکی این معادله، کافی است روابط $W = Uq$ و $F = qE$ را به‌کار ببریم. بنابراین، اگر در رابطه‌ی $W = Fd$ به‌جای W و F معادل آن‌ها را قرار دهیم، خواهیم داشت :

$$Uq = qE.d$$

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

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 :

$$۱\frac{\text{ولت}}{\text{متر}} = ۱\frac{\text{نیوتن}}{\text{کولن}}$$

مثال۳: بین دو صفحه‌ی موازی که به‌فاصله‌ی ۲ سانتی‌متر از یک‌دیگر قرار دارند، اختلاف پتانسیل ۱۰۰۰ولت برقرار شده است.

الف) شدت میدان الکتریکی بین دو صفحه را حساب کنید.

ب) اگر یک پروتون با بار مثبت : $۱/۶۰۲\times۱۰^{-۱۹}\,C$ بین این دو صفحه قرار گیرد، چه نیرویی بر آن وارد می‌شود؟

ــ مقادیر داده شده عبارت‌اند از : $d = ۰/۰۲۰m$ و $U = ۱۰۰۰V$ و $q = ۱/۶۰۲\times۱۰^{-۱۹}\,C$.

الف) $E = \frac{U}{d} = \frac{۱۰۰۰}{۰/۰۲۰} = ۵۰۰۰۰\frac{V}{m} = ۵۰۰۰۰\frac{N}{C}$

ب)

$$F = Eq = ۵۰۰۰۰\times۱/۶۰۲\times۱۰^{-۱۹} = ۸/۰۱\times۱۰^{-۱۵}N$$

۱۳ــ۱ــ 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.

شکل ۲۷ــ۱ــ صاعقه

تحقیق کنید

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

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

فکر کنید

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

۱۴ــ۱ــ کاربرد الکتریسیته‌ی ساکن

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

الف ــ 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 ــ دستگاه رنگ‌پاش: در این دستگاه جسمی که قرار است رنگ شود را مثبت باردار می‌کنند و رنگ را در رنگ پاش 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.

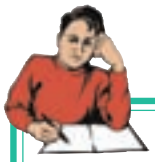
الف) دستگاه رنگ‌پاش الکترواستاتیکی

ب) دستگاه غبارگیر الکترواستاتیکی

شکل ۲۸ــ۱ــ کاربردهایی از الکتریسیته‌ی ساکن

تحقیق کنید

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



پرسش

۱ــ چه ذراتی الکتریسیته تولید می‌کنند؟

۲ــ پروتون بار ..... و الکترون بار ..... دارد.

۳ــ اگر یک الکترون در نزدیکی یک پروتون باشد، آیا پروتون، الکترون را جذب می‌کند یا دفع؟

۴ــ چرا پروتون‌های داخل هسته با نیروی کافی یک‌دیگر را دفع نمی‌کنند تا هسته منهدم شود؟

۵ ــ سه راه برای باردار کردن یک جسم را نام ببرید.

۶ــ آیا نیروی دافعه‌ی بین دو الکترون با فاصله‌ی کم بیش‌تر است یا با فاصله‌ی زیاد؟ اگر فاصله‌ی بین یک پروتون و یک الکترون دو برابر شود، اندازه‌ی نیروی جاذبه در مقایسه با نیروی قبلی چه‌قدر است؟

۷ــ قانون کولن را شرح دهید.

۸ ــ چرا به عقب بدنه‌ی فلزی تانکرهای حمل سوخت زنجیر کوتاهی که با سطح زمین تماس دارد، آویزان می‌کنند؟

۹ــ لایه چیست و دور هر اتم چند لایه وجود دارد؟

۱۰ــ الکترون آزاد یا والانس چیست؟

۱۱ــ آیا عنصری که شش الکترون والانس دارد، هادی خوبی است؟ دو الکترون والانس چه‌طور؟

۱۲ــ شدت میدان الکتریکی را شرح دهید.

۱۳ــ اختلاف پتانسیل الکتریکی را تعریف کرده و واحد اندازه‌گیری آن‌را بیان کنید.

۱۴ــ چرا هنگام تمیز کردن صفحه‌ی تلویزیون با پارچه‌ی خشک، پُرزهای پارچه به صفحه‌ی تلویزیون می‌چسبند؟

۱۵ــ چرا هنگام بیرون آوردن لباس از بدن، جرقه‌هایی در لباس زده می‌شود؟

۱۶ــ شیر آب سرد را کمی باز کنید تا باریکه‌ای از آب تشکیل شود. با یک شانه پلاستیکی چند بار سر خود را شانه بزنید شانه را به باریکه آب نزدیک کنید چه اتفاقی می‌افتد؟ چرا؟

تمرین

۱ــ دو بار نقطه‌ای مثبت و مساوی، هریک برابر $۱۰^{-۴}$ کولن به فاصله‌ی دو متر از یک دیگر قرار دارند. نیروی بین آن‌ها چند نیوتن است؟

ج) ۲۲/۵N

۲ــ اندازه و نوع نیروی بین یک بار منفی ۵ میکروکولنی و یک بار مثبت ۲ میکروکولنی را که به فاصله‌ی ۹ سانتی‌متر از یک‌دیگر قرار دارند، تعیین کنید.

ج) ۱۱/۱۱N

۳ــ دو بار همنام وقتی به فاصله‌ی d از یک‌دیگر واقع شوند، نیروی معین F را به‌هم 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؟

۴ــ بارمثبت ۵×۱۰^{-۷} کولنی وقتی در نقطه‌ای از یک میدان الکتریکی قرار گیرد، نیرویی برابر ۰/۰۴N بر آن وارد می‌شود. شدت میدان الکتریکی را در این نقطه حساب کنید.

ج) $E=۸\times۱۰^{۴}\ \frac{N}{C}$

۵ــ شدت میدان الکتریکی در یک میدان یک‌نواخت (یعنی میدانی که شدت آن ثابت و خطوط نیروی آن موازی و هم‌جهت است) برابر $۱۰۰۰\frac{N}{C}$ است. اندازه‌ی نیروی وارد بر یک الکترون را وقتی که در این میدان قرار می‌گیرد، حساب کنید. بار الکتریکی الکترون را $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ بگیرید.

ج) $F=۱/۶\times۱۰^{-۱۶}N$

۶ــ بار الکتریکی q در میدان الکتریکی یک‌نواخت به شدت $۲۰\frac{N}{C}$ قرار گرفته و نیرویی برابر $۳\times۱۰^{-۴}N$ بر آن وارد شده است. مقدار بار q چند کولنی بوده است؟

ج) $q=۱/۵\times۱۰^{-۵}C$

۷ــ اگر یک الکترون که بارالکتریکی آن در حدود $e\simeq۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ 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؟

ج) $W=۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$ ژول

فصل دوم

آشنایی با روش‌های تولید الکتریسیته

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ روش‌های تولید الکتریسیته را نام ببرد.

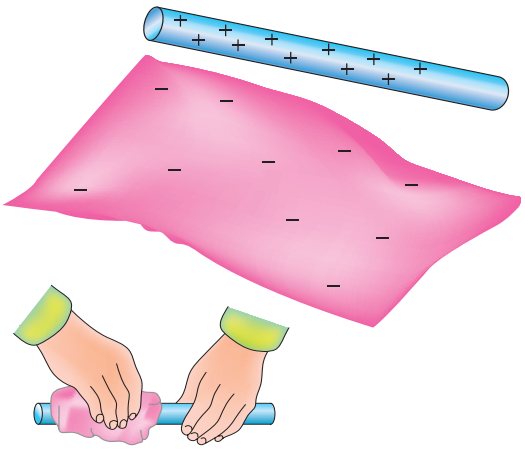
۲ــ هر یک از روش‌های تولید الکتریسیته را شرح دهد.

۳ــ مورد استفاده‌ی هر یک از روش‌های تولید الکتریسیته را نام ببرد.

در فصل اول، در مورد چگونگی خارج کردن الکترون‌ها از مدارهایشان سخن گفتیم ولی در مورد چگونگی انجام این کار توضیح ندادیم. این کار را به روش‌های زیر می‌توان انجام داد.

۱ــ۲ــ الکتریسیته‌ی حاصل از اصطکاک (مالش)

هنگامی که پارچه‌ی ابریشمی را با یک میله‌ی شیشه‌ای یا یک میله‌ی کائوچویی را به پارچه‌ی پشمی مالش دهیم، بار الکتریکی تولید می‌شود. به این بارها **الکتریسیته‌ی ساکن** می‌گویند. الکتریسیته‌ی ساکن هنگامی به‌وجود می‌آید که جسمی الکترون‌هایش را به جسم دیگر منتقل کند. بر اثر مالش، انرژی حرارتی بر اتم‌های سطح خارجی به‌وجود می‌آید که موجب آزادکردن الکترون‌های والانس می‌شود. به این **اثر تریبوالکتریک** (TRIBOELECTRIC) نیز می‌گویند.

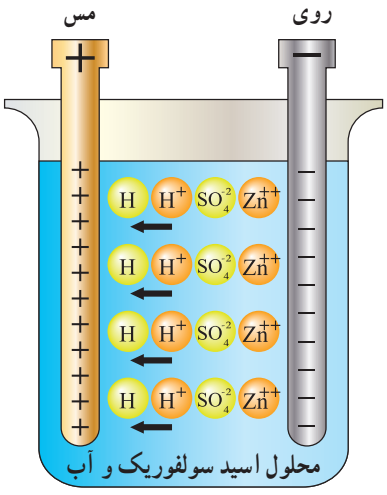


پس از مالش دادن یک میله‌ی شیشه‌ای به پارچه‌ی ابریشمی، آن‌ها دارای بار الکتریکی می‌شوند.

شکل ۱ــ۲ــ الکتریسیته‌ی مالشی (تریبوالکتریک)

۲ــ۲ــ الکتریسیته‌ی حاصل از فعل و انفعالات شیمیایی

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 ــ هیدروژن (H) و سولفات (SO_4) ــ تجزیه می‌گردد. به علت طبیعت ترکیبات شیمیایی، اتم‌های هیدروژن یون‌های مثبت (H^+) و اتم‌های سولفات یون‌های منفی (SO_4^{-2}) دارند. تعداد بارهای مثبت و منفی مساوی‌اند و در نتیجه، کل محلول ازنظر بار الکتریکی خنثی است. پس از آن، هنگامی که میله‌های مسی یا روی را به داخل محلول وارد می‌کنیم، با محلول ترکیب می‌شوند.



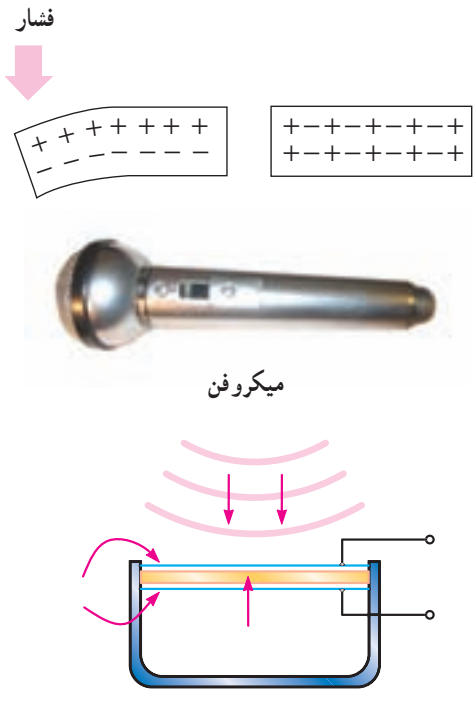
شکل ۲ــ۲ــ ساختمان یک نوع باتری تر

فلز روی با یون‌های سولفات ترکیب می‌شود. چون این اتم‌ها منفی‌اند، یون‌های مثبت (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 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.

۳ــ۲ــ الکتریسیته‌ی 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.

به اثر فشار برای تولید بارهای الکتریکی، **اثر پیزوالکتریک**[1] 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.



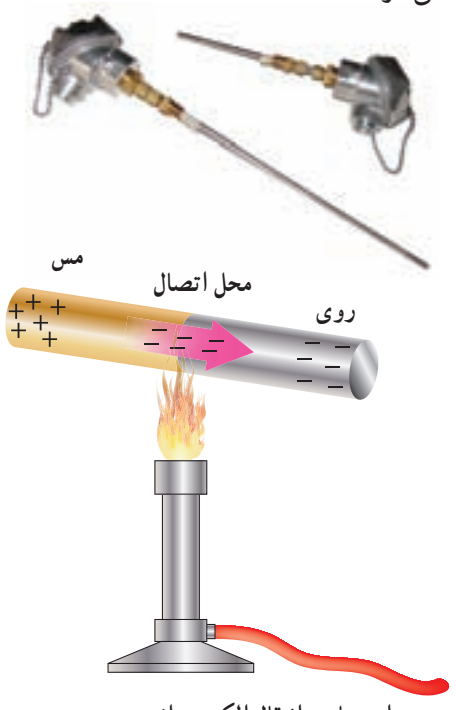
شکل ۳ــ۲ــ اثر پیزوالکتریک

۱ ــ Piezo Electric Effect

۴ــ۲ــ تولید الکتریسیته به‌وسیله‌ی حرارت

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

بارهایی که در درجه‌ی 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 وسیله‌ی 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. به‌اتصال این دو فلز **ترموکوپل** می‌گویند. هنگامی که چندین ترموکوپل به یک‌دیگر متصل شوند، یک **ترموپیل** (باتری حرارتی) به‌وجود می‌آید. از ترموکوپل برای اندازه‌گیری درجه‌ی حرارت در کوره‌ها استفاده می‌شود.

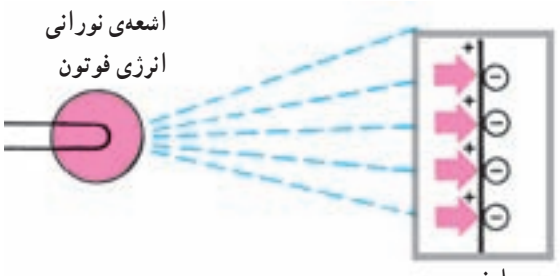


حرارت باعث انتقال الکترون از مس به روی می‌شود.

شکل ۴ــ۲ــ ترموالکتریک (الکتریسیته‌ی حرارتی) و یک نمونه واقعی آن

۵ــ۲ــ الکتریسیته‌ی حاصل از نور

نور نوعی انرژی است که از ذرات حامل انرژی به نام فوتون به‌وجود 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 صفحه‌ی متصل به هم، باعث تخلیه‌ی الکترون از یکی به دیگری می‌شود. در نتیجه، مانند باتری در دو صفحه بارهای مخالف ایجاد می‌شود (شکل ۵ــ۲) که به آن اثر فوتوولتیک[1] می‌گویند.

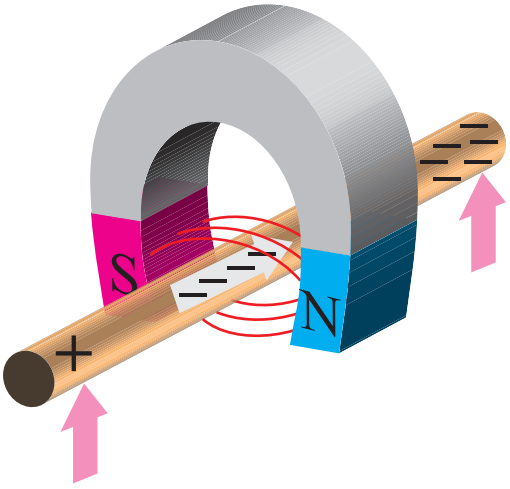


شکل ۵ ــ۲ــ سلول‌های خورشیدی که براساس اثر فوتوولتیک کار می‌کنند.

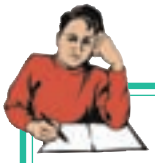
۱ــ Photo Voltaic

۶ــ۲ــ 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 آن‌قدر 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 ــ۲ــ الکتریسیته‌ی ناشی از مغناطیس



پرسش

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

فصل سوم

الکتریسیته ی جاری

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ چگونگی حرکت الکترون‌ها و مفهوم سرعت حرکت الکترون‌ها را بیان کند.

۲ــ مفهوم جریان الکتریکی و تفاوت میان سرعت الکترون‌ها و سرعت انتقال اثر را شرح دهد.

۳ــ واحد کمیّت‌های جریان و ولتاژ را تعریف کند و محاسبات لازم را انجام دهد.

۴ــ مدار باز و مدار بسته را تشریح کند.

۱ــ۳ــ الکترون آزاد

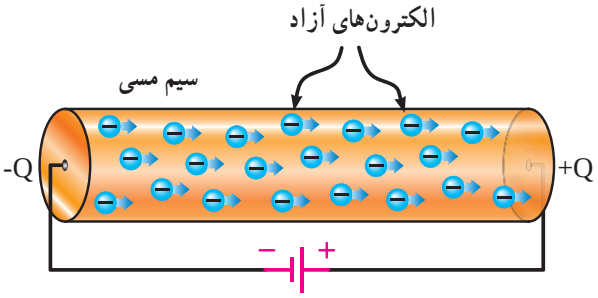
اغلب الکترون‌های والانس به طور مداوم ولی بدون ترتیب، مدارهایشان را عوض می‌کنند و سرگردان و بی‌مقصدند ؛ یعنی، هیچ یک از الکترون‌های والانس مختص یک اتم نیستند بلکه همه‌ی اتم‌ها الکترون‌های والانسشان را به اشتراک می‌گذارند و بدین ترتیب به یک دیگر متصل می‌شوند. این گونه پیوند، **پیوند فلزی** نام دارد و الکترون‌های سرگردان و بی‌مقصد الکترون آزاد نامیده می‌شوند. بنابراین، الکترون‌های آزاد در یک سیم مسی به طور اتفاقی مدارهای خود را تغییر می‌دهند و این عمل مداوم است. بدین ترتیب، هر اتم همیشه الکترونی دارد که در حال جابه‌جا شدن است در نتیجه، هیچ بار الکتریکی‌ای حاصل نمی‌شود ولی هادی مقدار زیادی الکترون آزاد دارد.

شکل ۱ــ۳ ــ حرکت تصادفی الکترون‌های آزاد

۲ــ۳ــ حرکت الکترون

برای این که جریان الکتریکی تولید شود، همه‌ی الکترون‌های آزاد در سیم مسی باید در یک جهت حرکت کنند. این عمل را می‌توان 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 ۲ــ۳ الکترون‌های آزاد به وسیله‌ی بارهای منفی دفع و به وسیله بارهای مثبت جذب شده‌اند و در نتیجه، مدارهای آن‌ها عوض شده و به طرف بارهای مثبت جذب شده‌اند. بار الکتریکی الکترون‌ها منفی است ؛ پس به وسیله‌ی بارهای منفی اعمالی دفع و به وسیله‌ی بارهای مثبت اعمالی جذب می‌شوند. به‌همین علت نمی‌توانند به مداری تغییر مکان دهند که باعث حرکت آن‌ها در خلاف جهت نیروی بارهای الکتریکی شود. در عوض، مدارهایشان را چنان تغییر می‌دهند که حرکتشان در جهت بار مثبت باشد. بدین لحاظ، جریان الکتریکی در جهت بار منفی به‌طرف بار مثبت برقرار می‌شود.



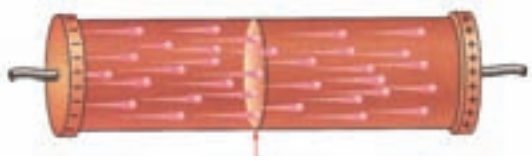
انرژی داده شده به مدار

شکل ۲ــ۳ــ حرکت الکترون‌ها

۳ــ۳ــ 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 درجهت معینی به‌حرکت 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 ۳ــ۳ــ جریان الکتریکی

۴ــ۳ــ عبور جریان

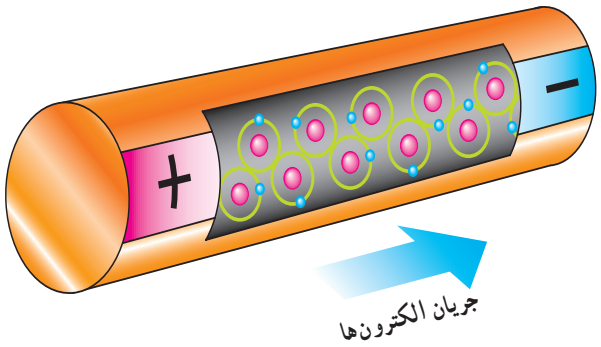
گاهی اوقات برای سادگی حرکت الکترون‌های آزاد را جریان الکتریکی می‌نامیم ولی صحیح‌تر این است که حرکت الکترون‌های آزاد را علت جریان الکتریکی بدانیم این موضوع با مقایسه سرعت یک الکترون با سرعت جریان روشن می‌شود.

الکترون آزادی که تحت تأثیر بارهای الکترواستاتیک به‌حرکت 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 ۳۰ کیلومتر حرکت کنند، بیش از ۳۰ روز طول می‌کشید اما می‌دانیم که جریان الکتریکی با سرعت نور یعنی ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر در ثانیه حرکت می‌کند و این مسافت را در کسری از ثانیه طی می‌کند.

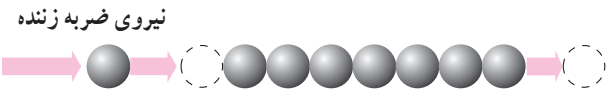
۵ــ۳ــ ضربان‌های الکترونی

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 ۲۹۹۳۴۰ 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 ۵ــ۳ 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 به‌سرعت انجام می‌گیرد که تقریباً در همان لحظه‌ای که به گلوله‌ی اول ضربه زده می‌شود، گلوله‌ی آخر رها می‌شود.



شکل ۴ــ۳ــ ضربان‌های الکترونی



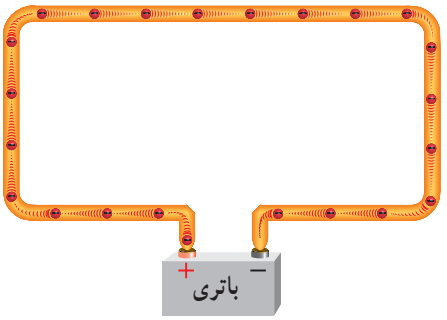
شکل ۵ــ۳ــ انتقال ضربه در گلوله‌های فلزی

۶ــ۳ــ شدت جریان الکتریکی

هنگامی که الکترون‌ها در جهت معینی حرکت کنند، جریان الکتریکی از مدار عبور می‌کند. بنابراین، اثر الکترون‌ها با یک‌دیگر 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.

۷ــ۳ــ مدار کامل (بسته)

برای این‌که 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.

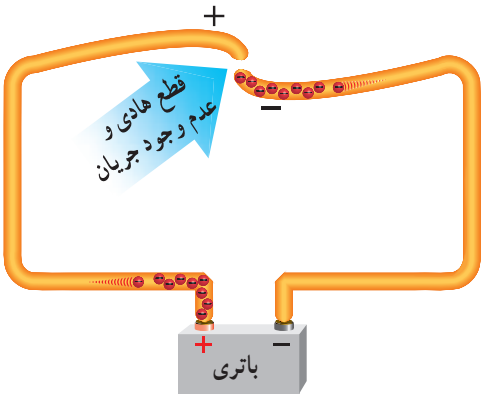


شکل ۶ ــ۳ــ مدار کامل (بسته)

قرارداد: قبل از کشف حرکت الکترون‌ها (که منشأ جریان الکتریکی است) چنین تصور می‌شد که جریان از پتانسیل بیش‌تر (مثبت) به‌طرف 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 این‌که 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.

۸ــ۳ــ مدار باز

طبق شکل ۷ــ۳ 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 انتهای دیگر سیم به قطب مثبت جذب می‌گردند ؛ بنابراین، بین دو سر قطع شدگی اختلاف بار به‌وجود می‌آید که با اختلاف بار الکتریکی منبع برابر است. در نتیجه، جریانی از مدار عبور نمی‌کند. به چنین مداری، **مدار باز** می‌گویند.



شکل ۷ــ۳ــ مدار باز

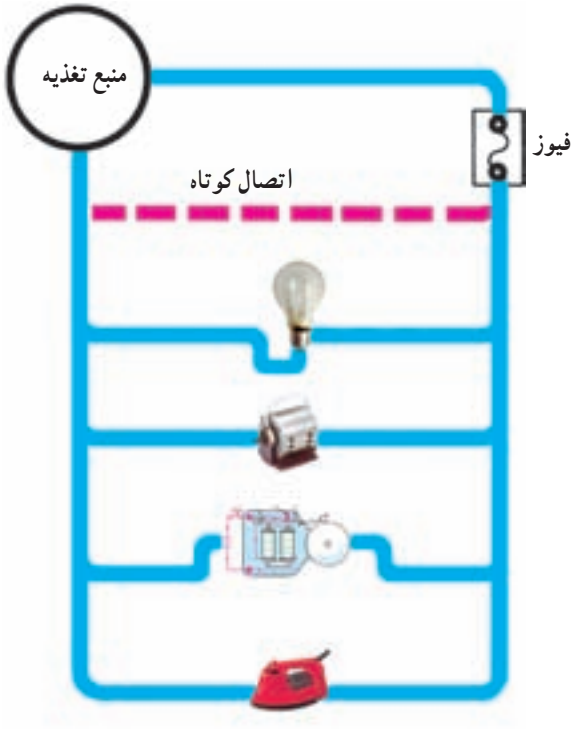
۹ــ۳ــ حالت اتصال کوتاه

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 می‌شود.

از سیم در دستگاه‌های الکتریکی برای جاری‌شدن جریان استفاده می‌شود تا این دستگاه‌ها را به کار اندازد. برای مثال، یک رشته سیم جریان را حمل می‌کند تا فیلامان لامپ گرم شود و نور به‌وجود آید یا انرژی الکتریکی لازم برای به راه افتادن موتور تأمین شود، زنگی به صدا درآید یا اتو گرم شود.

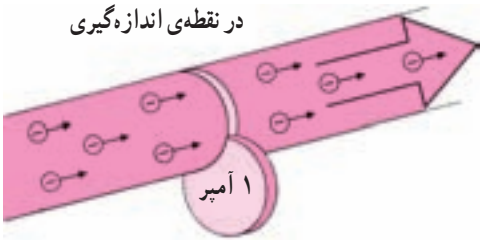
شکل ۸ــ۳ کاربردهای مختلف الکتریسیته‌ی جاری را نمایش می‌دهد.



شکل ۸ــ۳ــ کاربردهای الکتریسیته‌ی جاری

۱۰ــ۳ــ واحد اندازه‌گیری شدت جریان (آمپر)

تعداد الکترون‌هایی که از یک نقطه‌ی مدار می‌گذرند، مقدار جریان عبوری از مدار را تعیین می‌کنند. اگر از یک نقطه‌ی سیم در یک ثانیه ۱ کولن الکتریسیته ($۶/۲۸\times۱۰^{۱۸}$ الکترون) در جهت مشخص بگذرد، می‌گوییم شدت جریان عبوری ۱ آمپر است. بنابراین تعریف رابطه‌ی شدت جریان را می‌توان به صورت $I=\frac{q}{t}$ نشان داد که در آن q مقدار الکتریسیته بر حسب کولن، t زمان برحسب ثانیه و I شدت جریان برحسب آمپر است. نام این واحد ــ یعنی آمپر ــ از نام یک فیزیک‌دان ایتالیایی قرن هجدهم به نام آندره ماری آمپر گرفته شده است.



$$۱\ \text{آمپر}=\frac{\text{یک کولن}}{\text{یک ثانیه}}=\frac{۶/۲۸\times۱۰^{۱۸}}{۱}=۶/۲۸\times۱۰^{۱۸}\ e$$

شکل ۹ــ۳ــ تعریف آمپر

مثال۱: اگر $۱۲/۵۶\times۱۰^{۱۸}$ الکترون در مدت ۲ ثانیه در جهت مشخص از سیمی بگذرد، شدت جریان عبوری از سیم چه‌قدر است؟

$$q=\frac{۱۲/۵۶\times۱۰^{۱۸}}{۶/۲۸\times۱۰^{۱۸}}=۲\quad \text{کولن}$$

$$I=\frac{q}{t}=\frac{۲}{۲}=۱A$$

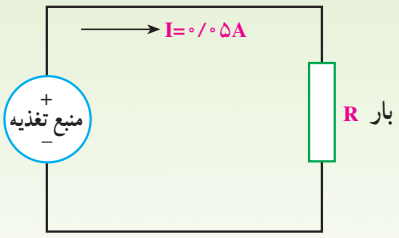
۱۱ــ۳ــ اجزا و اضعاف واحدهای اصلی الکتریکی

در مباحث الکتریکی اغلب ؛ مقدار عددی کمیت‌های مختلف به همراه واحد آن‌ها بیان می‌شود. در برخی موارد ممکن است واحد مربوطه با ضریبی کوچک‌تر (اجزا) و یا بزرگ‌تر (اضعاف) از واحد اصلی بیان شود. برای تبدیل هر کمیت به واحد اصلی لازم است تا از مقادیر عددی نمایش داده شده در جدول ۱ــ۳ استفاده کرد.

جدول ۱ــ۳ ــ اجزا و اضعاف واحدهای اصلی

حرف اختصاری	نام ضریب	شکل‌نمایی ضریب	مقدار ضریب
T	ترا	$۱۰^{۱۲}$	۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
G	گیگا	$۱۰^{۹}$	۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰
M	مگا	$۱۰^{۶}$	۱۰۰۰۰۰۰
k	کیلو	$۱۰^{۳}$	۱۰۰۰
h	هکتو	$۱۰^{۲}$	۱۰۰
da	دکا	۱۰	۱۰
	واحد اصلی	$۱۰^{۰}$	۱
d	دسی	$۱۰^{-۱}$	۰/۱
c	سانتی	$۱۰^{-۲}$	۰/۰۱
m	میلی	$۱۰^{-۳}$	۰/۰۰۱
μ	میکرو	$۱۰^{-۶}$	۰/۰۰۰۰۰۱
n	نانو	$۱۰^{-۹}$	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱
p	پیکو	$۱۰^{-۱۲}$	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱

مثال۲: شدت جریان عبوری از مدار شکل (۱۰ــ۳) معادل چند میلی‌آمپر است؟

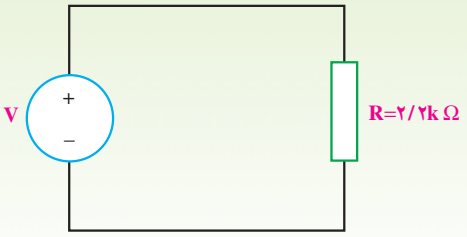


شکل ۱۰ــ۳

$$I = ۰/۰۵ \times ۱۰^{۳} = ۵ \times ۱۰^{-۲} \times ۱۰^{۳}$$

$$I = ۵۰mA$$

مثال۳: مقاومت R در مدار شکل (۱۱ــ۳) معادل چند اهم است؟



شکل ۱۱ــ۳

$$R = ۲/۲ \times ۱۰^{۳} = ۲۲۰۰\Omega$$

مثال۴: ولتاژ نشان داده شده در بین دو سیم شکل(۱۲ــ۳) معادل چند میلی‌ولت است؟

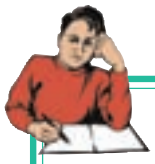
شکل ۱۲ــ۳

$$V = ۲۳۰ \times ۱۰^{۳} = ۲۳۰۰۰۰V$$

$$V = ۲۳۰۰۰۰ \div ۱۰^{-۳} = ۲۳۰۰۰۰ \times ۱۰^{۳}$$

$$= ۲۳ \times ۱۰^{۴} \times ۱۰^{۳} = ۲۳ \times ۱۰^{۷}$$

$$V = ۲۳۰۰۰۰۰۰mV$$



پرسش

۱ــ جریان الکتریکی را تعریف کنید.

۲ــ پیوند فلزی چیست؟

۳ــ آیا مدار الکترون‌های اتم‌های مختلف در یک سیم با یک‌دیگر تداخل می‌کنند؟

۴ــ ضربان الکترون‌ها چیست و چرا با سرعت الکترون تفاوت دارد؟

۵ــ چگونه فیوز از عبور جریان زیاد در مدار جلوگیری می‌کند؟

۶ــ آیا الکترون‌ها تحت تأثیر یک ولتاژ، با سرعت نور از اتمی به اتم دیگر می‌روند؟

فصل چهارم

آثار جریان الکتریکی

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

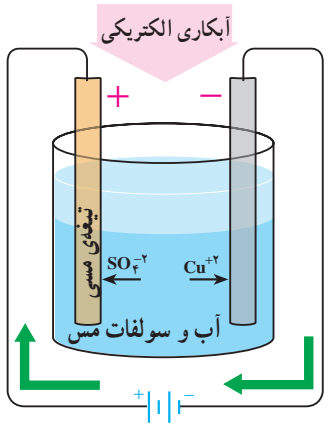
۱ــ آثار جریان الکتریکی را نام ببرد.

۲ــ هرکدام از این آثار را با ذکر مثال‌هایی توضیح دهد.

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

۱ــ۴ــ 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.

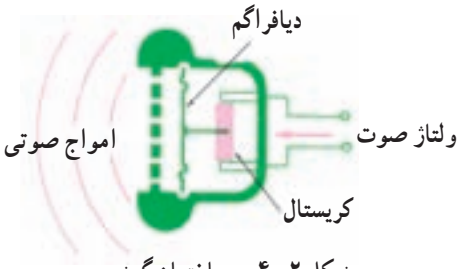


شکل ۱ــ۴ــ آبکاری برقی با استفاده از الکترولیز

یک نمونه از کاربرد الکترولیز، آبکاری برقی است. اگر آب با سولفات مس(SO_4Cu) همراه باشد، سولفات مس به یون‌های مثبت مس(Cu^{++}) و یون‌های منفی سولفات (SO_4^{-2}) 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.

۲ــ۴ــ تولید فشار به‌وسیله‌ی جریان الکتریکی

همان‌طورکه 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 ۲ــ۴ وقتی ولتاژ صوتی به کریستال‌های گوشی داده می‌شود، کریستال‌ها ارتعاش می‌کنند و دیافراگم را می‌لرزانند. درنتیجه‌ی این امر، صدا از طریق گوشی شنیده می‌شود.



شکل ۲ــ۴ــ ساختمان گوشی

۳ــ۴ــ تولید گرما به‌وسیله‌ی 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 ۳ــ۴ موارد استفاده‌ی اثر حرارتی الکتریسیته را نمایش می‌دهد.

شکل ۳ــ۴ــ موارد استفاده‌ی اثر حرارتی الکتریسیته

۴ــ۴ــ تولید نور به‌وسیله‌ی جریان الکتریکی

وقتی که از هادی‌های ضعیف جریانی عبور می‌کند، داغ می‌شوند و این گرما را به‌صورت نور قرمز یا سفید ظاهر می‌کنند. درنتیجه، به‌علت 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 به‌عنوان مثال نام برد. موارد استفاده‌ی آن را نیز در چراغ‌های معابر و لامپ‌های نئون تبلیغاتی فروشگاه‌ها دیده‌اید.

گازی مانند بخار جیوه هنگام حمل جریان الکتریکی یونیزه می‌شود و اشعه‌ی ماورای بنفش از خود متصاعد می‌کند. این اشعه با لایه‌ی فسفرسانس(پودر سفید رنگ چسبیده به جداره‌ی داخلی شیشه مهتابی) برخورد می‌کنند و «نور سفید» می‌دهند.

لامپ معمولی

فلورسانس

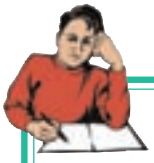
شکل ۴ــ۴ــ دو نوع لامپ برای تبدیل جریان الکتریکی به نور

۵ــ۴ــ تولید مغناطیس به‌وسیله‌ی جریان الکتریکی

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

در شکل ۵ ــ۴ هنگامی که جریان الکتریکی از سیم عبور کند، سیم مانند مغناطیس عمل می‌کند و براده‌های آهن را جذب می‌نماید. در صورت قطع‌شدن سیم، خاصیت مغناطیسی سیم از بین می‌رود و براده‌ها می‌افتند.

شکل ۵ــ۴ــ تولید خاصیت مغناطیس توسط جریان الکتریکی



پرسش

۱ــ پنج اثر جریان الکتریکی را نام ببرید.

۲ــ آبکاری برقی چیست؟

۳ــ 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.

۴ــ لامپ معمولی چگونه نور تولید می‌کند؟

۵ــ در لامپ‌های نئون از یک ..... به‌عنوان هادی استفاده شده است.

۶ــ گوشی کریستالی براساس چه قانونی کار می‌کند؟ کدام وسایل دیگر نیز بر مبنای این قانون کار می‌کنند؟

۷ــ خاصیت مغناطیسی تولید شده توسط الکتریسیته چیست؟

فصل پنجم

مغناطیس و الکترومغناطیس

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی بار الکتریکی الکترون را شرح دهد.

۲ــ مولکول مغناطیسی را شرح دهد.

۳ــ اجسام مغناطیسی را نام ببرد.

۴ــ روش‌های ساختن یک مغناطیس و از بین بردن خاصیت مغناطیسی یک آهن‌ربا را شرح دهد.

۵ ــ خطوط میدان و میدان مغناطیسی را تعریف کند.

۶ ــ پوشش مغناطیسی را شرح دهد.

۷ــ الکترومغناطیس را تعریف کند.

۸ ــ اثر الکترومغناطیس را در یک سیم بیان کند.

۹ــ چگونگی تعیین جهت میدان در یک سیم و بوبین را بیان کند.

۱۰ــ اثر الکترومغناطیس در دو سیم جریان‌دار را شرح دهد.

۱۱ــ اثر الکترومغناطیس را در یک حلقه شرح دهد.

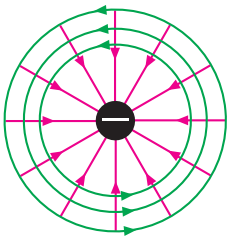
۱۲ــ اثر الکترومغناطیس را در بوبین شرح دهد و دلیل قوی‌تر شدن میدان مغناطیسی بوبین با هسته‌ی مغناطیسی را توضیح دهد.

۱۳ــ کاربردهای مغناطیس را نام ببرد و ساختمان ساده‌ی هر یک از وسایلی را که با مغناطیس کار می‌کنند، به‌طور مختصر توضیح دهد.

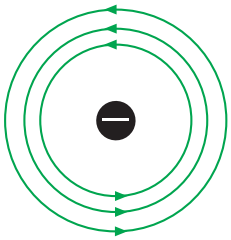
۱ــ۵ــ سنگ آهن مغناطیسی

در حدود دو هزار سال پیش یونانیان قدیم سنگ آهن مغناطیسی را کشف کردند. چون این سنگ‌ها آهن را جذب کردند و در ناحیه‌ی مگنز یا در آسیای صغیر پیدا شده بود، آن‌ها را مغناطیس خواندند. بعدها کشف شد که اگر این سنگ را به‌وسیله‌ی یک نخ آویزان کنند، به خودی خود جنوب و شمال را مشخص می‌کند. به همین دلیل، آن را سنگ راهنما یا آهن‌ربا نامیدند. پس آهن‌ربا در اصل یک مغناطیس طبیعی است.

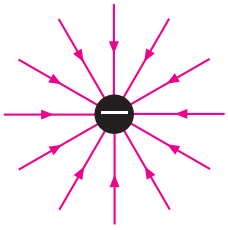
شکل ۱ــ۵ ــ سنگ آهن طبیعی



میدان الکترومغناطیس



میدان مغناطیسی



میدان الکتریسیته‌ی ساکن

شکل ۲ــ۵ــ میدان الکترومغناطیسی

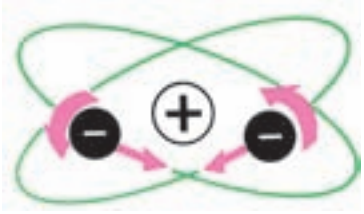
۲ــ۵ــ میدان الکترومغناطیسی

نیروهای الکتریکی و مغناطیسی به یک‌دیگر مربوط‌اند 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 به‌وجود 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، دراطراف خود میدان مغناطیسی تولید می‌کند. این میدان به صورت دوایر 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.

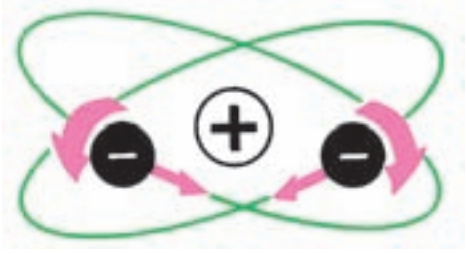
۳ــ۵ــ مولکول مغناطیسی

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 درمدارها دارای گردش وضعی مخالف یک‌دیگرند. لذا میدان‌های مغناطیسی مخالف هم ایجاد می‌کنند که یک‌دیگر را خنثیٰ 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 به‌صورت 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 خنثیٰ می‌کنند. در شکل ۳ــ۵ با حرکت وضعی جفت الکترون‌ها اثر مغناطیسی آن‌ها خنثیٰ می‌شود.



شکل ۳ــ۵ــ اتم غیرمغناطیس

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 والانسشان را طوری به اشتراک می‌گذارند که بسیاری از میدان‌های مغناطیسی حاصل از چرخش‌های وضعی الکترون‌ها یک‌دیگر را خنثیٰ 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 ۴ــ۵ در مولکول‌های مغناطیسی حرکت وضعی الکترون‌ها طوری است که میدان‌های مغناطیسی یک‌دیگر را خنثیٰ نمی‌کنند ؛ بنابراین، مولکول خاصیت مغناطیسی دارد.



شکل ۴ــ۵ ــ اتم مغناطیسی

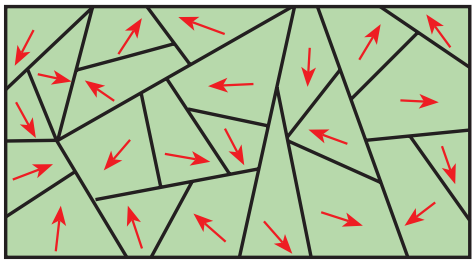
۴ــ۵ــ خواص مغناطیسی اجسام

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

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

از جمله‌ی این مواد آهن و آلیاژهای آهن هستند که به آن‌ها **موادِ فرّومغناطیسی** می‌گویند. فرّو در یونانی به معنی آهن است.

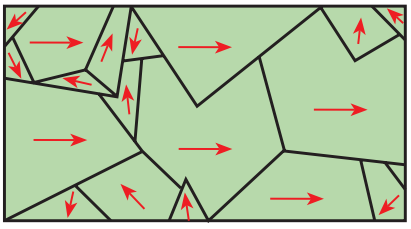
اجسام مغناطیسی مولکول‌های مغناطیسی دارند. پس ظاهراً باید همیشه مانند مغناطیس عمل کنند ولی چنین نیست. این بدان علت است که در شرایط عادی، مولکول‌های مغناطیسی به‌طور پراکنده و نامرتب در جسم قرار دارند و در نتیجه، میدان‌های مغناطیسی مولکول‌ها یک‌دیگر را خنثیٰ می‌کنند ؛ بنابراین، فلز خاصیت مغناطیسی ندارد. در شکل ۵ ــ۵ مولکول‌های مغناطیسی یک فلز مغناطیس نشده را مشاهده می‌کنید.



شکل ۵ ــ۵ــ 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 ۶ ــ۵ مولکول‌های مغناطیسی منظم شده در یک فلز مغناطیس شده را نشان می‌دهد.



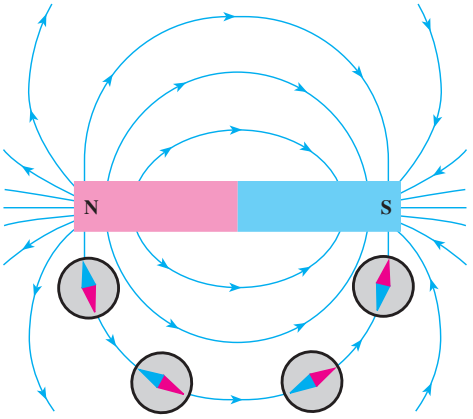
شکل ۶ ــ۵ــ فلز تقریباً مغناطیس شده

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

هرگاه چند ماده‌ی غیرمغناطیسی را به یک آهن‌ربای بسیار قوی نزدیک کنیم، برخی از آن‌ها به‌آرامی جذب و برخی دیگر به‌آرامی دفع می‌شوند. البته این جذب و دفع‌ها ممکن است آن‌قدر ضعیف و کند باشد که به چشم دیده نشود. موادی که فقط به مقدار خیلی جزئی جذب آهن‌ربا می‌شوند، به مواد پارامغناطیس موسوم‌اند ؛ مانند چوب، اکسیژن، آلومینیم و پلاتین. موادی که فقط به مقدار خیلی جزئی از آهن‌ربا دفع می‌شوند، مواد دیامغناطیس نامیده می‌شوند ؛ مانند روی، نمک، طلا و جیوه.

۵ــ۵ــ میدان مغناطیسی

با توجه به جذب و دفع قطب‌های مغناطیسی، می‌توان چنین نتیجه گرفت که نیروهای خارج شده از قطب‌های مغناطیسی باعث این اثر می‌شوند. البته این رویداد فقط در قطب‌ها اتفاق نمی‌افتد، بلکه نیروی مغناطیسی مغناطیس را در یک میدان دربرمی‌گیرند. این پدیده را طبق شکل ۷ــ۵ می‌توان هنگام حرکت قطب‌نما در اطراف یک آهن‌ربا مشاهده کرد. در هر موقعیت، در دور آهن‌ربا یک انتهای عقربه‌ی قطب‌نما در جهت قطب مخالف آهن‌ربا قرار می‌گیرد.

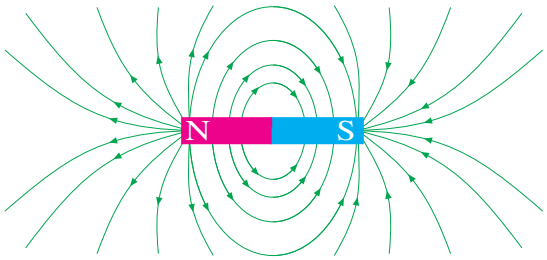


شکل ۷ــ۵ــ میدان مغناطیسی آهن‌ربا

هم‌چنین، با قرار دادن قطب‌نما در فاصله‌های دورتر از آهن‌ربا می‌توان مشاهده کرد که این میدان مغناطیسی دورتر از آهن‌ربا نیز وجود دارد. چنان‌چه قطب‌نما را به آرامی از آهن‌ربا دور کنیم، به نقطه‌ای خواهیم رسید که عقربه‌ی قطب‌نما دیگر تحت تأثیر میدان مغناطیسی آهن‌ربا نیست و دوباره به طرف قطب شمال زمین جذب می‌شود. فضایی را که در آن آهن‌ربا بر اجسام مغناطیسی دیگر اثر می‌گذارد، **میدان مغناطیسی** می‌گویند.

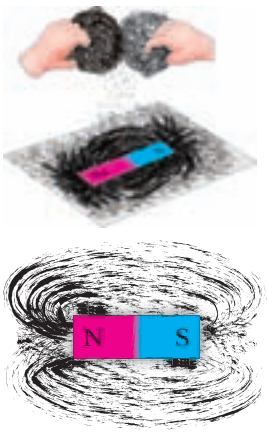
۶ــ۵ــ خطوط نیرو (فلو ــ شار)

میدان مغناطیسی یک آهن‌ربا از خطوط نیرویی تشکیل شده است که بنا به قرارداد، از قطب N بیرون می‌آیند، در فضا امتداد می‌یابند و به قطب S وارد می‌شوند. این خطوط نیرو یک‌دیگر را قطع نمی‌کنند و مرتباً از آهن‌ربا دور می‌شوند. هر چه خطوط نیرو به یک‌دیگر نزدیک‌تر و تعدادشان بیش‌تر باشد، میدان مغناطیسی قوی‌تر است. خطوط نیرو یا شار مغناطیسی را با φ (فی) نشان می‌دهند.



شکل ۸ــ۵ــ نمودار خطوط نیروی مغناطیسی

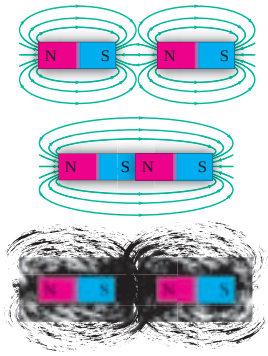
وجود خطوط نیرو با پاشیدن براده‌های آهن بر یک سطح صاف و قرار دادن آهن ربایی در زیر آن معلوم می‌شود. براده‌های آهن به طور مرتب در طول خطوط نیرو قرار می‌گیرند و جهت‌گیری میدان را نشان می‌دهند. به این خطوط نیرو **فلو** نیز می‌گویند.



شکل ۹ــ۵ــ براده‌های ریز آهن نشانگر خطوط قوای مغناطیسی

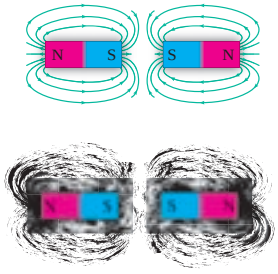
۷ــ۵ــ اثر متقابل میدان‌های مغناطیسی

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 ۱۰ــ۵ ــ 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 به‌وسیله‌ی براده‌های آهن نیز می‌توان نشان داد.

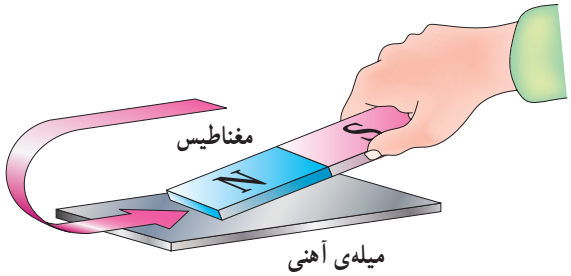


شکل ۱۱ــ۵ ــ نیروهای دافعه بین دو قطب همنام

۸ ــ۵ ــ روش‌های به‌وجودآوردن 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.

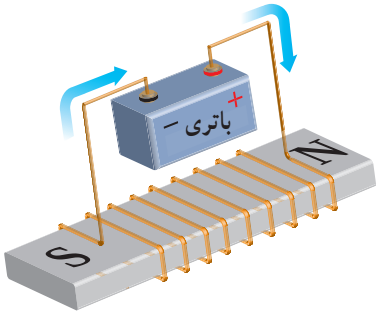
۱ــ مالش مغناطیسی: هنگامی که جسم مغناطیس شده به سطح یک آهن مغناطیس نشده (طبق شکل ۱۲ــ۵) مالش داده شود، میدان مغناطیسی، مولکول‌های آهن را مرتب می‌کند و آهن مغناطیس می‌شود.



شکل ۱۲ــ۵ ــ مغناطیس کردن فلز در اثر مالش مغناطیس

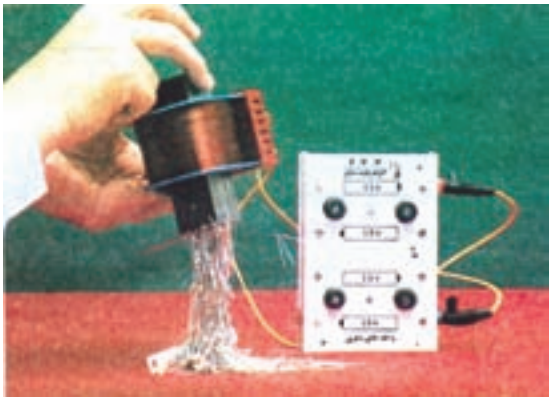
۲ــ جریان الکتریکی: اگر سیمی را به دور یک قطعه آهن مغناطیس نشده بپیچیم و دو سر آن را به یک منبع ولتاژ DC وصل کنیم، جریان الکتریکی میدان مغناطیسی تولید می‌کند و باعث منظم شدن مولکول‌های مغناطیسی آهن می‌شود. شکل ۱۳ــ۵ چگونگی تولید قطعه‌ی مغناطیسی به‌وسیله‌ی جریان الکتریکی DC[1] را نمایش می‌دهد.

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 به‌کار برده می‌شود.



الف)

۱ــ DC: Direct Current



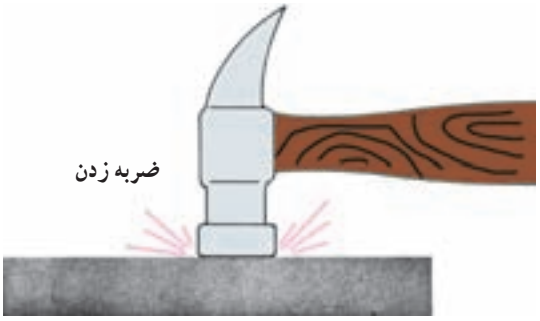
ب)

شکل ۱۳ ــ۵ــ کاربرد جریان DC برای تولید مغناطیس

۹ ــ۵ــ روش‌های از بین بردن خاصیت مغناطیسی آهن‌ربا

برای از بین بردن خاصیت مغناطیسی یک آهن‌ربا باید مولکول‌های مغناطیسی آن را دوباره به صورت نامرتب درآوریم تا میدان‌هایشان در خلاف جهت یک‌دیگر قرار گیرد. این عمل به سه روش انجام می‌گیرد : ۱ــ ضربه‌ی سخت، ۲ــ گرما، ۳ــ جریان الکتریکی متناوب.

۱ــ ضربه‌ی سخت: اگر به یک آهن‌ربا ضربه‌ی سختی وارد کنیم، نیروی وارد شده مولکول‌ها را به شدت تکان می‌دهد و باعث به هم خوردن نظم و ترتیب آن‌ها می‌شود. گاهی اوقات لازم است ضربه را چند بار وارد کنیم.

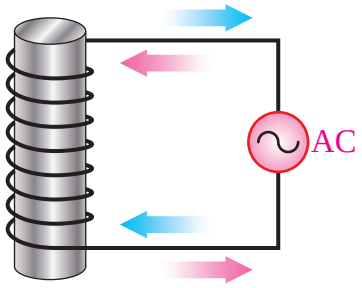


شکل ۱۴ــ۵ــ خنثی کردن اثر مغناطیسی آهن‌ربا با زدن ضربه

۲ــ گرما: اگر آهن‌ربا را گرم کنیم، انرژی حرارتی باعث نوسان مولکول‌های مغناطیسی می‌شود و ترتیبشان را به هم می‌زند.

شکل ۱۵ــ۵ــ خنثی کردن اثر مغناطیسی یک آهن‌ربا به‌وسیله‌ی گرما

۳ــ جریان الکتریکی متناوب (AC): اگر مغناطیس را در میدانی مغناطیسی قرار دهیم که جهت آن به سرعت تغییر می‌کند، نظم مولکول‌ها به هم می‌خورد ؛ زیرا مولکول‌ها می‌خواهند از میدان پیروی کنند. میدان مغناطیسی متغیر را می‌توان به‌وسیله‌ی یک جریان متناوب تولید کرد. این مطلب را در آینده توضیح خواهیم داد.

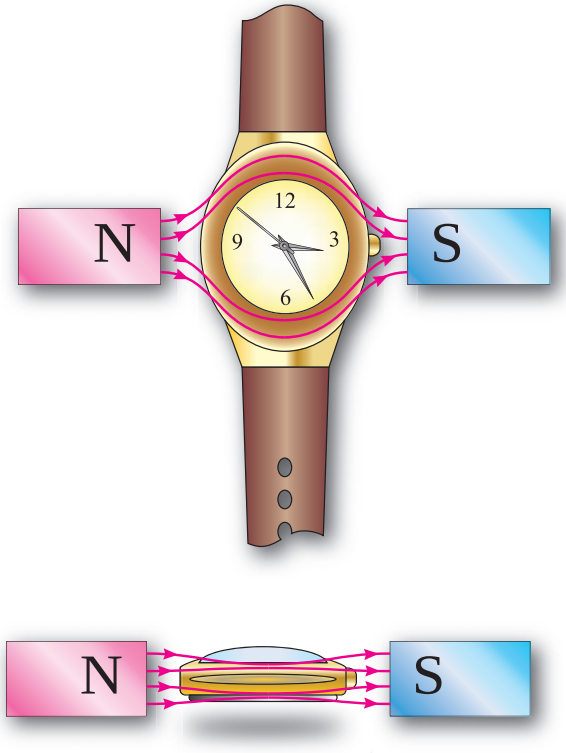


شکل ۱۶ــ۵ــ خنثی کردن اثر مغناطیسی توسط جریان متناوب (AC)

۱۰ــ۵ــ پوشش مغناطیسی

خطوط نیروی مغناطیسی می‌توانند از اجسام ــ حتی آن‌هایی که خواص مغناطیسی نیز ندارند ــ بگذرند. البته بعضی از اجسام در مقابل عبور خطوط نیرو (فلو) مقاومت می‌کنند. به این خاصیت (مقاومت در برابر عبور خطوط نیرو) **رلوکتانس** می‌گویند. اجسام مغناطیسی در مقابل عبور خطوط نیرو رلوکتانس خیلی کمی دارند. درنتیجه، خطوط فلو به وسیله‌ی یک جسم مغناطیسی حتی با طی کردن مسیری طولانی جذب می‌شوند. این خاصیت باعث می‌شود که بتوانیم اجسام را به‌وسیله‌ی پوششی از ماده‌ی مغناطیسی در مقابل خطوط فلو محافظت کنیم. از این

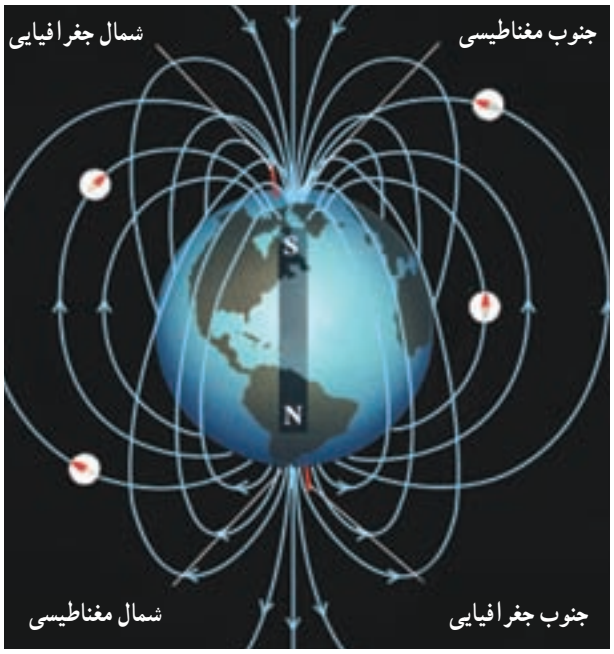
روش برای ساختن ساعت‌های ضدمغناطیس استفاده می‌کنند.



شکل ۱۷ــ۵ ــ پوشش مغناطیسی

۱۱ــ۵ ــ 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 ۱۸ــ۵ــ میدان مغناطیسی زمین

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 ۱۹ــ۵ ــ دستگاه تصویربرداری MRI

۱۲ــ۵ــ میدان مغناطیسی ناشی از سیم حامل جریان

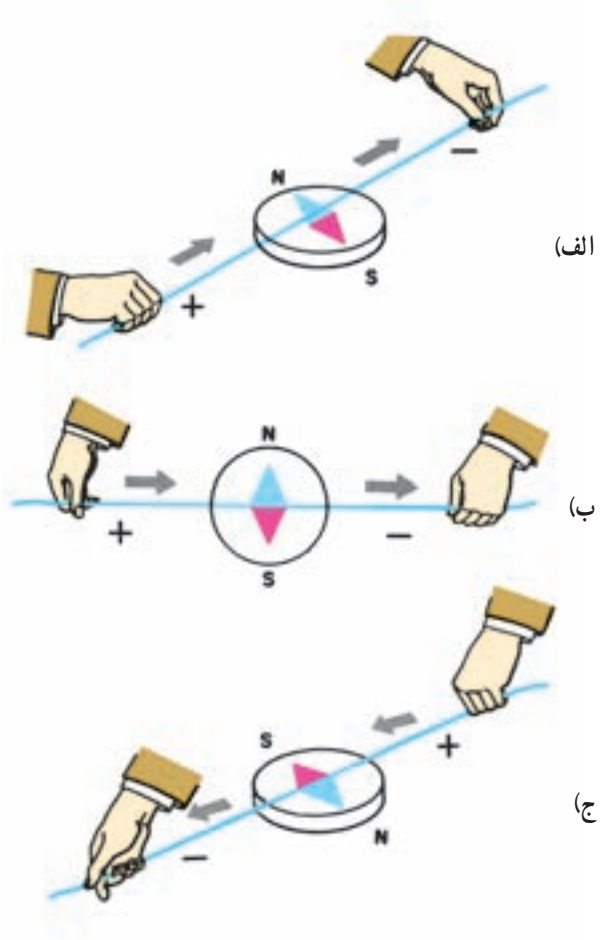
چون الکترون‌ها به علت حرکت وضعی در اطراف خود میدان مغناطیسی تولید می‌کنند، چنین به نظر می‌آید که انباشتن الکترون‌های اضافی در جسم می‌تواند میدان مغناطیسی تولید کند ولی الکترون‌ها با چرخش‌های وضعی مخالف هم آثار مغناطیسی یک‌دیگر را خنثیٰ می‌کنند. در نتیجه، الکتریسیته‌ی ساکن دارای میدان مغناطیسی نیست ولی 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 یک دیگر را خنثیٰ 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 به‌دور یک الکترون حلقه‌ای را به‌وجود 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.

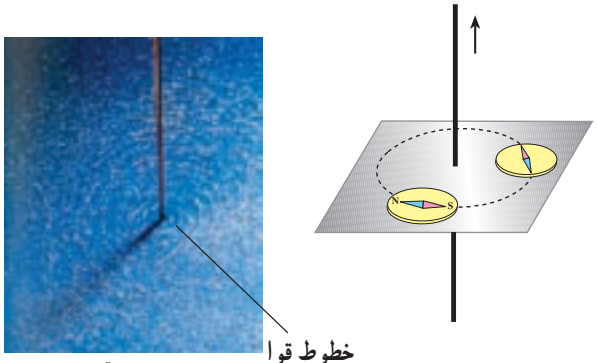
طبق شکل ۲۰ــ۵ چنان‌چه موقعیت سیم را تغییر دهیم، عقربه‌ی قطب‌نما با جهت خطوط نیرو منطبق می‌شود. عقربه‌ی قطب‌نما همیشه عمود بر سیم حامل جریان قرار می‌گیرد. وقتی جهت جریان را تغییر دهیم، عقربه‌ی قطب‌نما تغییر جهت می‌دهد.

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 ۲۱ــ۵ 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.

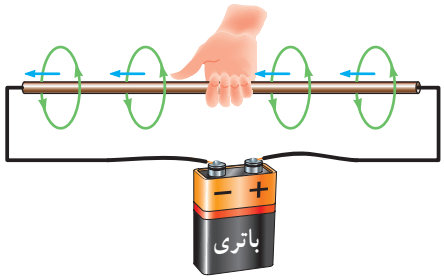


شکل ۲۰ــ۵ ــ میدان مغناطیسی ناشی از سیم حامل جریان



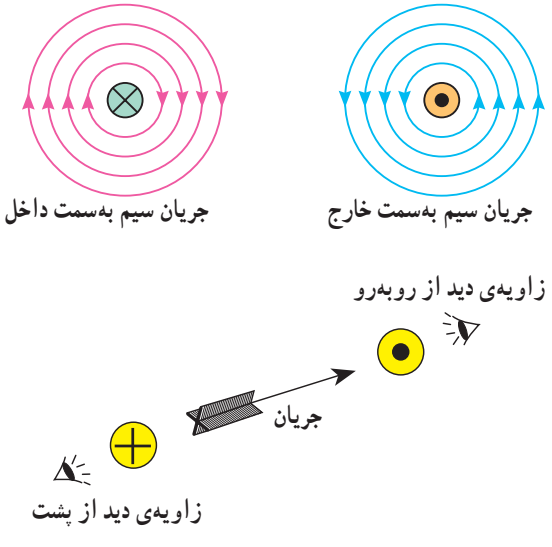
شکل ۲۱ــ۵ ــ تعیین جهت میدان مغناطیسی اطراف سیم با استفاده از قطب‌نما

برای تعیین جهت میدان مغناطیسی می‌توان از قانون دست راست نیز استفاده کرد. چنان‌چه طبق شکل ۲۲ــ۵ 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 ۲۲ــ۵ــ تعیین جهت میدان مغناطیسی با استفاده از قانون دست راست

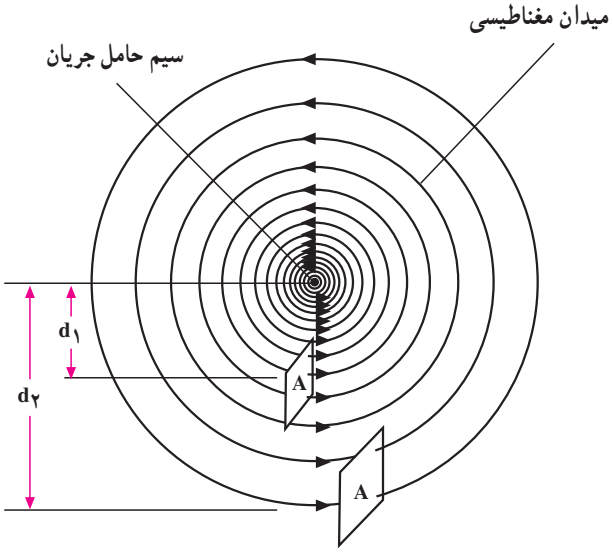
طبق شکل ۲۳ــ ۵ از این پس برای تعیین جهت میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان، مقطع سیم را ــ که دایره است ــ نشان می‌دهیم. در صورتی که جهت جریان در مقطع سیم از طرف ناظر به طرف صفحه‌ی کاغذ باشد، با علامت (×) و اگر از طرف مقطع سیم به طرف ناظر باشد، با علامت (.) نمایش داده می‌شود. طبق قانون دست راست در مورد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



شکل ۲۳ــ۵ــ جهت میدان مغناطیسی

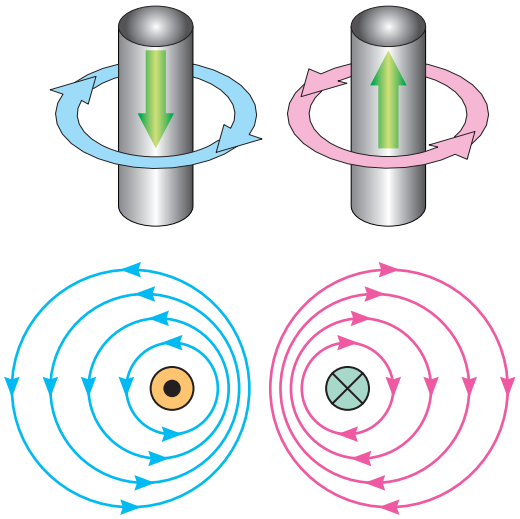
چگالی (تراکم) خطوط نیرو: هر چه جریانی که از سیم می‌گذرد بیش‌تر شود، میدان مغناطیسی حاصل قوی‌تر خواهد بود. همان طور که در میدان مغناطیسی آهن‌ربا دیدید، خطوط نیرو در نزدیکی آهن‌ربا به هم نزدیک‌ترند. این خطوط نیرو در نزدیکی سیم نیز به هم نزدیک‌ترند و هر چه بیش‌تر از سیم دور شوند، از یک‌دیگر فاصله می‌گیرند. 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 ۲۴ــ۵ تعداد خطوط نیرو در واحد سطح با فاصله‌ی آن تا مرکز سیم، نسبت عکس و با شدت جریان عبوری، نسبت مستقیم دارد.



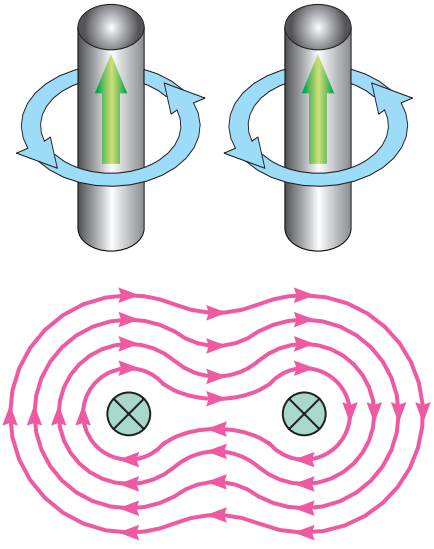
شکل ۲۴ــ۵ ــ تراکم خطوط نیرو اطراف سیم حامل جریان

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.



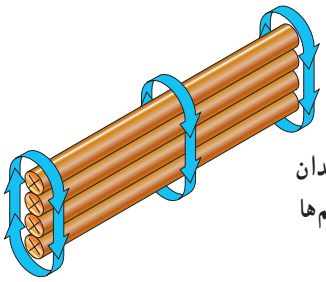
شکل ۲۵ــ۵ ــ نیروی دافعه بین دو سیم جریان‌دار غیر هم جهت

هنگامی که دو سیم را که جریان‌های هم‌جهت 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 ۲۶ــ۵ــ نیروی جاذبه بین دو سیم جریان‌دار هم‌جهت

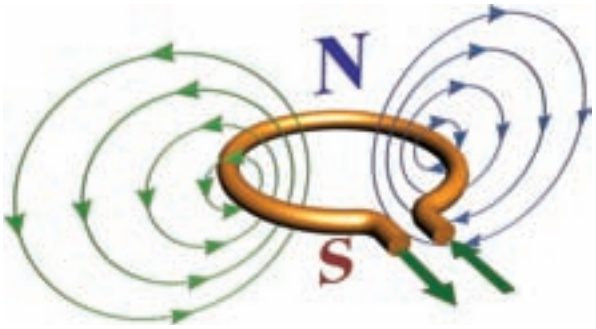
چنان‌چه سه یا چهار سیم را طوری کنار هم قرار دهیم که جهت جریان در همه‌ی آن‌ها یکسان باشد، میدان مغناطیسی قوی‌تر خواهد شد.



شکل ۲۷ــ۵ ــ قوی‌تر کردن میدان مغناطیسی از طریق افزایش سیم‌ها

اثر الکترومغناطیسی در یک حلقه: اگر سیمی را به‌صورت 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 به‌وجود می‌آورند.

در نتیجه‌ی این عمل قطب‌های مغناطیسی به‌وجود می‌آیند. به‌طوری‌که 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.

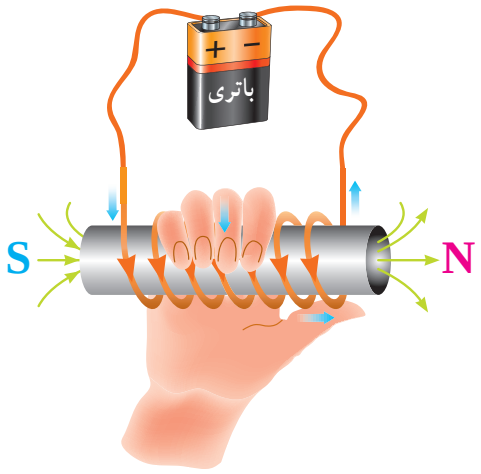


شکل ۲۸ــ۵ــ میدان مغناطیسی حاصل در یک حلقه

چگالی میدان مغناطیسی در مرکز حلقه بیش‌تر است. هم‌چنین 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.

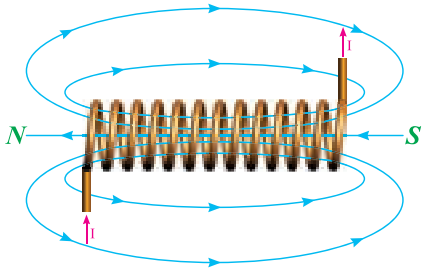
برای تعیین قطب‌های یک بوبین از قانون دست راست استفاده می‌شود. طبق شکل ۲۹ــ۵ چنان‌چه انگشت‌هایتان را در جهت جریان و حلقه‌های بوبین به دور بوبین حلقه کنید انگشت شست در جهت قطب N قرار می‌گیرد.



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

چگالی خطوط نیرو درمرکز بوبین به عوامل زیر بستگی دارد :

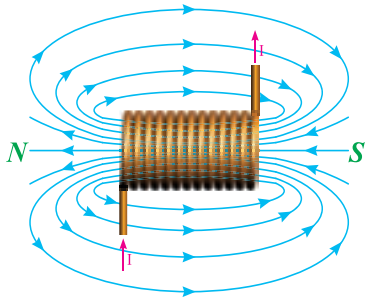
۱ــ هر چه تعداد حلقه‌های بوبین بیش‌تر باشد، میدان مغناطیسی حلقه‌ها با هم جمع می‌شوند و میدان مغناطیسی قوی‌تری خواهیم داشت. بنابراین، تراکم خطوط نیرو با تعداد حلقه‌های بوبین (N) نسبت مستقیم دارد.



شکل ۳۰ــ۵ ــ اثر تعداد حلقه‌ها بر چگالی میدان

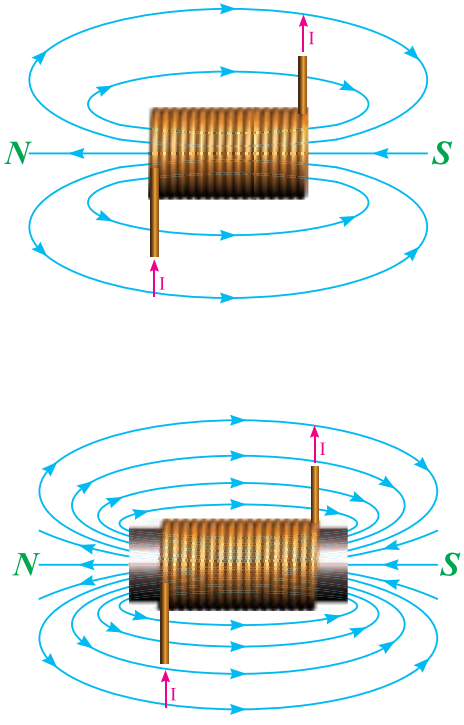
۲ــ هر چه شدت جریان عبوری از بوبین نیز بیش‌تر باشد، میدان مغناطیسی قوی‌تر می‌شود ؛ بنابراین، چگالی میدان مغناطیسی (تراکم خطوط نیرو) با شدت جریان (I) نسبت مستقیم دارد.

۳ــ اگر حلقه‌های بوبین به صورت خیلی فشرده کنار هم 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 ۳۱ــ۵ ــ اثر فشردگی سیم‌ها بر چگالی میدان

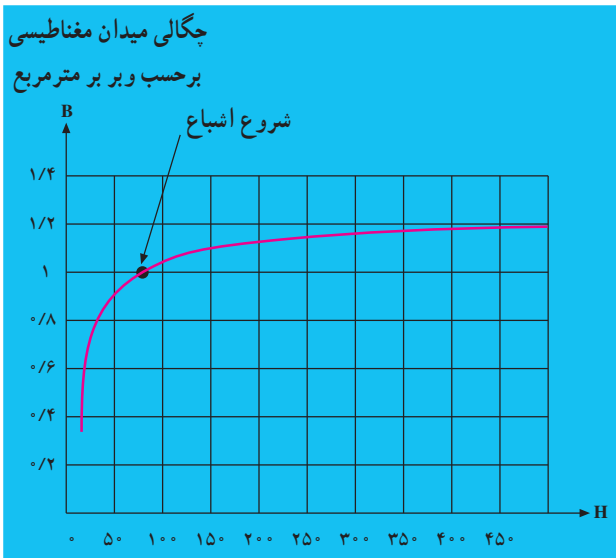
۴ــ چنان‌چه هسته‌ی آهنی را در داخل بوبین قرار دهیم، میدان مغناطیسی بوبین قوی‌تر می‌شود. آهن نرم جسم مغناطیسی است که رلوکتانس کمی دارد و باعث می‌شود که خطوط نیرو بیش‌تر در مقایسه با هوا در آن متمرکز شود. هر چه خطوط نیرو در هسته بیش‌تر متمرکز شوند، میدان مغناطیسی قوی‌تر است.



شکل ۳۲ــ۵ ــ اثر هسته‌ی آهنی بر چگالی میدان

برای هنرجویان علاقه‌مند

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 ۳۳ــ ۵ منحنی مشخصه‌ی یک ماده‌ی فرومغناطیسی را مشاهده می‌کنید.



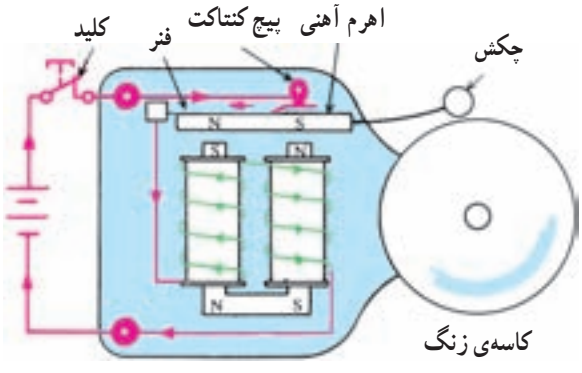
شکل ۳۳ــ۵ ــ منحنی مشخصه‌ی یک ماده‌ی فرومغناطیسی

۱۳ــ۵ ــ 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 این‌جا به شرح چند وسیله‌ی الکتریکی که با خاصیت مغناطیسی کار می‌کنند، می‌پردازیم.

۱ــ زنگ الکترو مغناطیسی 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 این‌که 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 می‌شوند.

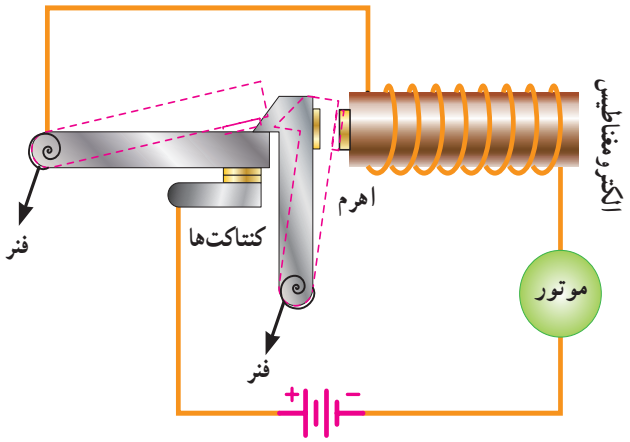
هنگامی که اهرم به طرف پایین نوسان می‌کند، فنر از اتصال پیچی جدا می‌شود. این عمل مدار را باز می‌کند. در نتیجه، جریان از حرکت باز می‌ایستد، الکترومغناطیس‌ها انرژی خود را از دست می‌دهند و دیگر اهرم را جذب نمی‌کنند. فنر اهرم را دوباره به محل قبلی‌اش برمی‌گرداند و به همین دلیل، اتصال فنری و پیچ دوباره باعث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



شکل ۳۴ــ۵ ــ زنگ الکترومغناطیسی DC

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.

۲ــ کلید مغناطیسی قطع مدار: کلید قطع مدار برای این منظور در مدارها به‌کار 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 ۳۵ــ۵ 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 آن‌قدر قوی نیست که بتواند اهرم را جذب کند ولی اگر جریان خیلی زیادی عبور کند ــ مثلاً هنگامی که موتور ترمز می‌کند یا اتصال کوتاه می‌شود ــ میدان الکترومغناطیسی خیلی قوی می‌شود و اهرم را به طرف خود می‌کشد. این عمل به فنر امکان می‌دهد که بازوی اتصال را قطع و کنتاکت‌ها را باز کند. درنتیجه، مدار قطع می‌شود، الکترومغناطیس انرژی‌اش را از دست می‌دهد و اهرم به حالت اول برمی‌گردد. در این حالت، بازوی اتصال توسط فنر خارج نگاه‌داشته شده است. هنگامی که مشکل برطرف شود، بازوی اتصال مدار را می‌توان به حالت اول درآورد و از آن مجدداً استفاده کرد.



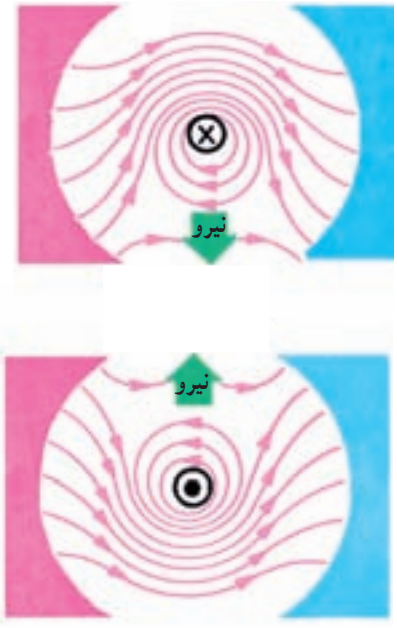
شکل ۳۵ــ۵ ــ کلید مغناطیسی قطع مدار

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

تحقیق کنید

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

۳ــ 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 تغییرجهت پیدا کنند، جهت نیروی دافعه نیز تغییر خواهد کرد امّا اگر جهت هر دو کمیت با هم عوض شود، جهت نیرو تغییر نخواهد کرد.

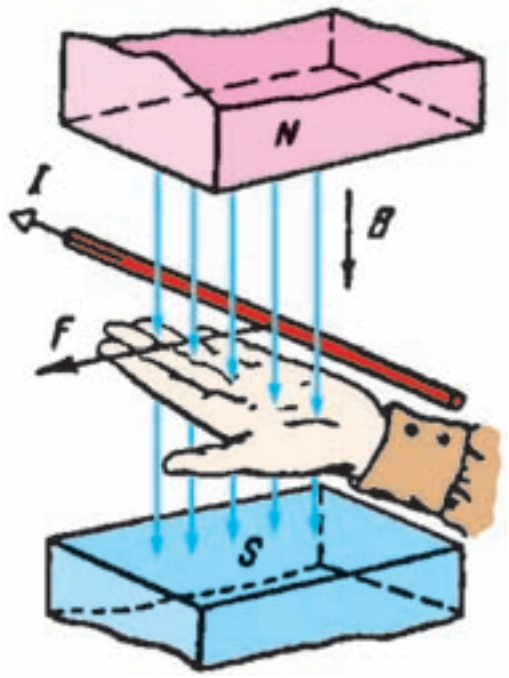


شکل ۳۶ــ۵ ــ اثرمیدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان

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

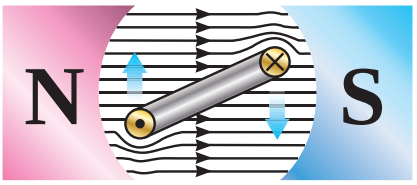
قانون دست چپ

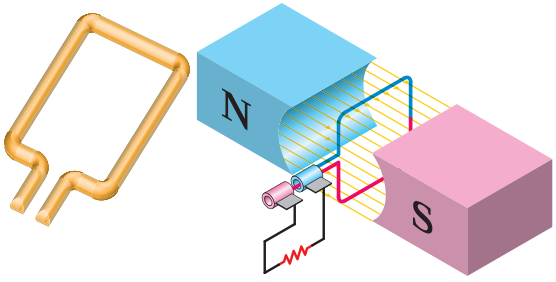
اگر دست چپ را طوری باز کنیم که خطوط نیرو به کف دست بریزند (B) و جهت جریان در سیم حامل جریان (I) در جهت سایر انگشتان باشد، جهت نیروی وارد شده (F) در جهت انگشت شست خواهد بود.



شکل ۳۷ــ۵ ــ قانون دست چپ

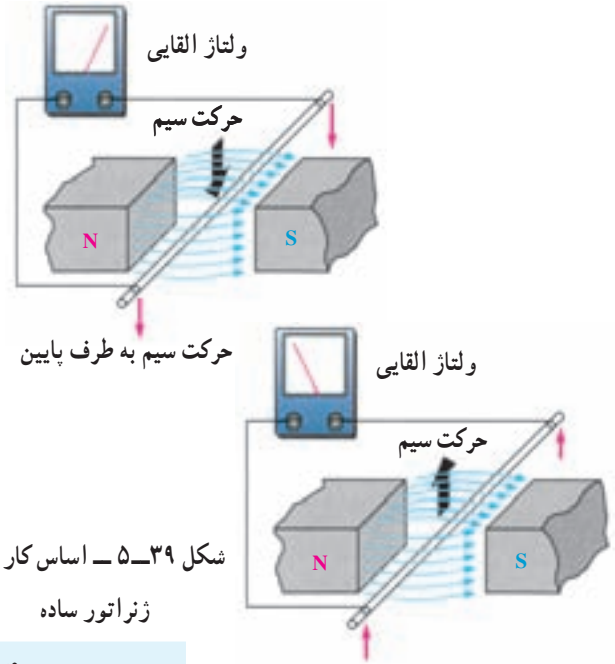
اگر طبق شکل ۳۸ــ۵ سیم را به صورت کلاف درآوریم و آن را درون میدان مغناطیسی قرار دهیم، وقتی از کلاف جریان عبور کند اثر متقابل میدان‌های مغناطیسی باعث می‌شود که یک سمت آن به طرف بالا و سمت دیگر به طرف پایین حرکت کند ؛ به عبارت دیگر، به کلاف جفت نیرو وارد می‌شود و تولید گشتاور می‌کند. این فرآیند، اساس کار موتورهای الکتریکی است که در درس ماشین‌های الکتریکی به‌طور مفصل درباره‌ی آن توضیح خواهیم داد.





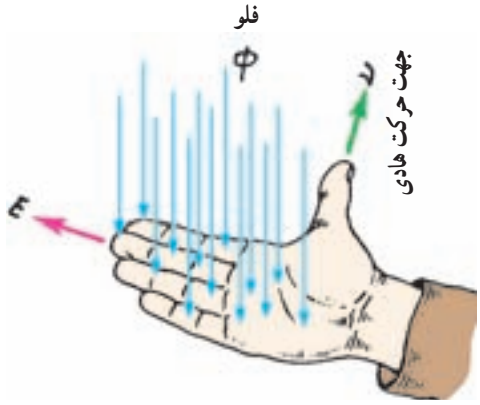
شکل ۳۸ــ۵ ــ تولید گشتاور در موتور الکتریکی

۴ــ ژنراتور ساده: طبق شکل ۳۹ــ۵ 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 میلی ولت‌متر 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 ۳۹ــ۵ ــ اساس کار یک ژنراتور ساده

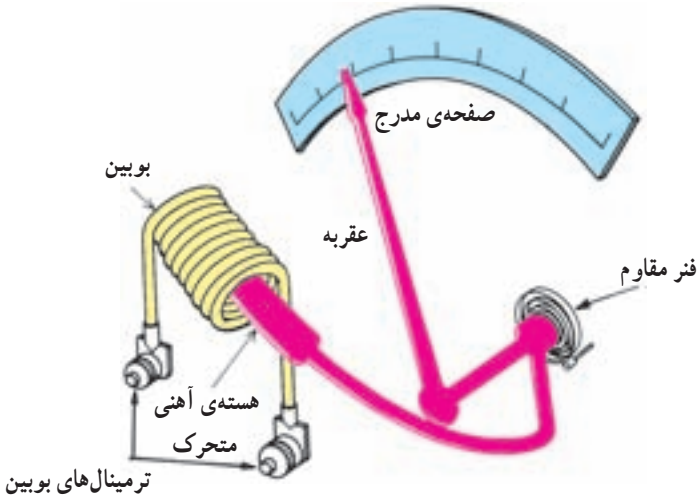
برای به‌دست آوردن جهت نیروی محرکه‌ی القایی از قانون دست راست استفاده می‌شود. طبق شکل ۴۰ــ۵ اگر کف دست راست را طوری باز کنیم که خطوط نیرو به کف دست بریزند، درصورتی‌که جهت حرکت سیم در جهت انگشت شست باشد، جهت نیروی محرکه‌ی القایی در جهت سایر انگشتان خواهد بود.



شکل ۴۰ــ۵ ــ قانون دست راست

۵ ــ دستگاه اندازه‌گیری الکتریکی: در دستگاه‌های اندازه‌گیری بسیار ساده برای اندازه‌گیری جریان عبوری از یک سیم‌پیچ (بوبین) و یک هسته‌ی متحرک استفاده می‌کنند. هرگاه جریانی از بوبین بگذرد، میدان مغناطیسی‌ای ایجاد می‌کند که هسته را به‌طرف 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 به‌وسیله‌ی 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.



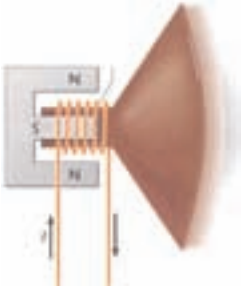
شکل ۴۱ــ۵ ــ دستگاه اندازه‌گیری الکتریکی

۶ــ آهن‌ربای صنعتی: از کاربردهای دیگر مغناطیس می‌توان آهن‌ربای صنعتی را نام برد. شکل ۴۲ــ۵ یک نمونه آهن‌ربای صنعتی را نشان می‌دهد.

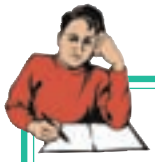
شکل ۴۲ــ۵

تحقیق کنید

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



شکل ۴۳ــ۵



پرسش

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

فصل ششم

مدار الکتریکی و اجزای آن

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ یک مدار کامل الکتریکی را رسم کند.

۲ــ اجزای اصلی مدار الکتریکی را نام ببرد و وظیفه‌ی هر یک را توضیح دهد.

۳ــ منابع جریان مستقیم و متناوب را توضیح دهد.

۱ــ۶ــ 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.

۲ــ۶ــ اجزای مدار الکتریکی

اجزای اصلی هر مدار الکتریکی به طور کلی عبارت‌اند از :

الف ــ 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) به‌وجود 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 ۱ــ۶ انواع منابع ولتاژ DC را مشاهده می‌کنید.

دینام دوچرخه

چراغ قوه ۳ ولت

باتری خودرو

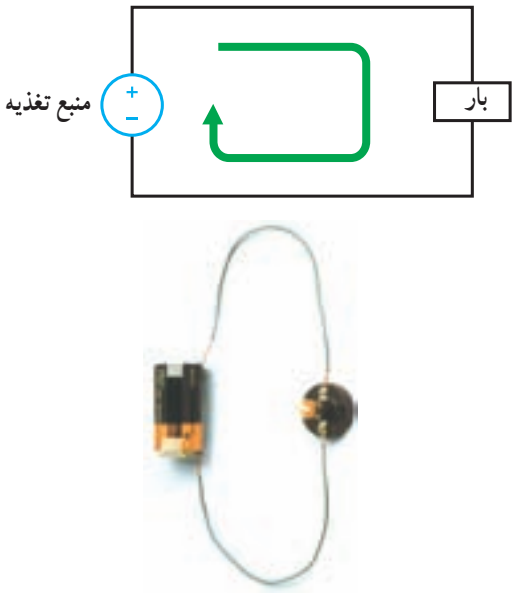
شکل ۱ــ۶ــ انواع منابع ولتاژ DC

I ــ منابع و مدار جریان مستقیم (DC[1])

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 تغذیه‌ی الکترونیکی و باتری. صرف نظر از ساختمان داخلی مولدهای جریان مستقیم، عمل مدارهای جریان مستقیم یکسان است. شکل ۲ــ۶ منبع DC و مدار جریان مستقیم را به همراه بار نمایش می‌دهد.



شکل ۲ــ۶ ــ مدار جریان مستقیم

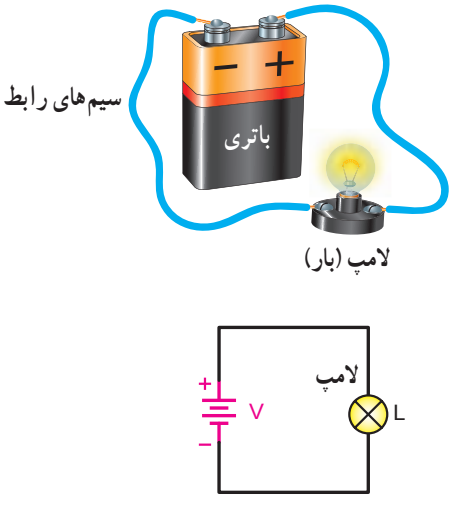
II ــ منابع و مدار جریان متناوب (AC[2])

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 AC نمایش می‌دهند. ولتاژی که در منازل برای تغذیه‌ی وسایل خانگی و روشنایی از آن استفاده می‌شود، ولتاژ متناوب است.

شکل ۳ــ۶ منبع AC و مدار AC را نشان می‌دهد.

شکل ۳ــ۶ــ مدار جریان متناوب

ب ــ سیم‌های رابط: برای این‌که 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 موردنظر و از آن‌جا به قطب منفی منبع ولتاژ، عملی می‌شود. شکل ۴ــ۶ یک مدار کامل و بسته را نشان می‌دهد.



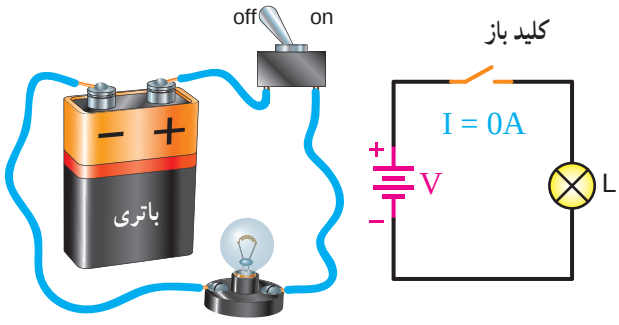
شکل ۴ــ۶ ــ مدار بسته

در صورتی که مدار در نقطه‌ای قطع شود، جریان الکتریکی برقرار نمی‌گردد. چنین مداری را در اصطلاح مدار باز می‌گویند. شکل ۵ــ۶ مدار باز را نشان می‌دهد.

---

۱ ــ DC=Direct Current

۲ ــ AC=Alternative Current

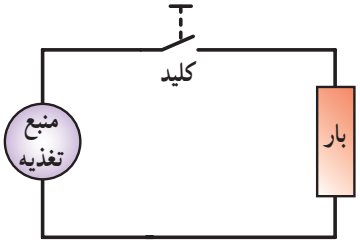


شکل ۵ــ۶ ــ مدار باز

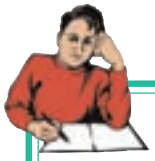
ج ــ مصرف‌کننده الکتریکی : در یک مدار ساده، مصرف‌کننده وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را به انرژی‌های دیگر تبدیل می‌کند. مصرف کننده‌ی (بار) الکتریکی ممکن است انرژی الکتریکی را به انرژی‌های نورانی، گرمایی یا صوتی تبدیل کند یا فقط برای مهار مقدار انرژی حاصل از مولد به کار رود.

۳ــ۶ ــ کلید

در صورتی که قصد قطع و وصل مدار (کنترل مصرف‌کننده) الکتریکی را داشته باشیم، لازم است تا مسیر عبور جریان الکتریکی را قطع یا وصل کنیم که معمولاً این‌کار توسط کلید انجام می‌گیرد. کلید از اجزای اصلی مدار به حساب نمی‌آید (شکل ۶ــ۶).



شکل ۶ــ۶ ــ مدار شامل کلید



پرسش

۱ــ سه جزءِ اصلی یک مدار الکتریکی را نام ببرید.

۲ــ منظور از مدار باز و بسته چیست؟

۳ــ آیا می‌توان در یک مدار شامل باتری، اتصالات و مصرف‌کننده، باتری را بار الکتریکی دانست؟ توضیح دهید.

۴ــ بین باتری، ژنراتور جریان مستقیم و یک منبع تغذیه‌ی الکترونیکی چه وجه مشترکی وجود دارد؟

۵ــ منظور از بار الکتریکی در یک مدار چیست؟

فصل هفتم

هدایت و مقاومت الکتریکی

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ مفهوم مقاومت الکتریکی را با مقاومت ذرات گاز در حین حرکت در لوله مقایسه کند.

۲ــ واحد مقاومت الکتریکی را براساس مشخصات فیزیکی آن تعریف کند.

۳ــ مفهوم مقاومت مخصوص و هدایت مخصوص هادی را تعریف کند.

۴ــ رابطه‌ی پیدا کردن مقاومت الکتریکی هادی‌ها را بر حسب مشخصات فیزیکی $R=\rho\frac{l}{A}$ بنویسد.

۵ــ واحدهای مربوط به هر یک از پارامترهای موجود در فرمول $R=\rho\frac{l}{A}$ را بیان کند.

۶ــ با استفاده از فرمول $R=\rho\frac{l}{A}$ مقاومت فلزاتی را که مشخصات آن‌ها داده می‌شود، حساب کند.

۷ــ مقاومت چند عنصر رایج، در صنعت برق را محاسبه کند.

۸ــ چگونگی تأثیر تغییرات دما بر مقاومت را توضیح دهد.

۹ــ ضریب حرارتی را تعریف کند.

۱۰ــ رابطه‌ی تأثیر حرارت بر مقاومت الکتریکی $R_t=R_\circ(1+\alpha t)$ را به کار ببرد.

۱۱ــ با استفاده از فرمول $R_t=R_\circ(1+\alpha t)$ مقاومت چند هادی رایج را برحسب تغییرات دما محاسبه کند.

۱۲ــ ابررسانا را شرح دهد و کاربرد آن را بیان کند.

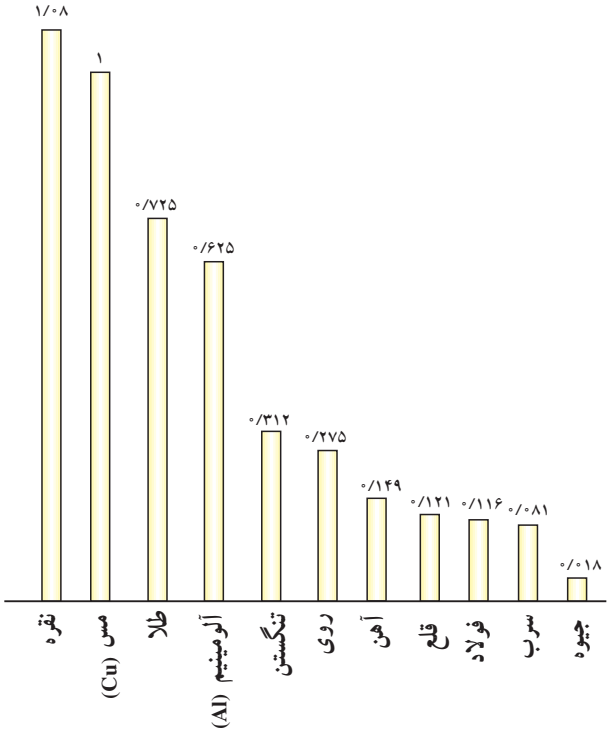
۱ــ۷ــ هدایت الکتریکی مخصوص

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 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

شدت جریان عبوری از یک فلز به ولتاژ منبع را هدایت الکتریکی مخصوص آن فلز می‌گویند. به عبارتی دیگر و براساس مشخصات فیزیکی یک سیم می‌توان گفت قابلیت هدایت سیمی به طول یک متر و سطح مقطع یک میلی‌مترمربع را **هدایت الکتریکی مخصوص** می‌نامند و آن را با حرف یونانی κ (کاپا) نمایش می‌دهند.

۲ــ۷ــ مقایسه‌ی هدایت مخصوص فلزات

فلز نقره الکترون‌های آزاد زیادی دارد ؛ بنابراین، در مقایسه با سایر فلزات از هدایت مخصوص بیش‌تری برخوردار است. مس بعد از نقره هادی خوبی است، نسبت به آن ارزان‌تر است و کاربرد بیش‌تری دارد. بدین جهت، هدایت مخصوص سایر فلزات را نسبت به فلز مس می‌سنجند. در نمودار ۱ــ۷ هدایت مخصوص نسبی سایر فلزات را در مقایسه با فلز مس مشاهده می‌کنید.



نمودار ۱ــ۷ــ هدایت مخصوص فلزات مختلف نسبت به مس

مثال ۱: اگر هدایت مخصوص مس $۵۶\ \frac{m}{\Omega.mm^۲}$ باشد، هدایت مخصوص آلومینیم چه‌قدر است؟

$$\frac{\kappa Al}{\kappa Cu}=\frac{۰/۶۲۵}{۱}\Rightarrow\frac{\kappa Al}{۵۶}=\frac{۰/۶۲۵}{۱}$$

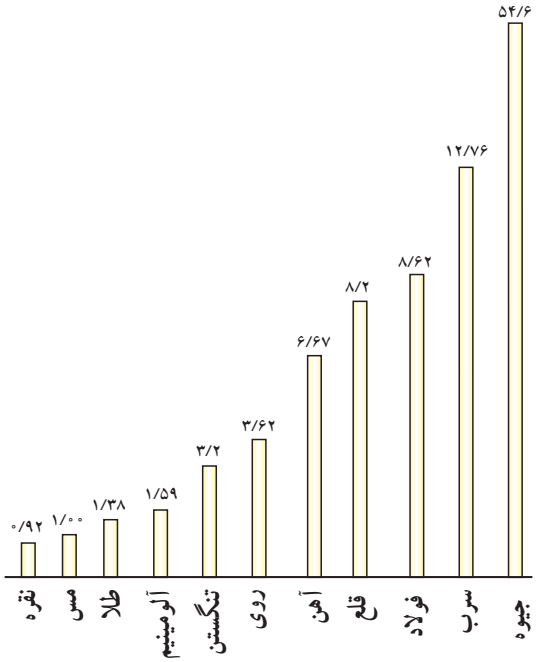
$$\Rightarrow \kappa Al = ۵۶\times ۰/۶۲۵ \quad \boxed{\kappa Al = ۳۵}$$

۳ــ۷ــ مقاومت الکتریکی مخصوص

هدایت مخصوص نشانگر سهولت عبور جریان الکتریکی از یک جسم است. هرچه هدایت مخصوص بیش‌تر باشد، جسم جریان الکتریکی بیش‌تری را عبور می‌دهد. با همین استدلال، هدایت مخصوص کوچک‌تر نمایانگر آن است که جریان الکتریکی به سختی از جسم عبور می‌کند. به عبارت دیگر، اجسام با هدایت مخصوص کم در مقابل عبور جریان، مقاومت یا مخالفت زیادتری می‌کنند. هر جسمی که هدایت مخصوص آن زیاد باشد، مقاومت مخصوص‌اش کم است و برعکس، جسمی که مقاومت مخصوص‌اش زیاد باشد، دارای هدایت مخصوص کمی است. مقاومت مخصوص را با حرف یونانی ρ (رو) نمایش می‌دهند و رابطه‌ی آن با هدایت مخصوص چنین است : $\rho=\frac{۱}{\kappa}$. بنا به تعریف، مقاومت سیمی به طول یک متر و سطح مقطع یک میلی‌متر مربع را **مقاومت الکتریکی مخصوص** می‌نامند.

۴ــ۷ــ مقایسه‌ی مقاومت مخصوص فلزات

دیدیم که هدایت مخصوص فلزات مختلف طبق نمودار ۱ــ۷ نسبت به مس سنجیده می‌شود. همین کار را در مورد مقاومت مخصوص نیز می‌توان انجام داد. نمودار ۲ــ۷ مقاومت مخصوص نسبی سایر فلزات را نسبت به فلز مس نمایش می‌دهد.

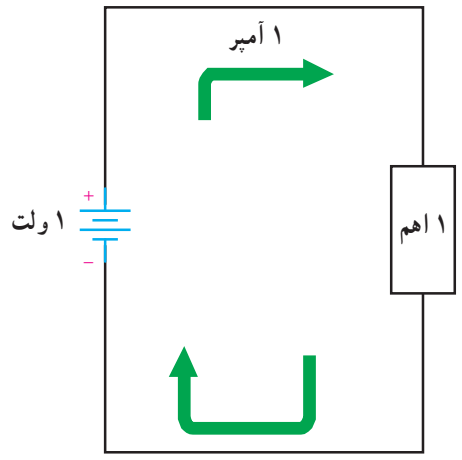


نمودار ۲ــ۷ــ مقاومت مخصوص فلزات مختلف نسبت به مس

۵ــ۷ــ واحد مقاومت

در حدود سال‌های ۱۸۰۰ یک دانشمند آلمانی به نام گئورگ سیمون اُهم 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 **اُهم** نامیده شده است.

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



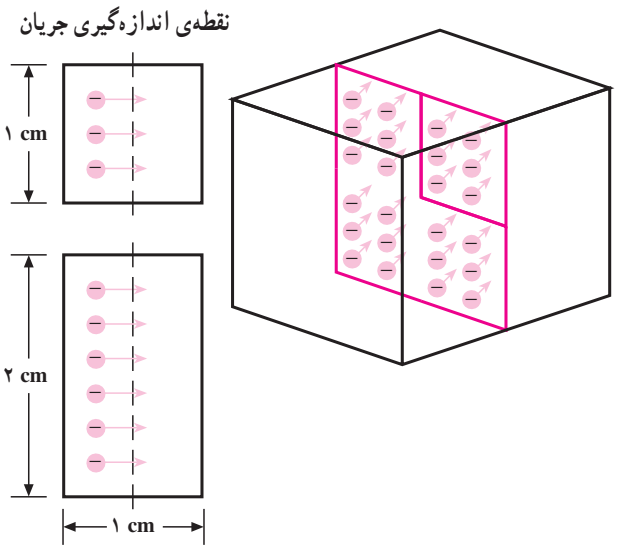
شکل ۱ــ۷ــ تعریف اهم

۶ــ۷ــ 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.

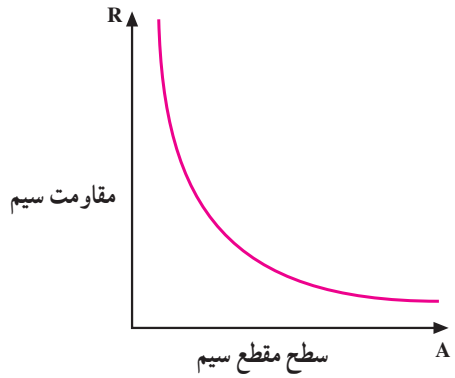
تأثیر سطح مقطع هادی بر مقاومت الکتریکی: مقدار جریان الکتریکی به تعداد الکترون‌های آزاد موجود در سیم بستگی دارد؛ بنابراین، با ضخیم کردن سیم می‌توانیم تعداد الکترون‌های آزاد را بیش‌تر کنیم تا مقدار بیش‌تری جریان الکتریکی بتواند از آن عبور کند.

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 الکترون 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 ۲ــ۷).



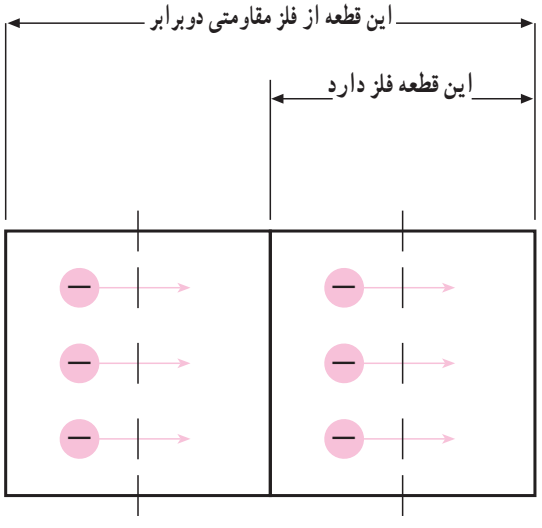
شکل ۲ــ۷ــ تأثیر سطح مقطع در مقاومت

شکل ۳ــ۷ تغییرات مقاومت نسبت به سطح مقطع هادی را نمایش می‌دهد. طبق این نمودار هرقدر سطح مقطع افزایش پیدا می‌کند، مقاومت الکتریکی کم‌تر می‌شود.



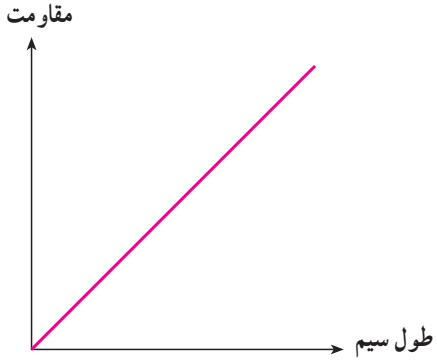
شکل ۳ــ۷ــ نمودار تغییرات مقاومت برحسب سطح مقطع هادی

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 طویل‌تر باشد، مقاومت آن نیز بیش‌تر است.



شکل ۴ــ۷ــ تأثیر طول هادی در مقاومت

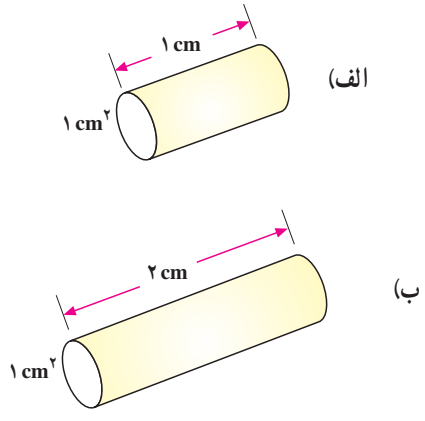
شکل ۵ــ۷ تغییرات مقاومت برحسب طول هادی را نشان می‌دهد. طبق این نمودار هر قدر طول هادی زیاد شود، مقاومت افزایش می‌یابد.



شکل ۵ــ۷ــ 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.

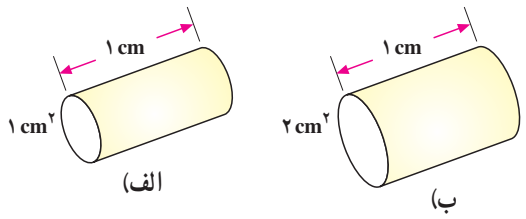
اگر طول سیم را مثلاً دو برابر کنیم، مقاومت آن را دو برابر کرده‌ایم. پس مقاومت یک سیم با طول آن نسبت مستقیم دارد (شکل ۶ــ۷).



شکل ۶ــ۷ــ اثر افزایش طول بر مقاومت سیم

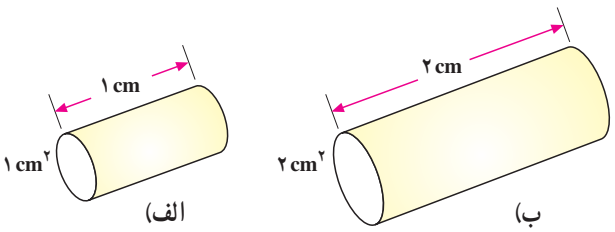
هم‌چنین می‌توان با اضافه کردن سطح مقطع (A) مقاومت را کم کرد و با کم‌کردن سطح مقطع بر مقاومت افزود.

اگر سطح مقطع سیم را دوبرابر کنیم، مقاومت آن نصف می‌شود. در نتیجه، می‌گوییم مقاومت با سطح مقطع نسبت عکس دارد (شکل ۷ــ۷).



شکل ۷ــ۷ــ 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 ۸ــ۷).



شکل ۸ــ۷ــ 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، رابطه‌ی کلی مقاومت با سطح مقطع، طول و جنس سیم را با فرمول‌های زیر نشان می‌دهند.

$$R = \frac{L}{\kappa . A} \quad \text{یا} \quad R = \rho \frac{L}{A}$$

در این رابطه:

R مقاومت سیم بر حسب Ω،

L طول سیم برحسب متر،

A سطح مقطع سیم بر حسب میلی‌متر مربع

ρ مقاومت مخصوص بر حسب $\frac{\Omega mm^2}{m}$

κ هدایت مخصوص بر حسب $\frac{m}{\Omega mm^2}$ است.

مثال ۲: سیم مسی به طول ۱۱۲ متر با سطح مقطع $4mm^2$ و هدایت مخصوص $\kappa = 56(\frac{m}{\Omega . mm^2})$ مفروض است. مقاومت الکتریکی سیم چند اهم است؟

$$R = \frac{L}{\kappa . A} = \frac{112}{56 \times 4} = 0/5\Omega \Rightarrow R = 0/5\Omega$$

مثال ۳: برای ساختن یک مقاومت الکتریکی ۱۰ اهمی، چند متر سیم آلومینیمی با سطح مقطع $1/5mm^2$ مورد نیاز است، در صورتی که $\kappa_{Al} = 35(\frac{m}{\Omega . mm^2})$ باشد.

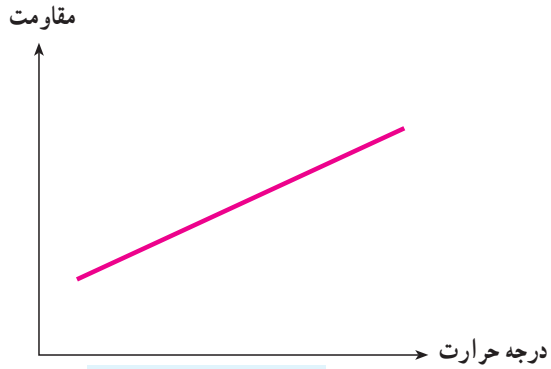
$$R = \frac{L}{\kappa . A} \Rightarrow 10 = \frac{L}{35 \times 1/5} \Rightarrow L = 10 \times 35 \times 1/5$$

$$L = 525m$$

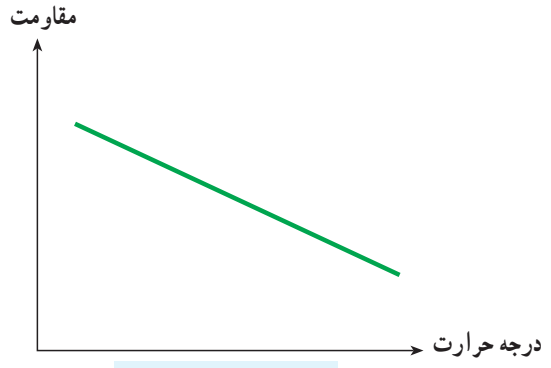
اثر حرارت بر مقاومت الکتریکی: در واقع، آن‌چه در مورد مقاومت گفته شد، همه در دمای اتاق صادق است. اما در دماهای کم‌تر یا بیش‌تر، مقدار مقاومت کلیه‌ی فلزات تغییر می‌کند. تغییر مقاومت بر اثر حرارت در فلزات مختلف متفاوت است؛ بنابراین، باید برای هر فلز ضریبی را تعریف کرد که آن را **ضریب حرارتی** می‌نامند. تغییرات مقاومت به ازای یک درجه‌ی سانتی‌گراد را، ضریب حرارتی می‌گویند و آن را با (α) نمایش می‌دهند؛ برای مثال اگر $\alpha = 0/004$ باشد، یعنی این‌که مقاومت آن جسم به ازای یک درجه‌ی سانتی‌گراد ۰/۰۰۴ اهم افزایش یا کاهش می‌یابد. اگر مقاومت الکتریکی جسمی براثر حرارت افزایش یابد، ضریب حرارتی (α) مثبت و در صورت کاهش مقاومت، ضریب حرارتی (α) منفی خواهد بود. در مورد اول، فلز را PTC[1] و در مورد دوم NTC[2] می‌نامند.

۱ــ PTC = Positive Temperature Coefficient

۲ــ NTC = Negative Temperature Coefficient



ضریب حرارتی مثبت (الف



ضریب حرارتی منفی (ب

شکل ۹ــ۷ــ نمودار اجسام با ضرایب حرارتی مثبت و منفی

بنابراین، مقاومت یک جسم در اثر افزایش حرارت چنین خواهد شد :

$$R_t = R_\circ \mp R_\circ \alpha t$$

کــه در آن $R_\circ$ مقاومت در صفر درجه و $R_\circ \alpha t$ مقدار تغییر مقاومت است. چون در رابطه‌ی $R_\circ \alpha t$ ، $R_\circ$ بر حسب (Ω) و t افزایش دما بر حسب $(^\circ C)$ است، لزوماً ضریب حرارتی (α) برحسب $\frac{1}{^\circ C}$ خواهد بود. اگر در رابطه‌ی ذکر شده قبل از $R_\circ$ فاکتور بگیریم، خواهیم داشت :

$$R_t = R_\circ(1 \mp \alpha t)$$

مثال ۴ : مقاومت الکتریکی سیمی در صفر درجه‌ی سانتی‌گراد ۱۰۰ اهم است. اگر دمای سیم به ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برسد، مقاومت الکتریکی آن چند اهم می‌شود؟

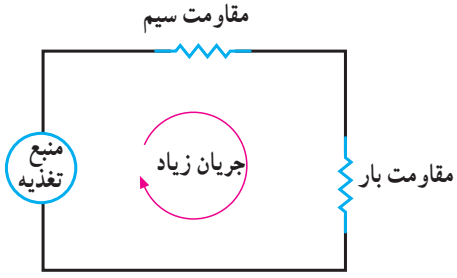
$$\alpha = 0/004 \frac{1}{^\circ C}$$

$$R_t = R_\circ(1+\alpha t) = 100(1+0/004\times 250)$$

$$R_t = 200\Omega$$

۷ــ۷ــ مقاومت‌های الکتریکی یک مدار

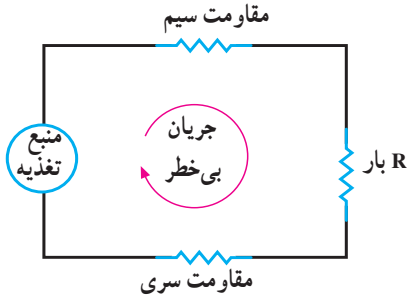
فرض کنید که یک بار الکتریکی را به یک منبع ولتاژ وصل کرده‌ایم. گاهی ممکن است جریانی بیش از حد در مدار جاری شود. زمانی این اتفاق می‌افتد که مقاومت بار الکتریکی خیلی کم یا ولتاژ خروجی منبع خیلی زیاد باشد. شدت جریان را با کم کردن ولتاژ منبع می‌توان کم کرد اما معمولاً این کار ممکن نیست. بنابراین تنها راه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



شکل ۱۰ــ۷ ــ 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 آن‌قدر 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 این‌که 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 ۱۱ــ۷ــ افزودن مقاومت به مدار

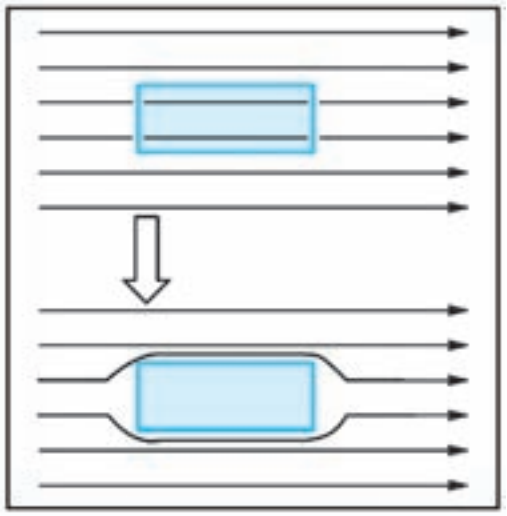
۸ــ۷ــ ابر رسانا

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.

۹ــ۷ــ 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.

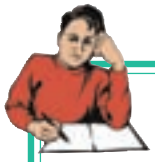
در شکل ۱۲ــ۷ یک قطعه آهن‌ربا روی یک قطعه ابررسانا شناور است طبق خاصیتی که در بالا گفتیم ابر رساناها می‌توانند خطوط میدان مغناطیس را به خارج پرتاب کنند و همان‌طور که می‌بینیم قرص مغناطیسی را شناور نگه داشته است.



شکل ۱۲ــ۷

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 ۵۸۱km/h حرکت می‌کند. در این قطارها به‌جای استفاده از چرخ از میدان مغناطیسی استفاده شده است. در این حالت قطارهای سریع‌السیر درحال حرکت معمولاً چند سانتی‌متر با ریل فاصله دارد و تماسی با ریل پیدا نمی‌کنند (شکل ۱۳ــ۷).

شکل ۱۳ــ۷



پرسش

۱ــ فلزی با ضریب هدایت نسبی ۰/۹۹ یک عایق خوب است یا بد؟

۲ــ یک عنصر مشخص ۱۵ اهم مقاومت دارد. اگر سطح مقطع آن را سه برابر کنیم، مقاومت آن چه‌قدر می‌شود؟

۳ــ ضریب حرارتی را تعریف کنید.

۴ــ آیا طول سیم در ضریب حرارتی آن تأثیر دارد؟ توضیح دهید.

۵ــ برای کنترل جریان مدار از چه روشی استفاده می‌شود؟

۶ــ ضریب حرارتی مس مثبت است یا منفی؟

۷ــ برای محاسبه‌ی مقاومت مدار چه پارامترهایی در نظر گرفته می‌شود؟

۸ ــ اگر یک سیم مسی گرم شود، مقاومت آن چه تغییری می‌کند؟

تمرین

۱ــ اگر $\rho_{Cu} = ۰/۰۱۷۸ \frac{\Omega.mm^۲}{m}$ باشد، مطلوب است محاسبه‌ی κ_{Cu} .

ج) $\kappa_{Cu} = ۵۶ \frac{m}{\Omega.mm^۲}$

۲ــ یک سیم مسی به طول l را به چهار قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم. آن گاه این چهار قسمت را کنار هم می‌گذاریم و به صورت سیم واحدی (مثل کابل چهارتایی) از آن‌ها استفاده می‌کنیم. آیا مقاومت الکتریکی این سیم نسبت به حالت اولیه کم می‌شود یا زیاد؟ (از کاهش طول به خاطر پیچش صرف‌نظر می‌کنیم.)

۳ــ روی استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر ۱۰۰ دور سیم مسی به سطح مقطع $۱/۵mm^۲$ می‌پیچیم. مقاومت الکتریکی این سیم‌پیچ چه‌قدر است؟

$\kappa_{Cu} = ۵۶ \frac{m}{\Omega.mm^۲}$ ج) ۰/۱۸Ω

۴ــ قطر یک سیم کروم نیکل به طول یک متر، ۰/۶ میلی‌متر و مقاومت آن ۳ اهم است. مقاومت مخصوص و هدایت مخصوص آن را پیدا کنید.

ج) $\kappa = ۱/۱۸$ و $\rho = ۰/۸۵$

۵ــ برای این‌که مقاومت سیمی را ۴۰ درصد اضافه کنیم، دما چه‌قدر باید افزایش یابد؟

(دمای اولیه‌ی سیم صفر درجه‌ی سانتی‌گراد.)

$\alpha = ۰/۰۰۴ \frac{۱}{^\circ C}$

ج) $t = ۱۰۰^\circ C$

۶ــ مقاومت یک اتوی برقی در صفر درجه‌ی سانتی‌گراد ۵۰Ω است. اگر درجه حرارت این اتو ضمن کار کردن به $۷۵^\circ C$ برسد، مقاومت آن چه‌قدر می‌شود؟

$\alpha = ۰/۰۰۰۲ \frac{۱}{^\circ C}$ ج) $R = ۵۰/۷۵\Omega$

فصل هشتم

قانون اهم

هدف‌های رفتاری

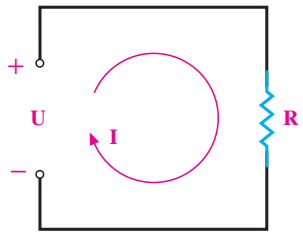
در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ قانون اهم را تعریف کند و شکل‌های مختلف فرمول آن را بنویسد.

۲ــ با حل‌کردن مسائل مختلف، مفهوم هر سه شکل قانون اهم را توجیه کند.

۳ــ هر یک از مقادیر شدت جریان، ولتاژ و مقاومت را به شرط معلوم‌بودن دو کمیت دیگر محاسبه کند.

همان‌طورکه در فصل‌های پیش گفتیم، ولتاژ باعث جاری‌شدن 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، شدت‌جریان 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.



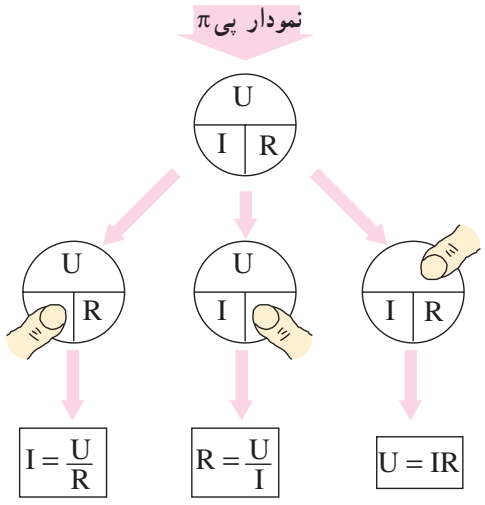
شکل ۱ــ۸ ــ مدار الکتریکی

۱ــ۸ــ شکل‌های مختلف قانون اهم

قانون اهم را به دو صورت دیگر نیز می‌توان نوشت :

$R = \frac{U}{I}$ در این رابطه مقاومت مساوی است با U (ولتاژ) تقسیم بر I (جریان) یا $U = I.R$ که U (ولتاژ) مساوی است با I (شدت‌جریان) 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.

شکل۲ــ۸ برای یادآوری سه شکل قانون اهم قابل استفاده است. در این شکل هرکدام از علامت‌ها را با انگشت بپوشانید، علایم دیگر رابطه‌ی کمیت اشاره شده را نشان می‌دهد و مقدار مجهول به‌راحتی به‌دست می‌آید.

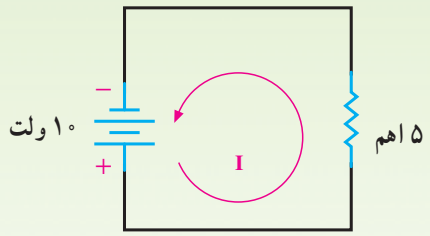


شکل ۲ــ۸ــ سه شکل قانون اهم (نمودار π)

۲ــ۸ــ محاسبه‌ی جریان

در مواردی لازم است مقدار شدت جریانی که از مدار عبور می‌کند، محاسبه شود. با داشتن کمیت‌های ولتاژ و مقاومت و با استفاده از قانون اهم شدت جریان را به‌راحتی می‌توان محاسبه کرد. روش خوبی که در این مورد می‌توان به‌کار بست، این است که معلوم‌ها و مجهول‌ها را تشخیص دهیم. مجهول کمیتی است که می‌خواهیم آن را پیدا کنیم و معمولاً در طرف چپ معادله قرار می‌گیرد. معلوم‌ها کمیت‌هایی هستند که مقدار آن‌ها را داریم و معمولاً در طرف راست معادله قرار می‌گیرند.

مثال ۱: اگر در مدار شکل ۳ــ۸ ولتاژی برابر با ۱۰ ولت به دو سر مقاومتی برابر ۵ اهم اعمال شود، شدت جریان مدار چه‌قدر است؟



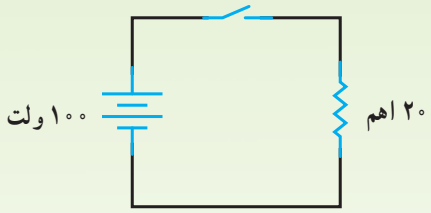
شکل ۳ــ۸

وقتی که شدت جریان (I) مجهول است، باید از معادله‌ی $I=\frac{U}{R}$ استفاده کرد.

$$I=\frac{U}{R}\Rightarrow I=\frac{۱۰}{۵}$$

$$\boxed{I=۲A}$$

مثال ۲: اگر در مدار شکل ۴ــ۸ جریان مجاز مقاومت ۸ آمپر باشد، آیا در صورت بسته‌شدن کلید، مقاومت خواهد سوخت؟



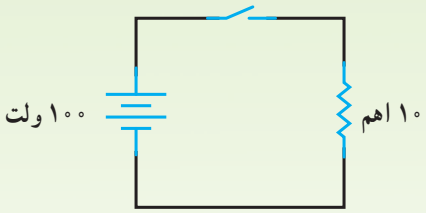
شکل ۴ــ۸

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

$$I=\frac{U}{R}=\frac{۱۰۰}{۲۰}\qquad \boxed{I=۵A}$$

چون شدت جریان مدار ۵ آمپر بوده و از جریان مجاز مقاومت (۸ آمپر) کوچک‌تر است، بنابراین برای مقاومت مشکلی به‌وجود نمی‌آید و مقاومت نمی‌سوزد.

مثال ۳: اگر در مدار شکل ۵ــ۸ جریان مجاز مقاومت ۱۰اهمی ۸ آمپر باشد، آیا در صورت بسته‌شدن کلید، مقاومت خواهد سوخت؟



شکل ۵ــ۸

ابتدا شدت جریان مدار را با استفاده از قانون اهم به‌دست می‌آوریم.

$$I=\frac{U}{R}=\frac{۱۰۰}{۱۰}\qquad \boxed{I=۱۰A}$$

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

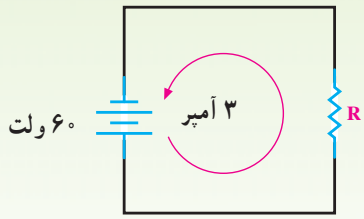
۳ــ۸ــ محاسبه‌ی مقاومت

مقاومت را به‌وسیله‌ی قانون اهم و با استفاده از رابطه‌ی $R = \frac{U}{I}$ می‌توان محاسبه کرد.

برای انتخاب مقاومت مناسب در مدار یا محاسبه‌ی مقاومت بار به‌راحتی می‌توان از قانون اهم استفاده کرد.

مثال ۴: اگر در مدار شکل ۶ــ۸ شدت جریان ۳ آمپر از مقاومت عبور کند، مقاومت مدار چه‌قدر است؟

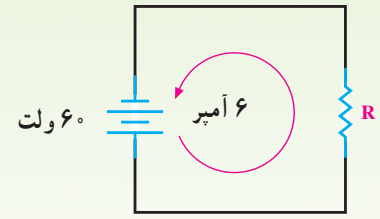
$R = \frac{U}{I} = \frac{۶۰}{۳}$ مقاومت مدار $R = ۲۰\Omega$



شکل ۶ــ۸

مثال ۵: اگر در مثال ۴ بخواهیم شدت جریان مدار ۶ آمپر شود، چه مقاومتی باید در مدار قرار گیرد؟ (شکل ۷ــ۸)

$R = \frac{U}{I} = \frac{۶۰}{۶}$ $R = ۱۰\Omega$

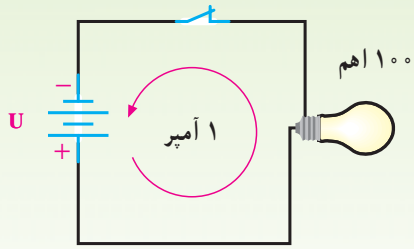


شکل ۷ــ۸

۴ــ۸ــ محاسبه‌ی ولتاژ

ولتاژ را براساس قانون اهم با استفاده از رابطه‌ی $U = I.R$ می‌توان محاسبه کرد.

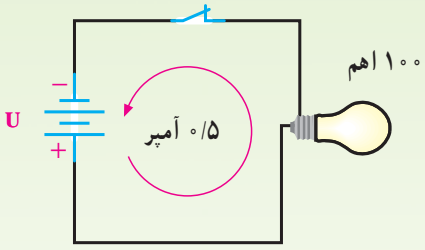
مثال ۶: اگر از لامپی به مقاومت ۱۰۰ اهم جریانی به‌شدت ۱ آمپر عبور کند، با توجه به شکل ۸ــ۸ ولتاژ منبع چند ولت است؟



شکل ۸ــ۸

$U = I.R = ۱ \times ۱۰۰$ $U = ۱۰۰V$

مثال ۷: چنان‌چه باتری مثال ۶ در مدار شکل ۹ــ۸ بر اثر فرسودگی، جریان ۰/۵ آمپر را در مدار جاری کند، ولتاژ منبع به چه میزان کاهش یافته است؟



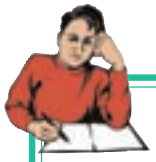
شکل ۹ــ۸

$U = I.R = ۰/۵ \times ۱۰۰$

ولتاژ منبع درحالت فرسودگی $U = ۵۰V$

افت ولتاژ* $۱۰۰ - ۵۰ = ۵۰V$

* کاهش ولتاژ منبع به‌علت فرسودگی، بر اثر افزایش مقاومت داخلی باتری است.



پرسش

۱ــ قانون اهم و سه تساوی آن را بیان کنید.

۲ــ مداری رسم کنید که در آن یک باتری ۱۵ ولت، باری به مقاومت ۱۵ اهم را تغذیه کند. شدت جریان را در مدار به‌دست آورید.

۳ــ دو صورتی را که در آن‌ها جریان الکتریکی گفته شده در سؤال ۲، دوبرابر می‌شود، بیان کنید.

۴ــ اگر مقاومت مدار ۴ برابر شود، ولتاژ مدار چه‌قدر باید باشد که جریان الکتریکی ثابت بماند؟

۵ــ شدت جریان در یک مقاومت ۱۰۰ اهم ۲ آمپر است. حداکثر ولتاژ به‌کار رفته در مدار چه‌قدر است؟

ج) $U = ۲۰۰V$

۶ــ چنان‌چه ولتاژ ثابت باشد و مقاومت مدار $\frac{۱}{۴}$ شود، جریان چه تغییری خواهد کرد؟

۷ــ اگر مقاومت مدار $\frac{۱}{۴}$ شود، چه تغییری باید در مدار داد تا جریان به‌صورت اول باقی بماند؟

۸ــ دو برابرکردن مقاومت یک مدار ــ چنان‌چه ولتاژ را ثابت نگه داریم ــ چه اثری در جریان الکتریکی خواهد داشت؟ اگر ولتاژ را نصف کنیم و مقاومت را ثابت نگه‌داریم، چه تغییری در جریان ایجاد خواهد شد؟ حال اگر ولتاژ و مقاومت را دو برابر کنیم، چه تغییری در جریان حاصل خواهد شد؟

تمرین

۱ــ به دو سر یک مقاومت ۶۰ اهمی ولتاژی برابر ۳۶ ولت داده شده است. چه جریانی از این مقاومت عبور می‌کند؟

ج) $I = ۰/۶A$

۲ــ ولتاژ لازم برای عبور جریانی برابر ۱/۲ آمپر از یک مقاومت ۵ اهمی چه‌قدر است؟

ج) $U = ۶V$

۳ــ یک لامپ برابر ۱۵۰ اهم مقاومت دارد و ولتاژی برابر ۱۲۰ ولت به آن داده می‌شود. مقدار جریان عبوری را حساب کنید.

ج) $I = ۰/۸A$

۴ــ از یک لامپ و یک منبع ولتاژ و یک آمپرمتر مداری تشکیل داده‌ایم. اگر منبع ولتاژ را ۲۴ ولت اختیار کنیم، آمپرمتر 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، آمپرمتر چه مقداری را نشان خواهد داد؟

ج) $R = ۱۶\Omega$ و $I = ۲/۲۵A$

۵ــ چه ولتاژی در مقاومت ۴۰ اهمی، جریانی برابر با ۱۰۰ میلی‌آمپر ایجاد می‌کند؟ ج) $U = ۴V$

۶ــ 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؟

فصل نهم

کار و توان الکتریکی

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ مفهوم کار و توان را توضیح دهد.

۲ــ واحدهای کار و توان الکتریکی را تعریف کند.

۳ــ واحدهای رایج انرژی و توان الکتریکی را نام ببرد.

۴ــ مفهوم تلفات توان را توضیح دهد.

۵ــ راندمان (بازده) را تعریف کند.

۶ــ مقدار حرارت تولید شده در مقاومت‌ها را محاسبه کند.

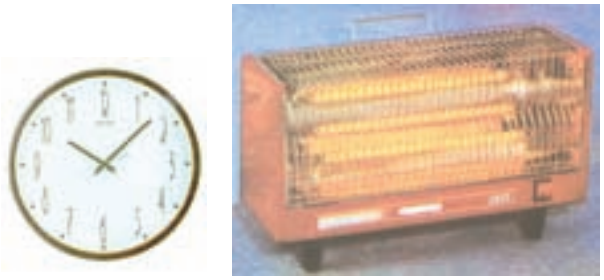
۷ــ مسائل مربوط به توان و انرژی و حرارت و راندمان را محاسبه کند.

۱ــ۹ــ تعاریف کار و توان

همان‌طورکه در فصل‌های پیش گفته شد، منبع تغذیه در یک مدار الکتریکی انرژی الکتریکی را برای مصرف کننده تأمین می‌کند و مصرف‌کننده (بار) از انرژی منبع برای انجام کار استفاده می‌کند. در هنگام انجام کار، مصرف‌کننده 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 انجام‌شده به‌وسیله‌ی مصرف‌کننده به انرژی‌ای که در اختیار دارد و سرعت استفاده از این انرژی بستگی دارد. به‌عبارت دیگر، بارهای مختلف با در اختیارداشتن 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 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 به‌وسیله‌ی این گرما هیچ عمل مفیدی انجام نمی‌شود. هنگامی که توان برای کار غیرمفید مصرف می‌شود، آن را **توان تلف شده** می‌گویند.

شکل ۱ــ۹ نشان می‌دهد که برای چرخاندن موتور یک ساعت الکتریکی، توان بسیار کمی لازم است ؛ درصورتی که برای تولید گرما به‌وسیله‌ی بخاری برقی باید توان زیادی مصرف شود.



شکل ۱ــ۹ــ میزان توان لازم برای ساعت الکتریکی و بخاری برقی

۲ــ۹ــ واحد کار الکتریکی

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

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

۳ــ۹ــ 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 :

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

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

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

۴ــ۹ــ معادلات توان

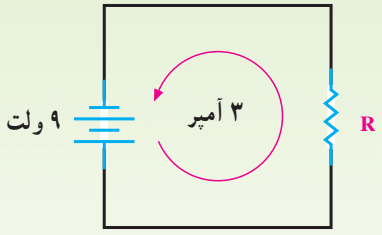
رابطه‌ی توان الکتریکی ($P = U.I$) را پس از ترکیب با روابط قانون اهم به شکل‌های دیگر نیز می‌توان نوشت :

$$P = U.I$$

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

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

مثال ۱: در مدار شکل ۲ــ۹ مقدار مقاومت الکتریکی و توان مصرفی آن را محاسبه کنید.

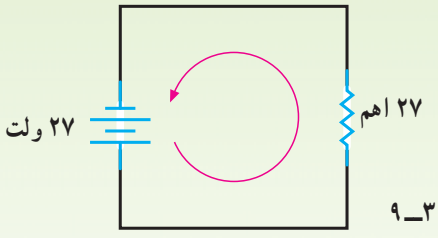


شکل ۲ــ۹

$$R = \frac{U}{I} = \frac{۹}{۳} \qquad \boxed{R = ۳\Omega}$$

$$P = U.I = ۹ \times ۳ \qquad \boxed{P = ۲۷W}$$

مثال ۲: در مدار شکل ۳ــ۹ مقدار شدت جریان و توان مصرفی مقاومت را محاسبه کنید.

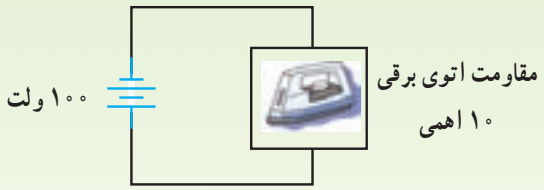


شکل ۳ــ۹

$$I = \frac{U}{R} = \frac{۲۷}{۲۷} \qquad \boxed{I = ۱A}$$

$$P = RI^2 = ۲۷ \times ۱^2 \qquad \boxed{P = ۲۷W}$$

مثال ۳: شدت جریان و توان مصرفی اتوی برقی شکل ۴ــ۹ را محاسبه کنید.

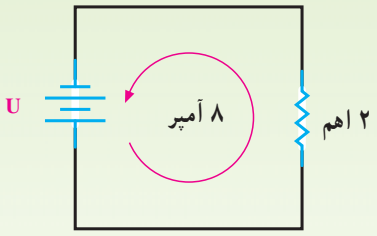


شکل ۴ــ۹

$$I = \frac{U}{R} = \frac{۱۰۰}{۱۰} \qquad \boxed{I = ۱۰A}$$

$$P = RI^۲ = ۱۰ \times ۱۰^۲ \qquad \boxed{P = ۱۰۰۰W}$$

مثال ۴: ولتاژ منبع و توان مصرفی مقاومت ۲ اهمی مدار شکل ۵ــ۹ را محاسبه کنید.



شکل ۵ــ۹

$$U = R.I = ۲ \times ۸ \qquad U = ۱۶V$$

$$P = RI^۲ = ۲ \times ۸^۲ \qquad \boxed{P = ۱۲۸W}$$

۵ــ۹ــ تلفات توان

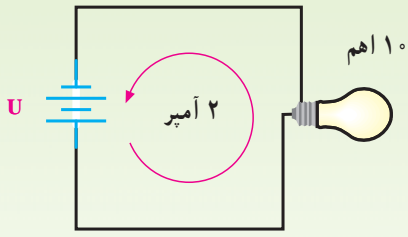
توان مصرف‌شده در یک مدار، نشان‌دهنده‌ی کار انجام‌شده در واحد زمان در آن مدار است ولی باید در نظر داشت که همه‌ی توان مصرفی صرف انجام کار مفید نمی‌شود بلکه به‌علت وجود مقاومت الکتریکی در سیم‌های رابط، منبع ولتاژ و بار، توان اتلاف خواهد شد. باید تلاش کرد که در هر مدار الکتریکی مقدار توان تلف‌شده به حداقل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

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

۱ــ۵ــ۹ــ کم‌کردن شدت جریان: چون شدت‌جریان 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.

۲ــ۵ــ۹ــ 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 $I^۲.R$ به کم‌ترین مقدار کاهش می‌یابد. در بعضی از دستگاه‌های الکتریکی مانند اتو و بخاری برقی، گرمای ایجاد شده به‌وسیله‌ی مقاومت توان مفید است و نمی‌توان آن را توان تلف‌شده در نظر گرفت.

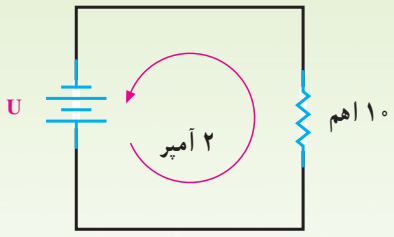
مثال ۵: در شکل ۶ــ۹ توان مفید لامپ را محاسبه کنید.



شکل ۶ــ۹

$$P = RI^۲ \qquad P = ۱۰ \times ۲^۲ \qquad \boxed{P = ۴۰W}$$

مثال ۶: در شکل ۷ــ۹ تلفات توان در مقاومت ۱۰ اهمی را محاسبه کنید.



شکل ۷ــ۹

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

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.

۶ــ۹ــ توان مجاز مقاومت‌ها

می‌دانیم که در یک مقاومت اگر شدت جریان از حد معینی بالاتر رود، با خرابی یا از بین‌رفتن 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 به‌وسیله‌ی $I^2.R$ قبل از سوختن و از بین‌رفتن 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 امّا 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.

شکل ۸ــ۹ــ چند مقاومت تولیدی کارخانه‌های مختلف

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

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

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

۷ــ۹ــ میزان توان لامپ رشته‌ای (معمولی)

لامپ معمولی از یک فیلامان از جنس تنگستن ــ که در حباب شیشه‌ای قرار دارد ــ 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 حدّی 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 ــ که باعث گرما و نهایتاً نور می‌شود ــ 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 می‌تابانند زیادتر خواهد بود.

در شکل ۹ــ۹ میزان توان مصرفی چند لامپ رشته‌ای را که همگی با ولتاژ ۲۲۰ ولت تغذیه می‌شوند، مشاهده می‌کنید.

مثال ۸ : شدت جریان و مقاومت فیلامان هر یک از لامپ‌های شکل ۹ــ۹ را در صورتی که ولتاژ نامی همه‌ی آن‌ها ۲۲۰ ولت باشد، محاسبه کنید.

۴۰ وات ۶۰ وات ۱۰۰ وات

شکل ۹ــ۹ــ توان مصرفی چند لامپ

لامپ ۱۰۰W $P = U.I \Rightarrow ۱۰۰ = ۲۲۰ \times I$

$\boxed{I = ۰/۴۵A}$

$R = \frac{U}{I} = \frac{۲۲۰}{۰/۴۵}$

$\boxed{R = ۴۸۸/۸\Omega}$

لامپ ۶۰W $P = U.I \Rightarrow ۶۰ = ۲۲۰ \times I$

$\boxed{I = ۰/۲۷A}$

$R = \frac{U}{I} = \frac{۲۲۰}{۰/۲۷}$

$\boxed{R = ۸۱۴/۸\Omega}$

لامپ ۴۰W $P = U.I \Rightarrow ۴۰ = ۲۲۰ \times I$

$\boxed{I = ۰/۱۸A}$

$R = \frac{U}{I} = \frac{۲۲۰}{۰/۱۸}$

$\boxed{R = ۱۲۲۲/۲\Omega}$

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، براثر کاهش ولتاژ، شدت جریان عبوری کم می‌شود و روشنایی آن نیز کاهش می‌یابد. با استفاده 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 چه‌قدر می‌شود؟

$P = U.I \Rightarrow ۲۰۰ = ۲۲۰ \times I \rightarrow I = \frac{۲۰۰}{۲۲۰} \Rightarrow \boxed{I = ۰/۹A}$

$R = \frac{U}{I} = \frac{۲۲۰}{۰/۹} \Rightarrow \boxed{R = ۲۴۴\Omega}$

$I = \frac{U}{R} = \frac{۱۸۰}{۲۴۴} \Rightarrow \boxed{I = ۰/۷۳A}$

$P = RI^۲ = ۲۴۴ \times ۰/۷۳^۲ \quad \boxed{P = ۱۳۰W}$

پس، در اثر کاهش ولتاژ از ۲۲۰ ولت به ۱۸۰ ولت جریان و توان به ترتیب به میزان ۰/۷۳ آمپر و ۱۳۰ وات تقلیل می‌یابد و روشنایی لامپ از روشنایی عادی کم‌تر می‌شود.

۸ــ۹ــ توان مفید و راندمان (بازده) الکتروموتور

در الکتروموتورها میزان توان مفید ــ که به‌صورت مکانیکی ارائه می‌شود ــ به مقدار توان تلف‌شده در سیم‌پیچ‌ها ($I^۲.R$) بستگی دارد (R مقاومت سیم‌پیچ‌ها و I شدت جریان عبوری است). بدین معنا که هر قدر $I^۲.R$ بیش‌تر باشد، توان مفید کاهش می‌یابد؛ بنابراین، در الکتروموتورها سعی بر این است که مقدار توان تلف‌شده کم باشد. البته به غیر از $I^۲.R$ 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 آن‌را به‌راحتی محاسبه می‌کنند. با ذکر تمرین مطلب روشن‌تر می‌شود (راندمان، نسبت توان مفید ($P_۲$) به توان ورودی الکتروموتور ($P_۱$) است که آن را با حرف یونانی η (اتا) نمایش می‌دهند).

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

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{1 \times 736}{0/85}$$

قدرت ورودی $P_1 = 866W$

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

تلفات داخلی $\boxed{\Delta P = 130W}$

$$P_1 = U.I \rightarrow I = \frac{P_1}{U} = \frac{866}{220} \quad \boxed{I = 3/9A}$$

۹ــ۹ــ اندازه‌گیری انرژی الکتریکی

اندازه‌گیری انرژی مصرفی منازل، فروشگاه‌ها و کارخانه‌ها به‌وسیله‌ی دستگاهی به‌نام کنتور برق انجام می‌شود. هر مشترک براساس مقدار کاری که به‌وسیله‌ی 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 ــ ساعت می‌شود. وات ــ ساعت واحد کوچکی است؛ به همین دلیل، به جای آن از کیلووات ــ ساعت استفاده می‌کنیم بر این اساس، انرژی مصرفی لامپ مورد مثال، برابر $0/1kW \times 1 = 0/1kWh$ است.

۱۰ــ۹ــ 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 به‌دست 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.

۱۱ــ۹ــ 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 ۴/۱۸ ژول انرژی الکتریکی نیاز است. پس برای تولید Q کالری حرارت، $4/18Q$ ژول مورد نیاز خواهد بود؛ بنابراین، خواهیم داشت: $W = 4/18Q$. این رابطه را به شکل $Q = 0/24W$ نیز می‌توان نوشت.

$$W = P.t = RI^2t$$

$$\boxed{Q = 0/24RI^2t}$$

پرسش

۱ــ واحدهای ژول و وات را تعریف کنید.

۲ــ یک کیلووات ــ ساعت چند ژول است؟

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

ج) $1/492kW$ و $2/02hp$

۴ــ اگر بخواهیم برای روشن کردن اتاق نور بیش‌تری تولید کنیم، توان لامپ به‌کار رفته باید کم‌تر باشد یا بیش‌تر؟ چرا؟

۵ــ I^2R تلف شده چه مفهومی دارد؟

تمرین

۱ــ لامپی با ولتاژ ۲۲۰ ولت کار می‌کند و توان مصرفی آن ۱۵۰ وات است. مقاومت فیلامان آن را حساب کنید.

ج) ۳۲۲/۶Ω

۲ــ ماکزیمم ولتاژی را که می‌توان به دو سر یک مقاومت ۱۰۰۰ اهمی با توان ۱۰ وات وصل کرد، چه‌قدر است؟

ج) ۱۰۰V

۳ــ توان مجاز مقاومت ۱ کیلواهمی ۱۰ وات است. جریان قابل تحمل آن چه‌قدر است؟

ج) ۰/۱A

۴ــ یک لامپ ۱۰۰ واتی و ۲۲۰ ولتی را به ولتاژ ۱۰۰ ولت وصل می‌کنیم. شدت جریان و توان لامپ را در این حالت حساب کنید.

ج) ۲۰W و ۰/۲A

۵ــ یک اتوی برقی ۲۲۰ ولتی، ۵۵۰ وات توان مصرف می‌کند. مقاومت سیم‌های داخل آن چند اهم است؟ اگر ولتاژ ۱۵ درصد کاهش یابد، توان اتو چند درصد کاهش می‌یابد؟

ج) ۸۸Ω و ۲۷/۸٪

۶ــ یک موتور الکتریکی، در مدت یک دقیقه و ۱۰ ثانیه ؛ ۳۵۰۰۰ ژول انرژی مصرف کرده است. توان دریافتی آن چه‌قدر است؟ درصورتی که راندمان این موتور ۸۰٪ باشد، قدرت مفید آن چند اسب بخار است؟

ج) $P_1 = ۵۰۰W$ و $P_2 = ۰/۵۴hp$

۷ــ یک جرثقیل الکتریکی در مدت ۳ دقیقه ۱۰ تن بار را جابه‌جا کرده است. اگر توان این جرثقیل ۸۰۰۰ وات باشد، برای جابه‌جایی یک تن بار چه مقدار انرژی الکتریکی را به مصرف می‌رساند؟

ج) ۱۴۴۰۰۰ ژول

۸ــ از یک اتوی برقی به مقاومت ۶۵ اهم، جریانی به شدت ۳ آمپر به مدت ۵ دقیقه عبور می‌کند. مقدار گرمای ایجاد شده در اتو را برحسب کیلوکالری محاسبه کنید.

ج) ۴۲/۱۲kcal

۹ــ یک آب‌گرم‌کن الکتریکی در مدت ۲ ساعت ۴۰ لیتر آب ۱۰ درجه را به ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رساند. درصورتی که توان این آب‌گرم‌کن ۱۵۰۰ وات باشد برای گرم کردن این مقدار آب، چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف کرده است؟ برای گرم‌کردن هر لیتر آب چه مقدار انرژی صرف شده است؟ مقدار انرژی مصرفی ۴۰ لیتر آب به‌ازای یک درجه‌ی سانتی‌گراد چه‌قدر بوده است؟

ج) ۳kWh و ۰/۰۷۵kWh و ۰/۰۶kWh

فصل دهم

اتّصال سری مقاومت های اهمی

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ اتّصال سری مقاومت‌ها را تعریف کند.
۲ــ مقاومت معادل چند مقاومت سری را تعریف کند.
۳ــ از قانون اهم برای محاسبه‌ی جریان و ولتاژ استفاده کند.
۴ــ چگونگی توزیع ولتاژ را در مدار سری توضیح دهد.
۵ــ کاربرد اتّصال سری مقاومت را بیان کند.
۶ــ نسبی بودن پتانسیل الکتریکی را توضیح دهد.
۷ــ مقاومت معادل چند مقاومت سری را محاسبه کند.
۸ــ قانون ولتاژهای کیرشهف را در مدار سری به‌کار گیرد.
۹ــ توان را در مدار سری توضیح دهد.
۱۰ــ قوانین و مشخصات مدار سری را نام ببرد.
۱۱ــ جریان و توان را در مدار سری محاسبه کند.
۱۲ــ نحوه‌ی محاسبه توان مصرفی کل در مدارهای سری را با ذکر رابطه توضیح دهد.

۱ــ۱۰ــ اتّصال سری مقاومت‌های اهمی[۱]

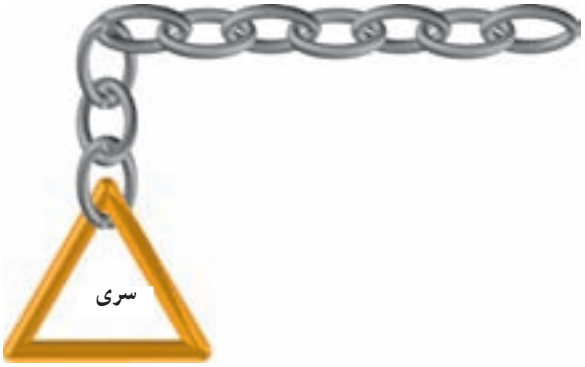
قبلاً با کمیت فیزیکی مقاومت و خصوصیّات آن آشنا شده‌اید. این مقاومت‌ها را با استفاده از روش‌های خاص می‌توان به‌هم اتصال داد. یکی از این روش‌ها اتصال سری مقاومت‌هاست که در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اگر با قطار مسافرت کرده باشید، دیده‌اید که قطار از تعدادی واگن و یک لکوموتیو تشکیل می‌شود. واگن‌ها می‌توانند مشابه یا بزرگ و کوچک باشند. در صورت نامساوی بودن، هر واگن گنجایش حمل بار یا مسافر خاص خود را دارد. اتصال واگن‌ها به یک‌دیگر به‌صورت پشت سرهم (سری) است ؛ یعنی، ابتدای یک واگن به انتهای واگن دیگر وصل است. هنگام حرکت، سرعت در همه‌ی واگن‌ها یکسان است (شکل ۱ــ۱۰).

شکل ۱ــ۱۰ــ در قطار، واگن‌ها به طور سری بسته می‌شوند.

۱ــ سری در زبان انگلیسی واژه‌ای به معنای اشیا یا وقایع پشت سرهم و پی در پی است.

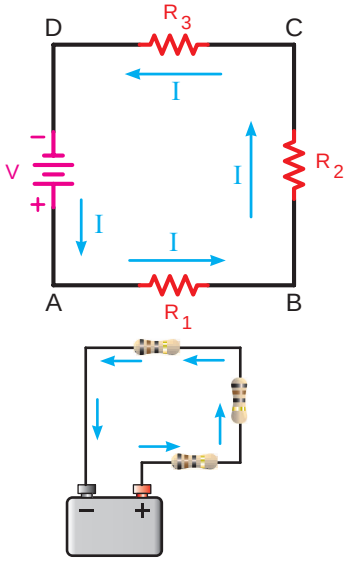
زنجیر نیز نمونه‌ی دیگری از حالت سری است و از حلقه‌های زیادی تشکیل می‌شود. حلقه‌های زنجیر مانند واگن‌های قطار به‌صورت سری به یک‌دیگر اتّصال دارند. چنان‌چه نیرویی در جهت طولی به‌زنجیر وارد شود، به‌طور یکسان به همه‌ی حلقه‌های آن منتقل می‌شود (شکل ۲ــ۱۰).



شکل ۲ــ۱۰ــ نمایش سری بودن حلقه‌های زنجیر

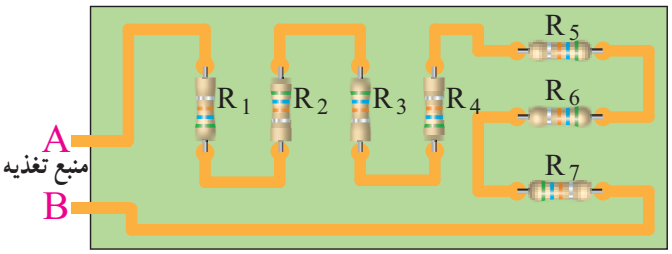
برای سری بستن مقاومت‌ها نیز همین روش دنبال می‌شود. بدین ترتیب که اگر چند مقاومت پشت سرهم طوری به‌یک‌دیگر متصل شوند که راهی را برای عبور جریان تشکیل دهند، یک مدار مقاومتی سری درست می‌شود. اتصال مقاومت‌ها با یک‌دیگر همانند اتصال دانه‌های زنجیر یا واگن‌های قطار است.

شکل ۳ــ۱۰ نمای مداری و تصویر ظاهری چند مقاومت سری شده را نشان می‌دهد.

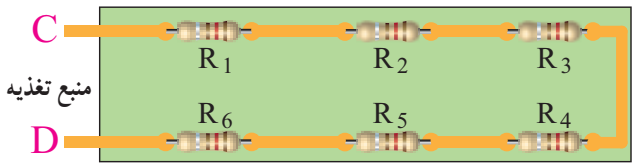


شکل ۳ــ۱۰ــ نمای مداری و ظاهری چند مقاومت سری

مقاومت را با حرف R نمایش می‌دهند که از کلمه‌ی Resistor گرفته شده است. برای نمایش چند مقاومت با مقادیر اهمیِ متفاوت، آن‌ها را با اندیس‌های ۱ تا n مشخص می‌کنند. برای مثال، مقاومت‌های شکل ۴ــ۱۰ به‌طور سری به‌هم بسته شده و با علامت مشخصه‌ی R و اندیس مربوط نام‌گذاری گردیده‌اند.



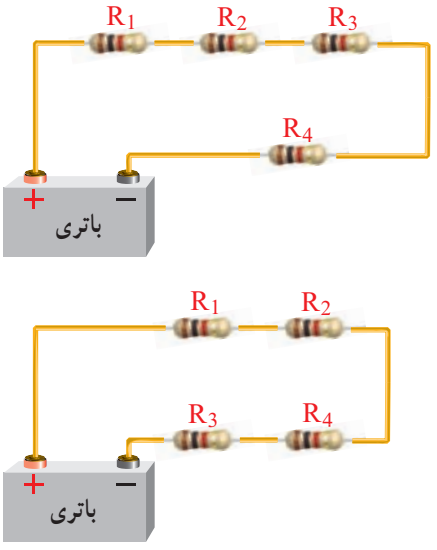
الف ــ بین نقاط A و B مقاومت‌های R_1 تا R_7 سری شده‌اند.



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

شکل ۴ــ۱۰ــ مقاومت‌های سری

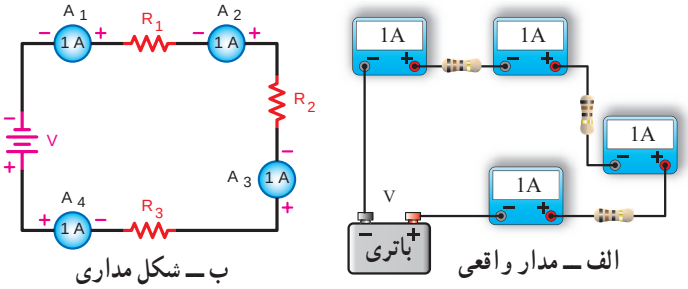
ترتیب قرار گرفتن مقاومت‌ها در مدار سری، در مقاومت کل مدار تأثیری ندارد. به‌علاوه، چون دو سر هر مقاومت از لحاظ قرارگرفتن در مدار با یک دیگر تفاوتی ندارد، برای آن‌ها ابتدا یا انتهایی درنظر نمی‌گیرند (شکل ۵ــ۱۰).



شکل ۵ــ۱۰ــ جابه‌جایی مقاومت‌ها در اتصال سری

۲ــ ۱۰ــ جریان در مدار سری

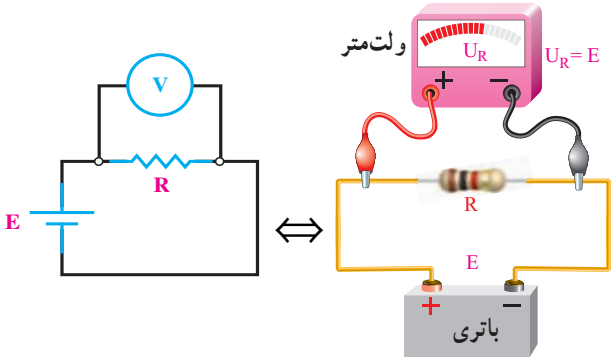
در یک مدار سری شدّت جریان ــ همانند سرعت در قطار ــ در همه‌ی نقاط مدار یکسان است ؛ یعنی، جریان وارد شده در هر نقطه از مدار سری با جریان خارج شده از همان نقطه برابر است. بنابراین، اگر ــ مطابق شکل ۶ ــ ۱۰ــ در نقاط مختلف یک مدار سری آمپرمترهایی قرار دهیم، همه یک جریان را نشان می‌دهند.



شکل ۶ ــ ۱۰ــ یکسان بودن شدّت جریان در همه‌ی نقاط مدار سری

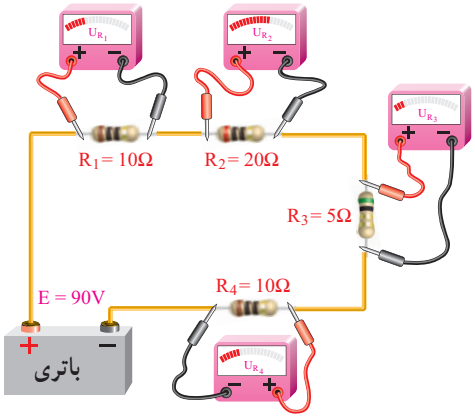
۳ــ ۱۰ــ ولتاژ در مدار سری

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



شکل ۷ــ ۱۰ــ اندازه‌گیری ولتاژ دو سر مقاومت

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



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

$$۹۰ = ۲۰ + ۴۰ + ۱۰ + ۲۰$$

شکل ۸ــ ۱۰ــ 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=R.I)

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.

۴ــ ۱۰ــ مقاومت در مدار سری

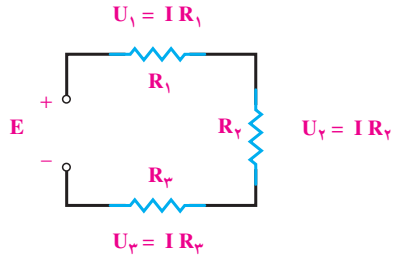
به‌جای چند مقاومت سری می‌توان یک مقاومتی را انتخاب کرد که مقدار مقاومت آن با مجموع مقاومت چند مقاومت سری برابر باشد. مقاومتی که به‌جای چند مقاومت سری قرار می‌گیرد، مقاومت کل یا مقاومت معادل آن چند مقاومت نامیده می‌شود و آن را با R_T نمایش می‌دهند. چنان‌چه مقاومت R_T جایگزین مقاومت‌های مدار شود، جریان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

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

افزود. بنابراین، در مدار سری با اضافه کردن تعداد مقاومت‌ها و ثابت بودن ولتاژ منبع، شدّت جریان کم می‌شود و این نشان می‌دهد که مقاومت معادل یا مقاومت کلِ مدار افزایش یافته است. برای محاسبه‌ی مقاومت معادل ــ یعنی مقاومتی که می‌توان آن را جایگزین مجموعه‌ای از مقاومت‌ها کرد، به‌شرطی که در شدّت جریان مدار تغییری ندهد ــ به‌صورت زیر عمل می‌کنیم.

مدار شکل ۹ــ۱۰ را با سه مقاومت R_1 ، R_2 و R_3 درنظر می‌گیریم.

در مدار سری شدّت جریان در تمام نقاط مدار یکسان است.



شکل ۹ــ۱۰ ــ مدار سری با سه مقاومت

در مدار فوق ولتاژ منبع با جمع افت ولتاژها برابر است. رابطه‌ی آن به این صورت است :

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

با توجه به قانون اهم، داریم :

(۲)

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

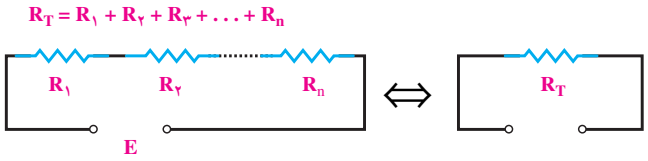
مقادیر روابط ۲ را در رابطه‌ی ۱ قرار می‌دهیم.

$$IR_T = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

با حذف جریان‌ها از طرفین تساوی به رابطه‌ی مقاومت معادل می‌رسیم.

$$\not{I}(R_T) = \not{I}(R_1 + R_2 + R_3) \qquad \boxed{R_T = R_1 + R_2 + R_3}$$

با توجه به اثبات رابطه‌ی ذکرشده، مقاومت معادل در یک مدار سری از جمع مقاومت‌های تشکیل دهنده‌ی آن مدار به‌دست می‌آید. شکل ۱۰ــ۱۰ درحالت کلی رابطه‌ی فوق را برای n مقاومت نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ــ۱۰ــ مدار سری با n مقاومت

حالت خاص: در صورتی که n مقاومت در مدار سری باهم مساوی باشند، مقاومت معادل از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید. چرا؟

$$\boxed{R_T = n.R}$$

۵ــ۱۰ــ کاربرد قانون اهم[1]

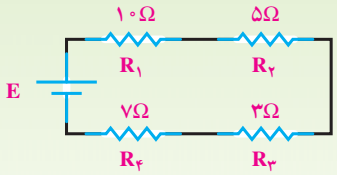
تاکنون متوجه شده‌اید که جریان و ولتاژ در مدار سری چگونه است امّا برای این که بدانید مقدار آن‌ها چگونه تغییر می‌کند و چه‌قدر است، باید از قانون اهم کمک بگیرید.

قانون اهم به‌ما می‌گوید که روابط زیر بین ولتاژ، جریان و مقاومت برقرار است.

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

در این‌جا با ذکرچند مثال، با نحوه‌ی کاربرد قانون اهم درمدارهای سری آشنا می‌شویم.

مثال ۱: مقاومت معادل مدار شکل ۱۱ــ۱۰ را به‌دست آورید.



شکل ۱۱ــ۱۰

راه حل:

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

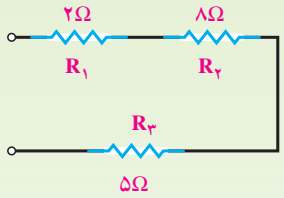
$$R_T = ۱۰ + ۵ + ۳ + ۷ = ۲۵\Omega$$

مثال ۲: مقاومت معادل مدارهای شکل ۱۲ــ۱۰ را به‌دست آورید. مقاومت معادل کدام مدار بیش‌تر است؟

۱ــ علامت Ω (امگا) به معنای اهم و علامت kΩ به معنای کیلواهم یا هزار اهم است.

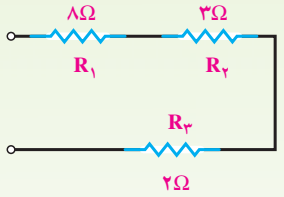
راه حل:

مدار شکل پ دارای مقاومت معادل بزرگ‌تری است.



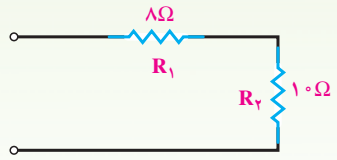
(الف)

مقاومت معادل شکل (الف) $R_T = ۲+۸+۵ = ۱۵\Omega$ ـ الف



(ب)

مقاومت معادل شکل(ب) $R_T = ۸+۳+۲ = ۱۳\Omega$ ـ ب

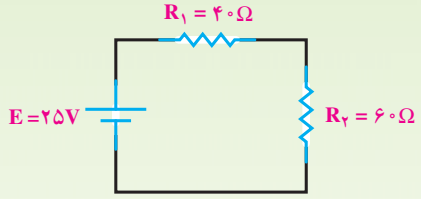


(پ)

مقاومت معادل شکل (پ) $R_T = ۸+۱۰ = ۱۸\Omega$ ـ پ

شکل ۱۰ـ۱۲

مثال ۳: در مدار شکل ۱۰ـ۱۳ شدّت جریان را حساب کنید.



شکل ۱۰ـ۱۳

راه حل : ابتدا مقدار مقاومت کل (R_T) را با استفاده از رابطه مقاومت معادل سری به‌دست می‌آوریم.

$$R_T = R_۱ + R_۲$$

$$= ۴۰\Omega \quad ۶۰\Omega$$

$$= ۱۰۰\Omega$$

با استفاده از قانون اهم می‌توان نوشت :

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{۲۵V}{۱۰۰\Omega} = ۰/۲۵A$$

این جریان کل در همه‌جای مدار یکسان باقی می‌ماند.

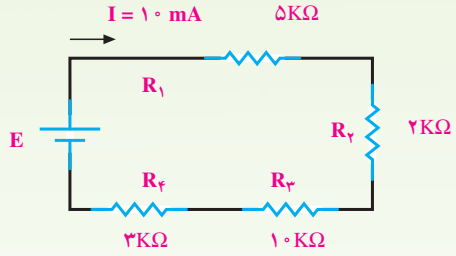
مثال ۴: در مدار شکل ۱۰ـ۱۴ جریان ۱۰ میلی‌آمپر از مدار عبور می‌کند. ولتاژ منبع تغذیه چه‌قدر است؟

راه حل: ابتدا مقاومت معادل (R_T) را به‌دست می‌آوریم.

$$R_T = R_۱ + R_۲ + R_۳ + R_۴$$

$$= ۵k\Omega \quad ۲k\Omega \quad ۱۰k\Omega \quad ۳k\Omega$$

$$= ۲۰k\Omega$$



شکل ۱۰ـ۱۴

با استفاده از قانون اهم داریم :

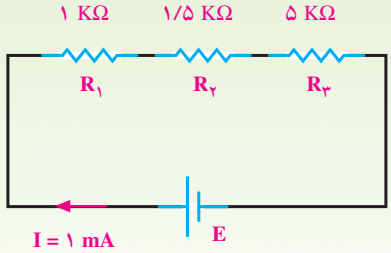
$$E = I.R_T$$

$$E = ۱۰mA \times ۲۰k\Omega$$

$$E = ۱۰\times۱۰^{-۳} \times ۲۰\times۱۰^{۳}$$

$$= ۲۰۰V$$

مثال۵: در مدار شکل ۱۰ـ۱۵ ولتاژ منبع تغذیه(E) و افت ولتاژ دوسر مقاومت‌ها را به‌دست آورید.



شکل ۱۰ـ۱۵

راه حل: به کمک قانون اهم در مورد هر مقاومت می‌توان

نوشت :

$$U_۱ = IR_۱ = (۱\times۱۰^{-۳}\times۱\times۱۰^{۳}) = ۱V$$

$$U_۲ = IR_۲ = (۱\times۱۰^{-۳}\times۱/۵\times۱۰^{۳}) = ۱/۵V$$

$$U_۳ = IR_۳ = (۱\times۱۰^{-۳}\times۵\times۱۰^{۳}) = ۵V$$

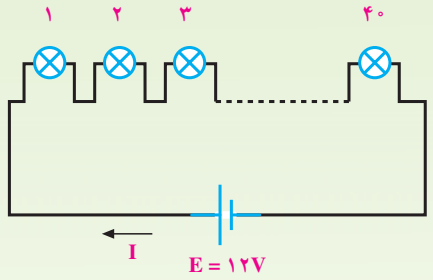
اکنون مقدار ولتاژ منبع تغذیه را حساب می‌کنیم.

$$E = U_۱ + U_۲ + U_۳$$

$$E = ۱+۱/۵+۵ \qquad E = ۷/۵V$$

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

مثال ۶: تعداد ۴۰ لامپ مشابه ۶ ولت ۰/۳ آمپری را مطابق شکل ۱۶ــ۱۰ به‌طور سری به منبع ولتاژ ۱۲ ولتی اتّصال داده‌ایم. لامپ‌ها روشن نمی‌شوند. با توجه به این که همه‌ی آن‌ها سالم و اتّصالات نیز سالم هستند، علت را شرح دهید.



شکل ۱۶ــ۱۰

راه حل:

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

$$R = \text{مقاومت هر لامپ}$$

$$R = \frac{U}{I} \text{ قانون اهم}$$

$$= \frac{۶V}{۰/۳} = ۲۰\Omega$$

چون لامپ‌ها مشابه یک‌دیگرند، پس ولتاژ منبع به‌طور مساوی روی آن‌ها تقسیم می‌شود ؛ یعنی :

ولتاژی که در دوسر هر لامپ افت می‌کند.

$$U = \frac{E}{n} = \frac{۱۲V}{۴۰} = ۰/۳V$$

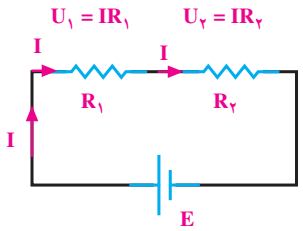
و جریان هر لامپ از قانون اهم بدست می‌آید.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{۰/۳}{۲۰} = ۰/۰۱۵A = ۱۵mA$$

شدّت 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 درحدی نیست که بتوان آن را دید. پس به نظر می‌رسد که لامپ‌ها روشن نیستند.

۶ــ۱۰ــ 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 ۱۷ــ۱۰ را درنظر می‌گیریم.



شکل ۱۷ــ۱۰

ولتاژ دوسر $R_۱$ برابر است با جریان در مقاومت $R_۱$

$$U_۱ = IR_۱ \qquad (۱)$$

جریان کل مدار برابر است با :

$$I = \frac{E}{R_۱ + R_۲} \qquad (۲)$$

رابطه‌ی ۲ را در رابطه‌ی ۱ قرار می‌دهیم :

$$U_۱ = \frac{E}{R_۱ + R_۲} \times R_۱$$

اکنون $U_۱$ را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۳ نوشت :

$$U_1 = E\frac{R_1}{R_1 + R_2} \qquad (۳)$$

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 :

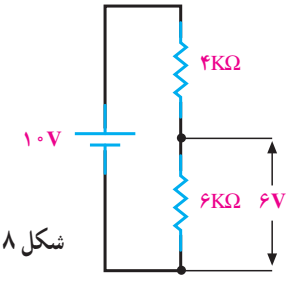
$$U_2 = E\frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad (۴)$$

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

۷ــ۱۰ــ کاربرد سری بستن مقاومت‌ها

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

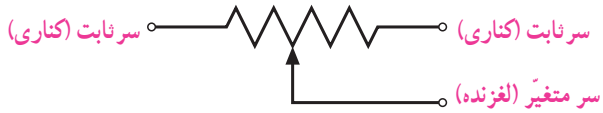
اگر بخواهیم از یک ولتاژ مشخص ولتاژ کم‌تری داشته باشیم، راه عملی آن است که با استفاده از دو مقاومت، افت ولتاژ لازم را تهیه کنیم و مورد استفاده قرار دهیم ؛ مثلاً از ولتاژ ۱۰ولت، ۶ ولت آن مورد نیاز است. برای تأمین این ولتاژ، منبع ۱۰ولتی را با دو مقاومت ۴ و ۶ کیلو اهمی سری می‌کنیم (شکل ۱۸ــ۱۰). سپس از افت ولتاژ روی مقاومت ۶ کیلواهمی می‌توانیم برای منظور خاص استفاده نماییم. البته با قرار دادن یک مصرف‌کننده به دوسر مقاومت ۶ کیلواهم، 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 ۱۸ــ۱۰ــ تقسیم ولتاژ

۸ــ۱۰ــ رئوستا و پتانسیومتر

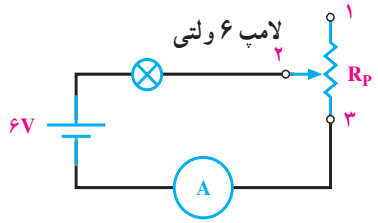
قبلاً برای تقسیم ولتاژ، از مقاومت‌های ثابت استفاده کردیم. درنتیجه، ولتاژهای ثابتی نیز می‌توانستیم تهیه کنیم امّا در عمل بیش‌تر از مقاومت‌های متغیر استفاده می‌شود، که به‌وسیله‌ی این مقاومت‌های متغیر می‌توان ولتاژهای متغیری از حداقل تا حداکثر ولتاژ منبع به‌دست آورد که از جمله‌ی آن‌ها مقاومت‌های متغیر رئوستا و پتانسیومتر را می‌توان نام برد. شکل ۱۹ــ۱۰ نمای الکتریکی یک مقاومت متغیّر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹ــ۱۰ــ نمای الکتریکی مقاومت متغیّر

سر لغزنده یا متغیّر سری است که می‌تواند روی سطح خارجی مقاومت حرکت کند و مقدار مقاومت را نسبت به سرهای ثابت تغییر دهد. اگر از دوسر مقاومت متغیّر (یک سر ثابت و یک سر لغزنده) در مدار استفاده شود، مقاومت متغیّر به‌صورت رئوستا در مدار قرار می‌گیرد. با حرکت سرلغزنده، مقدار مقاومت رئوستا و در نتیجه، مقاومت مدار تغییر می‌کند. با تغییر مقاومت مدار، شدت جریان مدار نیز تغییر می‌کند.

رئوستا برای کنترل شدّت جریان مدار به‌کار می‌رود و در مدار به‌صورت سری بسته می‌شود. شکل ۲۰ــ۱۰ اتصال رئوستا را در مدار نشان می‌دهد.



شکل ۲۰ــ۱۰ــ اتّصال رئوستا در مدار

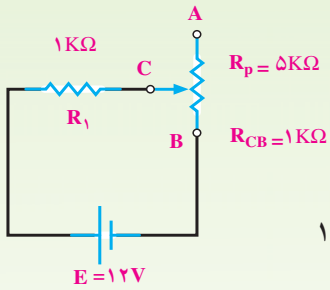
با تغییر سر لغزنده از نقطه‌ی ۱ به ۲ و ۳ مقاومت مدار کاهش می‌یابد. با کاهش مقاومت مدار جریان آن افزایش می‌یابد و روشنایی لامپ بیش‌تر می‌شود. در نقطه‌ی ۳ مقاومت مدار حداقل و شدّت جریان حداکثر مقدار خود را دارد ؛ درنتیجه

روشنایی لامپ نیز حداکثر است. عکس این مطلب نیز صادق است. با حرکت سر لغزنده از نقطه‌ی ۳ به ۲ و ۱ مقاومت مدار افزایش و جریان کاهش می‌یابد. با کاهش شدّت جریان از روشنایی لامپ کاسته می‌شود.

مثال ۷: شدّت جریان مدار شکل ۲۱ــ۱۰ را در حالت‌های زیر به‌دست آورید.

۱ــ سر لغزنده در نقطه‌ی A قرار دارد.

۲ــ سر لغزنده در نقطه‌ی C قرار دارد.



شکل ۲۱ــ۱۰

راه حل:

حالت ۱ $R_T = R_۱ + R_P = ۱kΩ \quad ۵kΩ \quad ۶kΩ$

$$I = \frac{۱۲V}{۶\times ۱۰^{۳}} = ۲mA$$

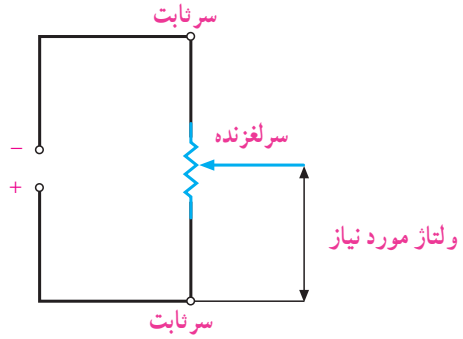
حالت ۲ $R_T = R_۱ + R_{CB} = ۱kΩ \quad ۱kΩ \quad ۲kΩ$

$$I = \frac{۱۲V}{۲\times ۱۰^{۳}} = ۶mA$$

از مثال فوق مشخص می‌شود که مقاومت مدار درحالت ۱ برابر ۶kΩ و شدّت جریان ۲ mA است. در حالت ۲ مقاومت مدار کاهش یافته و به ۲kΩ رسیده است؛ در نتیجه، شدّت جریان افزایش می‌یابد و به ۶ mA می‌رسد. بنابراین، با قرار گرفتن یک رئوستا به‌طور سری در مدار، شدّت جریان کنترل می‌شود.

اگر از هر سه سر مقاومت متغیّر (دوسر ثابت و یک سر لغزنده) در مدار استفاده شود، مقاومت متغیّر به‌صورت پتانسیومتر در مدار قرار می‌گیرد. با حرکت سرلغزنده، مقدار مقاومت آن نسبت به سرهای ثابت تغییر می‌کند. با قراردادن ولتاژی به دوسر ثابت می‌توان از سر لغزنده و یکی از سرهای کناری، ولتاژهای متغیّری را دریافت کرد.

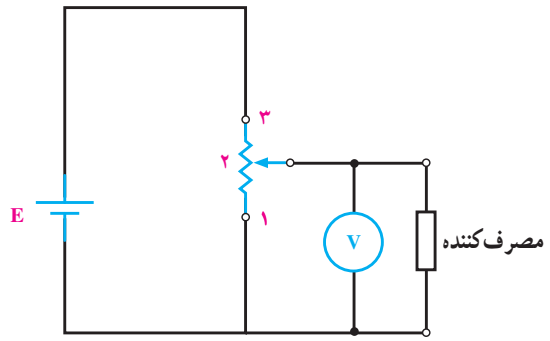
پتانسیومتر را برای دریافت ولتاژی کم‌تر از ولتاژ منبع به‌کار می‌برند. شکل ۲۲ــ۱۰ اتّصال پتانسیومتر را به مدار نشان می‌دهد.



شکل ۲۲ــ۱۰ــ اتّصال 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 می‌کنیم.

پتانسیومتر در مدار به‌صورت موازی بسته می‌شود و کنترل‌کننده‌ی ولتاژ داده شده به‌مصرف‌کننده است.

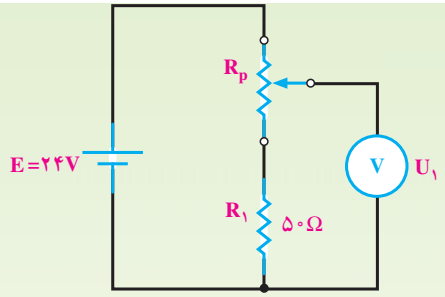


شکل۲۳ــ۱۰ــ دریافت ولتاژ متغیّر

طبق شکل ۲۳ــ۱۰ با تغییر سر لغزنده از نقطه‌ی ۱ به ۲ و ۳ ولت‌متر ولتاژ بیش‌تری را نشان می‌دهد.

متناسب با ولتاژ مورد نیاز مصرف‌کننده، می‌توان سر لغزنده را در جهت مناسب حرکت داد.

مثال ۸: در شکل ۲۴ــ۱۰ برای دریافت ولتاژ از ۶ تا ۲۴ ولت چه پتانسیومتری را در مدار قرار می‌دهید؟



شکل ۲۴ــ۱۰

راه حل:

$$U_۱ = E\frac{R_۱}{R_۱ + R_P}$$

$$U_۱(R_۱ + R_P) = ER_۱ \Rightarrow U_۱R_۱ + U_۱R_P = ER_۱$$

$$U_۱R_P = ER_۱ - U_۱R_۱$$

$$R_P = \frac{R_۱(E - U_۱)}{U_۱}$$

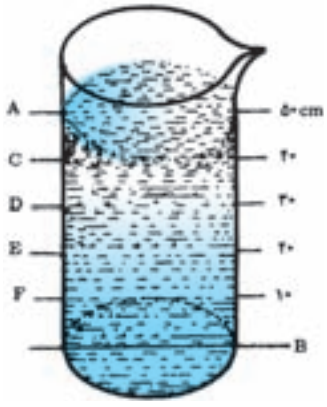
$$R_P = ۵۰ \times \frac{(۲۴-۶)}{۶} = \frac{۵۰\times۱۸}{۶} = ۱۵۰\Omega$$

۹ــ۱۰ــ 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 متغیّر نیستند که به‌صورت رئوستا و پتانسیومتر در مدار قرار گرفته‌اند.

۱۰ــ۱۰ــ نسبی بودن ولتاژ الکتریکی

استوانه‌ی مدرّج پر از آب شکل ۲۵ــ۱۰ را درنظر بگیرید. ارتفاع سطح آب را می‌توان نسبت به هر نقطه‌ای از ستون آب در لوله‌ی مدرّج به‌دست آورد. فرض کنید می‌خواهیم ارتفاع سطح آب را از نقطه‌ی A تا نقطه‌ی E به‌دست 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 درنظر بگیریم و نقاطی را که می‌خواهیم ارتفاع بین آن‌ها مشخص شود به‌صورت اندیس برای ارتفاع (h) بنویسیم، برای به‌دست آوردن فاصله‌ی بین دو نقطه‌ی A تا E چنین عمل می‌کنیم :



ته ظرف (مبنا)

شکل ۲۵ــ۱۰ــ نسبی بودن ارتفاع آب

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

$h_{AB} = ۵۰cm$ ارتفاع آب از نقطه‌ی A تا ته ظرف

$h_{EB} = ۲۰cm$ ارتفاع آب از نقطه‌ی E تا ته ظرف

$$h_{AE} = ۵۰cm - ۲۰cm$$

$h_{AE} = ۳۰cm$ ارتفاع AE

مثلاً ارتفاع نقطه‌ی D تا ته ظرف چه‌قدر است؟

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

$$h_{DB} = ۳۰cm - ۰$$

$$h_{DB} = ۳۰cm$$

برای خلاصه کردن رابطه‌ی تعیین ارتفاع، معمولاً حرف مبنا را نمی‌نویسند امّا در محاسبه، آن را درنظر می‌گیرند ؛ مثلاً h_{AD} برابر است با :

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

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

$h_A = h_{AB} = ۵۰cm$ ارتفاع آب تا نقطه‌ی A

$h_D = h_{DB} = ۳۰cm$ ارتفاع آب تا نقطه‌ی D

$$h_{AD} = ۵۰cm - ۳۰cm$$

$h_{AD} = ۲۰cm$

در مورد تعیین ارتفاع آب در پشت سدها نیز همین روش به‌کار می‌رود ؛ مثلاً وقتی می‌گویند ارتفاع سطح آب تا تاج[1] سد ۵متر است، یعنی تفاوت بین ارتفاع سطح آب تا کف سد و ارتفاع بالاترین نقطه‌ی سد تا کف دریاچه‌ی سد ۵ متر است.

در شکل ۲۶ــ۱۰ ارتفاع آب تا تاج سد به‌خوبی نشان داده شده است.

شکل ۲۶ــ۱۰ــ سدّ کرج

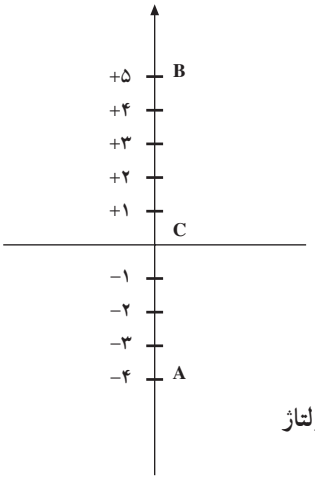
از مطالب گفته شده چنین برمی‌آید که کمیّت ارتفاع نسبی است ؛ یعنی، باید آن را نسبت به یک مبنا سنجید. کمیّت ولتاژ را نیز معمولاً نسبت به یک مبنا می‌سنجند ؛ مثلاً وقتی گفته می‌شود ولتاژ نقطه‌ی A مقداری را داراست، این گفته ناقص است. در واقع، شنونده وقتی مقدار ولتاژ نقطه‌ی A را می‌شنود، منتظر است که گفته شود نسبت به کجا این مقدار را دارد امّا 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 موردنظر بوده است. بنابراین، درحالت کلی همان گونه که ارتفاع آب داخل لوله یا پشت سد را نسبت به ته ظرف یا سطح زمین می‌سنجند، کمیّت ولتاژ را هم نسبت به یک مبنا ــ که می‌تواند در هر نقطه‌ای از مدار انتخاب شود ــ بیان می‌کنند.

مثلاً اگر ولتاژ نقطه‌ی A مطابق شکل ۲۷ــ۱۰ نسبت به‌مبنای C برابر۴ــ ولت و ولتاژ نقطه‌ی B نسبت به همان مبنا (نقطه‌ی C) دارای ولتاژ ۵+ ولت باشد، اختلاف ولتاژ نقطه‌ی A نسبت به نقطه‌ی B ــ که با U_{AB} نمایش داده می‌شود ــ برابر است با $U_{AC} - U_{BC}$. در نتیجه :

ولتاژ A نسبت به C $U_{AC} = -۴V$

ولتاژ B نسبت به C $U_{BC} = +۵V$

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



شکل ۲۷ــ۱۰ــ نسبی بودن ولتاژ

$U_{AB} = -۴V - (+۵V)$

$U_{AB} = -۹V$

هم‌چنین ولتاژ نقطه‌ی B نسبت به A برابر است با :

$U_{BA} = U_B - U_A$

$U_{BA} = +۵V - (-۴V)$

$U_{BA} = +۹V$

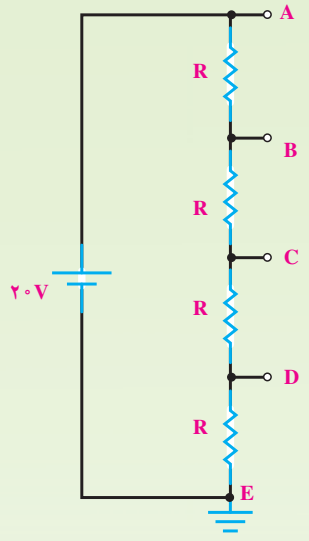
نتیجه : $U_{AB} = -U_{BA}$

یا

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

مثال ۹: در مدار شکل ۲۸ــ۱۰ با تساوی مقاومت‌ها اختلاف ولتاژ نقاط A ، B ، C و D را نسبت به مبنای E به‌دست آورید. به کمک اختلاف ولتاژهای به‌دست آمده مقادیر U_{AB} و U_{AC} و U_{AD} را نیز به‌دست آورید.

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



شکل ۲۸ــ۱۰ــ 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 :

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

$$U_{AE} = +۲۰V - ۰ = +۲۰V$$

با توجه به این که مقاومت‌های موجود در مدار با یک‌دیگر برابرند و جریان آن‌ها نیز برابر است، پس اختلاف پتانسیل دوسر آن‌ها نیز باهم برابر است و می‌توان گفت ولتاژ منبع به‌طور مساوی بین آن‌ها تقسیم می‌شود و ولتاژ دوسر هر مقاومت برابر $U_R = \frac{۲۰V}{۴} = ۵V$ خواهد شد.

اکنون می‌توان پتانسیل نقطه‌ی C،D وB را نسبت به نقطه‌ی E ــ که نقطه‌ی مبناست ــ به‌صورت زیر به‌دست آورد.

$$U_{BE} = U_B - U_E = ۱۵ - ۰ = ۱۵V$$

$$U_{CE} = U_C - U_E = ۱۰ - ۰ = ۱۰V$$

$$U_{DE} = U_D - U_E = ۵ - ۰ = +۵V$$

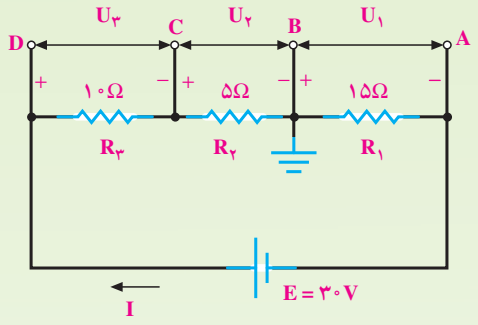
اختلاف پتانسیل نقاط دیگر را نیز می‌توان از روابط زیر به‌دست آورد.

$$U_{AD} = U_A - U_D = +۲۰ - ۵ = +۱۵V$$

$$U_{AC} = U_A - U_C = ۲۰ - ۱۰ = +۱۰V$$

$$U_{AB} = U_A - U_B = ۲۰ - ۱۵ = +۵V$$

مثال ۱۰: در مدار شکل ۲۹ــ۱۰ پتانسیل نقاط A ، C و D را نسبت به نقطه‌ی اتّصال مشترک (B) به‌دست آورید.



شکل ۲۹ــ۱۰

راه حل: مقاومت معادل برابر است با :

$$R_T = ۱۰ + ۵ + ۱۵ = ۳۰\Omega$$

شدّت جریان کل با استفاده از قانون اهم :

$$I = \frac{E}{R_T} = \frac{۳۰}{۳۰} = ۱A$$

افت ولتاژ روی $R_۱$ $U_۱ = IR_۱ = (۱)(۱۵) = ۱۵V$

افت ولتاژ روی $R_۲$ $U_۲ = IR_۲ = (۱)(۵) = ۵V$

افت ولتاژ روی $R_۳$ $U_۳ = IR_۳ = (۱)(۱۰) = ۱۰V$

با توجه به جهت جریان در شکل داریم : $U_۱ = U_B - U_A = U_{BA} = ۱۵V$ و چون $U_۱$ مثبت است، نتیجه می‌گیریم که $U_B > U_A$ است. از طرف دیگر، چون نقطه‌ی B مبناست، پس $U_B = ۰$ می‌باشد. حال اگر مقادیر U_B و $U_۱$ را در رابطه‌ی بالا قرار دهیم، خواهیم داشت $۱۵ = ۰ - U_A$ یا به‌عبارت دیگر : $U_A = -۱۵V$. منفی شدن U_A بدین معناست که پتانسیل نقطه‌ی A به اندازه‌ی۱۵ ولت از پتانسیل نقطه‌ی مبنا ــ یعنی B ــ کم‌تر است.

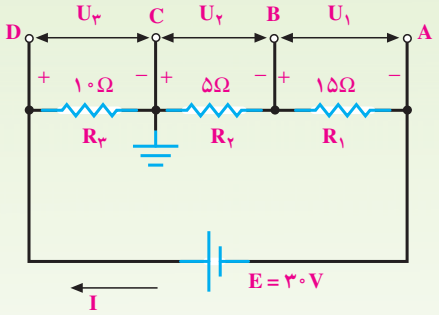
$$U_{AB} = U_A - U_B = -۱۵ - ۰ = -۱۵V$$

$$U_{CB} = U_C - U_B = +۵ - ۰ = +۵V$$

$$U_D = U_۳ + U_۲ = ۱۰ + ۵ = ۱۵V$$

$$U_{DB} = U_D - U_B = +۱۵ - ۰ = +۱۵V$$

مثال ۱۱: با تغییر نقطه‌ی مبنا از نقطه‌ی B به نقطه‌ی C ولتاژ نقاط A ، B و D نسبت به نقطه‌ی C در شکل ۱۰ـ۳۰ کدام است؟



شکل ۱۰ـ۳۰

راه حل: $U_{AC} = -U_۱ - U_۲ = -۱۵ - ۵ = -۲۰V$

$U_{BC} = -U_۲ = -۵V$

$U_{DC} = U_۳ = ۱۰V$

۱۰ـ۱۱ـ قانون ولتاژهای کیرشهف (KVL) [۱]

رابطه‌ی بین ولتاژهای جزء (افت ولتاژها) و ولتاژ کل را در مدار سری متذکر شدیم. اکنون تقسیم ولتاژ در مدار سری را به‌گونه‌ای دیگر بیان می‌کنیم.

هر مدار سری شامل تعدادی مصرف‌کننده (مقاومت) و یک منبع تغذیه است که به‌صورت یک حلقه [۲] باهم سری شده‌اند.

قانون ولتاژهای کیرشهف: در هر حلقه جمع جبری افت ولتاژهای دوسر مقاومت‌ها و ولتاژ منبع تغذیه برابر صفر است؛ یعنی: $E - \sum^{۳} U = ۰$

در هر مدار بسته، ولتاژ اعمال شده به مدار برابر مجموع افت ولتاژهای موجود در مدار حلقه است $(E = \sum U)$

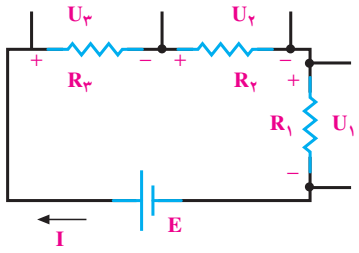
یعنی، با توجه به شکل ۱۰ـ۳۱ می‌توان نوشت:

$E - \sum U = ۰$

$E - (U_۱ + U_۲ + U_۳) = ۰$

یا

$E = U_۱ + U_۲ + U_۳$



شکل ۱۰ـ۳۱

مثال ۱۲: قانون ولتاژهای کیرشهف را در مدار شکل ۱۰ـ۳۲ بررسی کنید.

راه حل: جریان کل در مدار زیر (حلقه‌ی بسته) برابر است با: $I = \frac{E}{R_T}$

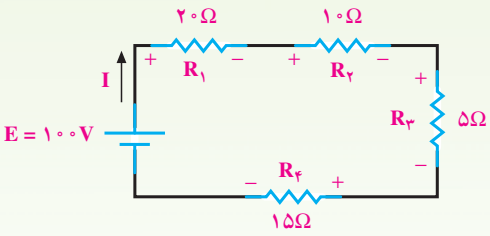
مقاومت معادل برابر است با:

$R_T = R_۱ + R_۲ + R_۳ + R_۴$

$R_T = ۲۰ + ۱۰ + ۵ + ۱۵$

$R_T = ۵۰\Omega$

$I = \frac{۱۰۰}{۵۰} = ۲A$



شکل ۱۰ـ۳۲

افت ولتاژ دوسر $R_۱$ با استفاده از قانون اهم:

$U_{R_۱} = (۲)(۲۰) = ۴۰V$

۱ـ K.V. L = Kirchhoff's Voltage Law

۲ـ 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.

۳ـ Σ یعنی جمع جبری، پس ΣU به معنای جمع جبری ولتاژهاست.

ولتاژهای دوسر $R_۲$ و $R_۳$ و $R_۴$ نیز با همین روش محاسبه می‌شود :

$$U_{R_۲} = (۲)(۱۰) = ۲۰V$$

$$U_{R_۳} = (۲)(۵) = ۱۰V$$

$$U_{R_۴} = (۲)(۱۵) = ۳۰V$$

قانون ولتاژهای کیرشهف در این‌باره می‌گوید که $\sum U = E$ است ؛ یعنی :

$$E = U_{R_۱} + U_{R_۲} + U_{R_۳} + U_{R_۴}$$

$$۱۰۰ = ۴۰ + ۲۰ + ۱۰ + ۳۰$$

$$۱۰۰ = ۱۰۰$$

یا

$$E - U_{R_۱} - U_{R_۲} - U_{R_۳} - U_{R_۴} = ۰$$

$$۱۰۰ - ۴۰ - ۲۰ - ۱۰ - ۳۰ = ۰$$

$$۱۰۰ - ۱۰۰ = ۰$$

۱۲ــ۱۰ــ 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 :

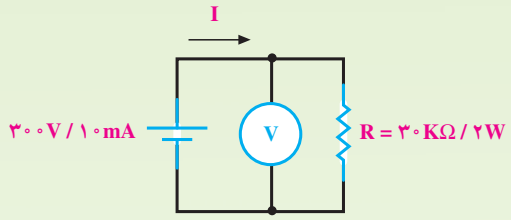
$$P_t = P_۱ + P_۲ + \cdots + P_n$$

برای محاسبه‌ی توان تک‌تک مقاومت‌ها (توان‌های جزء) باید از یکی از روابط توان $(P = RI^۲ = \frac{V^۲}{R} = VI)$ 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.

$$P_T = U_T.I_T = R_T.I_T^۲ = \frac{U_T^۲}{R_T}$$

مثال ۱۳: توانی که یک منبع تغذیه با مشخصات ۳۰۰V/۱۰mA می‌تواند تولید کند، چه‌قدر است؟ اگر این منبع را مطابق شکل ۳۳ــ۱۰ به یک مقاومت ۳۰kΩ/۲W متصل کنیم، چه اتفاقی می‌افتد؟



شکل ۳۳ــ۱۰

راه حل:

$$P_t = E.I$$

$$P_t = ۳۰۰ \times ۱۰ \times ۱۰^{-۳}$$

$$P_t = ۳W$$ توانی که منبع می‌تواند تولید کند

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

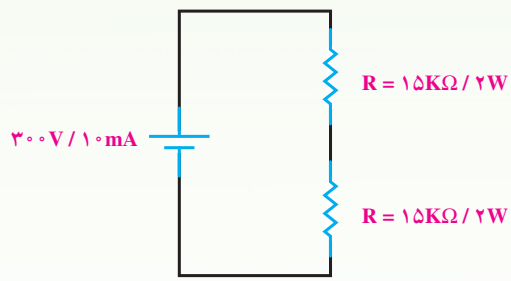
$$I = \frac{۳۰۰V}{۳۰K\Omega} = ۱۰mA$$

$$P_R = U_R.I = ۳۰۰ \times ۱۰ \times ۱۰^{-۳}$$

$$P_R = ۳W$$ توان مصرف شده در مقاومت

چون توان مجاز مقاومت بیش از ۲ وات نیست و اکنون ۳ وات مصرف می‌کند، مقاومت گرم می‌شود و می‌سوزد.

اگر دو مقاومت ۱۵kΩ/۲W را با همان منبع تغذیه سری کنیم (شکل ۳۴ ــ ۱۰)، توان مصرفی هر مقاومت ۱/۵ وات می‌شود که از توان مجاز آن کم‌تر است. در نتیجه، برای مقاومت‌ها مسئله‌ای پیش نمی‌آید.



شکل ۳۴ــ۱۰

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

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

$$P_{R1}=U_{R1}.I$$

$$P_{R_1}=150\times10\times10^{-3}=1/5W$$

$$P_{R2}=U_{R2}.I$$

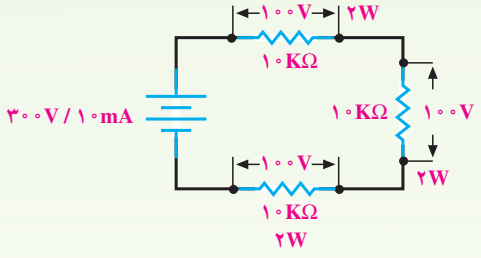
$$P_{R_2}=150\times10\times10^{-3}=1/5W$$

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 ۱۰kΩ/۲W را به‌صورت سری به همان منبع تغذیه اتصال می‌دهیم. توان مصرفی هر مقاومت یک وات می‌شود که از توان مجاز آن بسیار کم‌تر است (شکل۳۵ــ۱۰) در این‌جا نیز توان منبع، با مجموع توان‌های جزء برابر خواهد بود.



شکل ۳۵ــ۱۰

$$P_t=E.I$$

توان کل $P_t=300\times10\times10^{-3}=3W$

$$P_1=U_1I$$

توان مصرفی R_1 $P_1=100\times10\times10^{-3}=1W$

$$P_2=U_2I$$

توان مصرفی R_2 $P_2=100\times10\times10^{-3}=1W$

$$P_3=U_3I$$

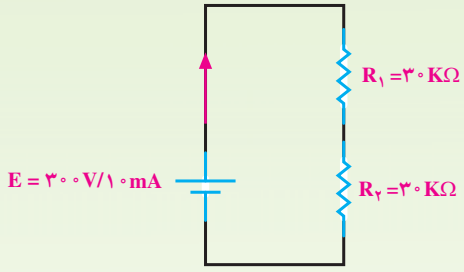
توان مصرفی R_3 $P_3=100\times10\times10^{-3}=1W$

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

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

مثال ۱۴: دو مقاومت ۳۰kΩ/۲W را به صورت سری به منبع تغذیه‌ی ۳۰۰V/۱۰mA 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 ۳۶ــ۱۰

راه حل:

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

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

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

$$P_{R_1}=P_{R_2}=U_{R_1}.I=U_{R_2}.I$$

توان مصرفی هر مقاومت $=150V\times5mA=750mW$

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

توان تولیدشده توسط منبع $=1500mW=1/5W$

۱۳ــ۱۰ــ مشخصات مدار سری

۱ــ شدّت جریان در تمام نقاط مدار یکسان و برابر $\frac{U_T}{R_T}$ است.

$$I_T = I_1 = I_2 = \cdots = I_n$$

۲ــ مقاومت کل (معادل) از جمع مقاومت‌های جزء مدار حاصل می‌شود و برابر است با

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

۳ــ ولتاژ کل از جمع افت ولتاژهای جزء مدار به دست می‌آید.

$$E = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$$

۴ــ افت ولتاژ دوسر مقاومت‌های جزء با مقدار مقاومت‌های مدار نسبت مستقیم دارد.

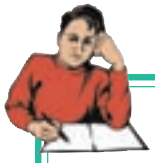
$$U_1 = E\frac{R_1}{R_T} \ , \ U_2 = E\frac{R_2}{R_T} \ , \ U_n = E\frac{R_n}{R_T}$$

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

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

۶ــ مقدار مقاومت کل (معادل) از بزرگترین مقاومت مدار نیز بزرگ‌تر است.

۷ــ قطع (باز) شدن مدار در یک نقطه باعث قطع جریان کل مدار می‌شود.



پرسش

۱ــ یک مدار سری مقاومتی چگونه تشکیل می‌شود؟

۲ــ خصوصیات مدار سری را توضیح دهید.

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

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

۵ــ نسبی بودن پتانسیل را توضیح دهید.

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

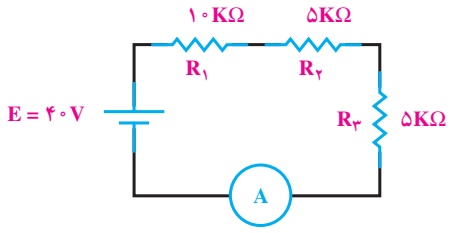
۷ــ توان مصرفی و توان مجاز را تعریف کنید.

۸ــ 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).

تمرین

۱ــ در مدار شکل ۱۰ــ۳۷ مقدار مقاومت کل و جریان مدار چه‌قدر است؟

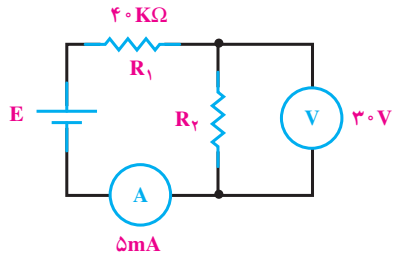
(جواب : ۲mA – ۲۰kΩ)



شکل ۱۰ــ۳۷

۲ــ در مدار شکل ۱۰ــ۳۸ مقدار $R_۲$ و E چه‌قدر است؟

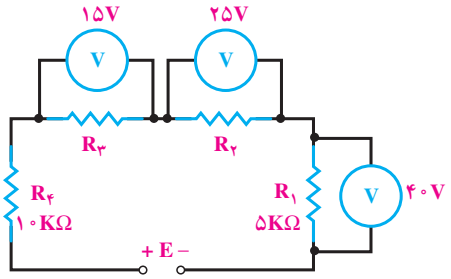
(جواب : ۶kΩ و ۲۳۰V)



شکل ۱۰ــ۳۸

۳ــ در مدار شکل ۱۰ــ۳۹ مقدار E چه‌قدر است؟

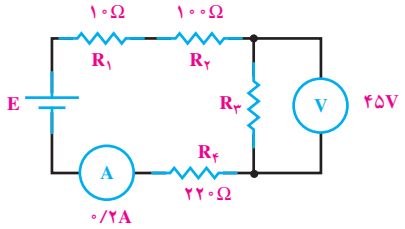
(جواب : ۱۶۰ V)



شکل ۱۰ــ۳۹

۴ــ مقاومت معادل مدار شکل ۱۰ــ۴۰ چه‌قدر است؟

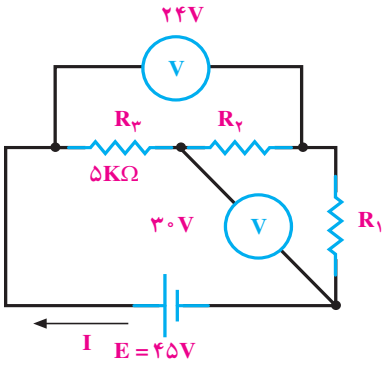
(جواب : ۵۵۵Ω)



شکل ۱۰ــ۴۰

۵ ــ در مـدار شـکـل ۴۱ــ۱۰ مطلوبست محاسبه شدّت جریان کل و مقدار مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ چه‌قدر است؟

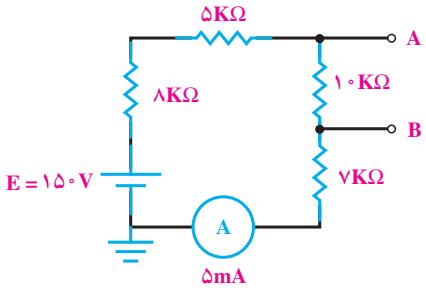
(جواب : ۳ mA، ۷Ω و ۳Ω)



شکل ۴۱ــ۱۰

۶ــ در مدار شکل ۴۲ــ۱۰ ولتاژ نقطه‌ی A و B نسبت به زمین چه‌قدر است؟ ولتاژ U_{BA} را نیز محاسبه کنید.

(جواب : ۸۵ + V ، ۳۵ + ، ۵۰ −)

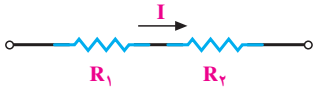


شکل ۴۲ــ۱۰

۷ ــ در مدارهای شکل ۴۳ــ۱۰ توان مصرفی کل و $R_۴$ را به‌دست آورید. در صورتی که توان مجاز مقاومت‌ها در شکل الف و ب ۰/۵ W باشد، آیا مقاومت‌ها خواهند سوخت؟

(جواب الف ــ $\frac{۱}{۲}$W و ۲Ω)

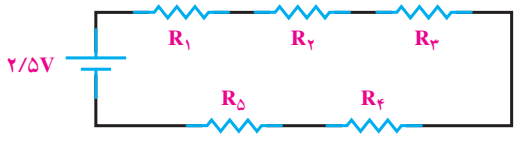
(جواب ب ــ ۱/۲۵ W و ۵Ω)



$R_۱ = R_۲ = ۱\,\Omega$

$I = \frac{۱}{۲}A$

الف)



$R_۱ = R_۲ = R_۳ = R_۴ = R_۵ = ۱\,\Omega$

ب)

شکل ۴۳ــ۱۰

فصل یازدهم

اتصال مقاومت‌ها به طور موازی

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ اتّصال موازی مقاومت‌ها را تعریف کند.

۲ــ مقاومت معادل مدار موازی را تعریف کند.

۳ــ مقاومت معادل چند مقاومت موازی را محاسبه کند.

۴ــ توزیع جریان را در مدار موازی شرح دهد.

۵ ــ قانون جریان‌های کیرشهف را توضیح دهد.

۶ــ توان را در مدار موازی شرح دهد و آن‌را محاسبه کند.

۷ــ مشخّصات و قوانین مدارهای موازی را نام ببرد.

۸ ــ جریان‌ها را در مدار موازی محاسبه کند.

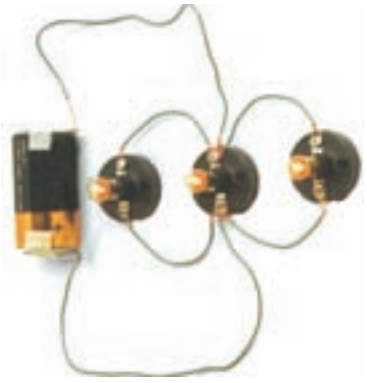
۹ــ مقاومت معادل را در مدار ترکیبی محاسبه کند.

۱۰ــ جریان‌ها و ولتاژها را در مدار ترکیبی محاسبه کند.

۱ــ۱۱ــ اتّصال مقاومت‌ها به‌طور موازی

اگر بخواهند چند مصرف‌کننده با ولتاژ مساوی را هم‌زمان به یک منبع ولتاژ اتّصال دهند، آن‌ها را به‌صورت موازی به دو سر منبع ولتاژ اتّصال می‌دهند.

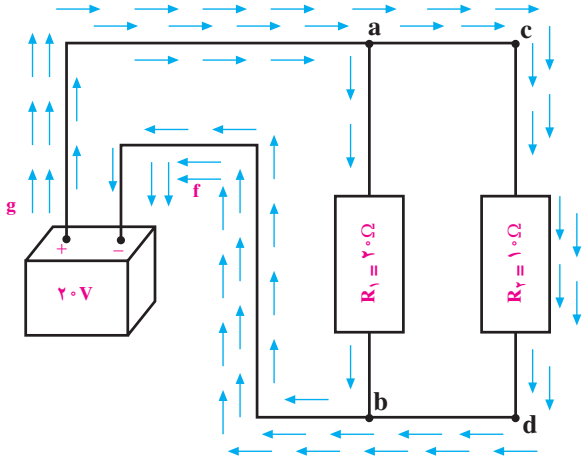
اتّصال موازی بدین صورت است که یک طرف همه‌ی مصرف‌کننده‌ها به یک قطب منبع و طرف دیگر همه‌ی آن‌ها به قطب دیگر منبع وصل می‌شود(شکل ۱ــ۱۱).



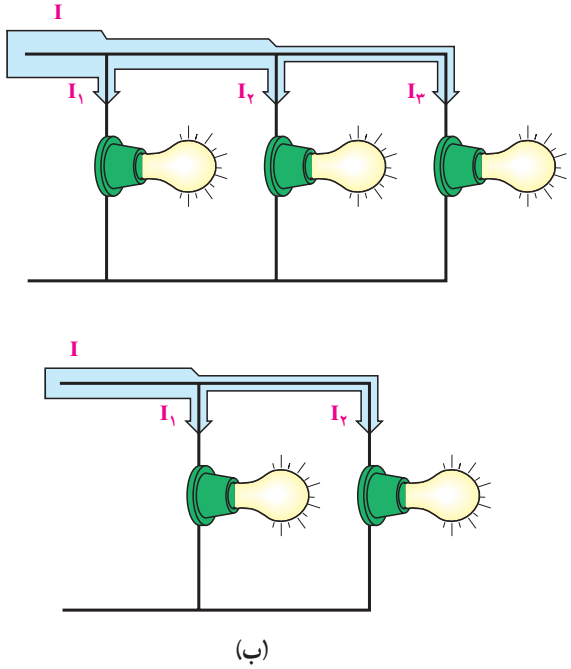
شکل ۱ــ۱۱ــ اتّصال لامپ‌ها به باتری به‌طور موازی

۲ــ۱۱ــ ولتاژ در مدار موازی

ولتاژ دو سر همه‌ی مصرف‌کننده‌ها در اتّصال موازی، یکسان و برابر ولتاژ منبع تغذیه است ولی درصورت متفاوت بودن مقاومت آن‌ها جریان مصرف‌کننده‌ها متفاوت‌اند. در شکل ۲ــ۱۱ــالف این موضوع نشان داده شده است.



(الف)

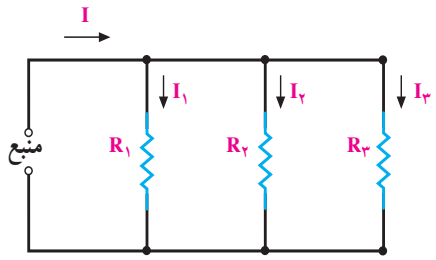


(ب)

شکل ۲ــ۱۱ــ مسیرهای جریان و اندازه‌ی آن‌ها

۳ــ۱۱ــ 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 ۱ــ۱۱چهار مسیر موازی را مشاهده می‌کنید که شمای فنی آن‌ها در شکل ۳ــ۱۱ رسم شده است.



شکل ۳ــ۱۱

در مدارهای شکل ۳ــ۱۱، شدّت جریان کل، با مجموع شدّت جریان‌های شاخه‌های موازی برابر است ؛ در صورتی که ولتاژ دو سر هر شاخه با شاخه‌های دیگر و دو سر منبع برابر می‌باشد. از این‌رو با استفاده از روابط قانون اهم، شدّت جریان هر شاخه و شدت جریان کل را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد.

شدّت جریان شاخه‌ی nام $I_n = \frac{E}{R_n}$

شدّت جریان کل مدار $I_t = I_۱ + I_۲ + \cdots I_n$

درصورت مساوی بودن مقاومت‌های شاخه‌های مدار، از هر شاخه شدّت جریان مساوی با دیگر شاخه‌ها می‌گذرد امّا اگر مقدار مقاومت‌های هرشاخه متفاوت باشد، هر شاخه‌ای که مقاومت کم‌تری دارد، شدّت 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.

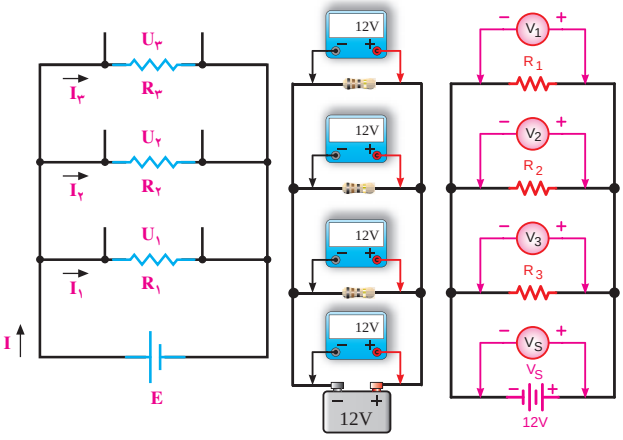
$$I^{\uparrow} = \frac{E}{R_{\downarrow}} \quad \text{یا} \quad I_{\downarrow} = \frac{E}{R^{\uparrow}}$$

۴ــ۱۱ــ مقاومت در مدار موازی

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

شاخه‌های مدار تعداد مسیرهای جریان زیادتر می‌شود و شدّت جریان کل افزایش می‌یابد. افزایش شدّت جریان بدین معناست که مقاومت معادل، کاهش یافته است. در شکل ۳ــ۱۱ جریان کل و جریان شاخه‌ها مشخص شده است.

مدار شکل ۴ــ۱۱ را با سه مقاومت R_1 ، R_2 و R_3 درنظر می‌گیریم.



شکل ۴ــ۱۱

در مدار موازی ولتاژ منبع با ولتاژ دو سر شاخه‌ها برابر است و جریان کل از مجموع جریان‌های شاخه‌ها به‌دست می‌آید. روابط ۱ و ۲ این معنی را نشان می‌دهد.

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

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

طبق قانون اهم می‌توان نوشت :

$$I = \frac{E}{R_t^*} \ , \ I_1 = \frac{E}{R_1} \ , \ I_2 = \frac{E}{R_2} \ , \ I_3 = \frac{E}{R_3}$$

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، به رابطه‌ی ۳ می‌رسیم.

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

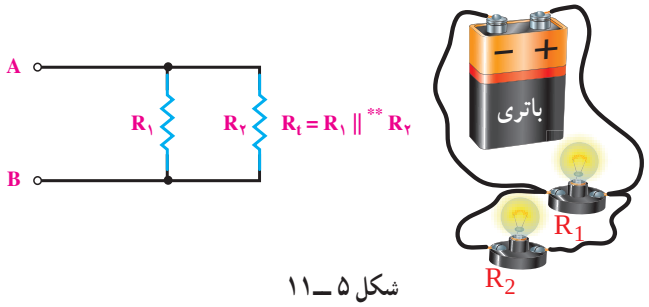
$$\boxed{\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \qquad (3)$$

حالات خاص

I ــ رابطه‌ی مقاومت معادل بین دو مقاومت موازی شکل ۵ــ۱۱ 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 ۵ــ۱۱

II ــ در صورتی که مقاومت‌های موازی شده با هم مساوی باشند، مقاومت معادل چنین به‌دست می‌آید :

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

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R}(\overbrace{1+1+\cdots+1}^{\text{تا } n})$$

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

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

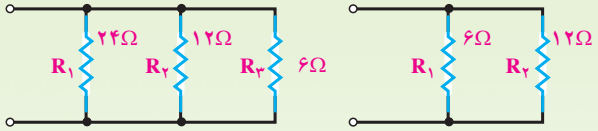
n تعداد مقاومت‌های موازی شده و R یکی از آن‌هاست.

---

* ــ 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.

** ــ علامت دو خط موازی (‖) را برای اختصار در به‌کار بردن کلمه‌ی موازی به‌کار می‌برند ؛ مثلاً $R_1 \| R_2$ یعنی R_1 موازی R_2 است.

مثال ۱: مقاومت معادل مدارهای شکل ۶ــ۱۱ را به‌دست آورید.



(الف) (ب)

شکل ۶ــ۱۱

مقاومت معادل مدار الف برابر است با

$$R_t = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{۶ \times ۱۲}{۶ + ۱۲} = \frac{۷۲}{۱۸} = ۴\Omega$$

هم‌چنین، در مدار ب مقاومت معادل برابر است با

$$\frac{۱}{R_t} = \frac{۱}{R_1} + \frac{۱}{R_2} + \frac{۱}{R_3} = \frac{۱}{۲۴} + \frac{۱}{۱۲} + \frac{۱}{۶}$$

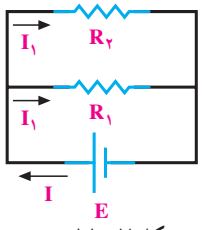
$$\frac{۱}{R_t} = \frac{۱+۲+۴}{۲۴} = \frac{۷}{۲۴} \quad , \quad R_t = \frac{۲۴}{۷} = ۳/۴۳\Omega$$

III ــ با توجه به مدار شکل ۷ــ۱۱ و به‌کارگیری قانون اهم برای هر شاخه، به این نتیجه می‌رسیم :

$E = I_1 R_1$ رابطه‌ی (۱)

$E = I_2 R_2$ رابطه‌ی (۲)

$E = I R_t$ رابطه‌ی (۳)



شکل ۷ــ۱۱

مقاومت معادل مدار فوق برابر است با

$$R_t = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad (۴)$$

از رابطه‌ی ۱ جریان I_1 را به‌دست می‌آوریم.

$$I_1 = \frac{E}{R_1} \qquad (۵)$$

رابطه‌ی ۴ را در رابطه‌ی ۳ قرار می‌دهیم :

$$E = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

حال اگر مقدار E را در رابطه‌ی ۵ جایگزین کنیم، خواهیم داشت :

$$I_1 = \frac{I \dfrac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R_1}$$

$$I_1 = I \frac{\cancel{R_1} R_2}{\cancel{R_1}(R_1 + R_2)} \Rightarrow \boxed{I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

نتیجه: جریان کل در شاخه‌های موازی، به‌نسبت عکسِ مقاومت‌های شاخه‌ها تقسیم می‌شود.

I_2 نیز به‌ترتیب زیر به‌دست می‌آید.

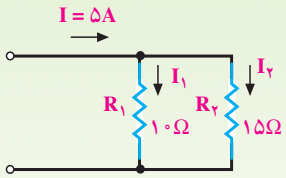
$$I_2 = \frac{E}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{I \dfrac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R_2} = I \frac{R_1 \cancel{R_2}}{\cancel{R_2}(R_1 + R_2)}$$

با حذف R_2 از صورت و مخرج داریم :

$$\boxed{I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

مثال ۲: شدّت جریان هر شاخه از مدار شکل ۸ــ۱۱ را به‌دست آورید.



شکل ۸ــ۱۱

رابطه‌ی جریان شاخه‌ی R_1 : $I_1 = I \dfrac{R_2}{R_1 + R_2}$

$$I_1 = \frac{۵ \times ۱۵}{۱۵ + ۱۰}$$

جریان شاخه‌ی R_1 :

$$I_1 = \frac{۷۵}{۲۵} = ۳A$$

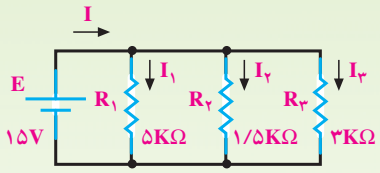
جریان شاخه‌ی R_2 :

$$I_2 = I - I_1 = ۵ - ۳ = ۲A$$

یا

$$I_2 = I \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = ۵\frac{۱۰}{۲۵} = ۲A$$

مثال ۳: در مدار شکل ۹ــ۱۱ شدّت جریان هر شاخه و شدّت جریان کل را به‌دست آورید.



شکل ۹ــ۱۱

$$I_1 = \frac{E}{R_1} = \frac{۱۵V}{۵\times۱۰^{+۳}} = ۳mA$$

$$I_2 = \frac{E}{R_2} = \frac{۱۵V}{۱/۵\times۱۰^{۳}} = ۱۰mA$$

$$I_3 = \frac{E}{R_3} = \frac{۱۵V}{۳\times۱۰^{۳}} = ۵mA$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

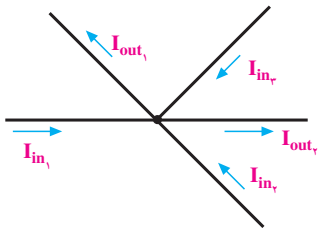
$$I = ۳ + ۱۰ + ۵ \qquad I = ۱۸mA$$

۵ــ۱۱ــ قانون جریان کیرشهف[1]

در هر شبکه[2] 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.

در شکل ۱۰ــ۱۱ 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 ۱۰ــ۱۱ــ جریان‌های وارد شونده و خارج شونده از یک گره

با توجّه به قانون جریان کیرشهف، برای شکل ۱۰ــ۱۱ رابطه‌ی زیر را می‌توان نوشت :

$$I_{in_1} + I_{in_2} + I_{in_3} = I_{out_1} + I_{out_2}$$

قانون گفته شده را این‌گونه نیز می‌توان تعریف کرد : جمع جبری جریان‌ها در یک گره برابر صفر است ؛ یعنی : $\Sigma I = ۰$

$$I_{in_1} + I_{in_2} + I_{in_3} - I_{out_1} - I_{out_2} = ۰$$

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.

$$-I_{in_1} - I_{in_2} - I_{in_3} + I_{out_1} + I_{out_2} = ۰$$

رابطه‌ی کلی جریان کیرشهف :

$$\Sigma I_{in} = \Sigma I_{out}$$

یا

$$\Sigma I = ۰$$

مثال ۴: درمدار شکل ۱۱ــ۱۱ :

۱ــ تعیین تعداد نقطه‌ی گره،

۲ــ تعیین تعداد شاخه،

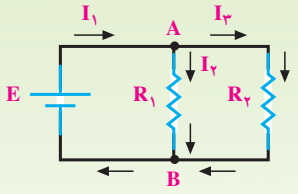
۳ــ رابطه‌ی جریان در گره‌های A و B را تعیین کنید.

راه حل:

۱ــ دو گره A و B

۱ــ Kirchhoff's Current law

۲ــ شبکه شامل مجموعه‌ای از مقاومت‌های سری، موازی یا ترکیبی، همراه با منابع تغذیه است.



شکل ۱۱ــ۱۱

۲ــ سه شاخه یعنی فاصله‌ی بین دو گره A و B از سه مسیر یعنی مسیر منبع، مسیر R_1 و مسیر R_2 تشکیل شده است.

۳ــ در گره A $\quad \sum I = 0 \Rightarrow I_1 - I_2 - I_3 = 0$

در گره B $\quad \sum I = 0 \Rightarrow I_2 + I_3 - I_1 = 0$

۶ــ۱۱ــ توان مصرفی در مدار موازی

پیش از این با توان مجاز و توان مصرفی یک مقاومت آشنا شده‌اید. اگر چند مقاومت، موازی با منبع بسته شوند توان تولید شده توسط منبع باجمع توان‌های مصرف شده در مقاومت‌ها برابر است. چرا؟

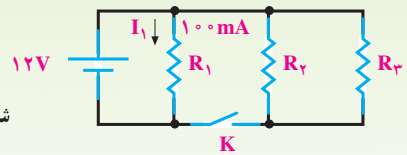
با استفاده از روابط محاسبه‌ی توان ــ که قبلاً ذکر شده است ــ می‌توان مقدار توان را در مدارهای موازی به‌دست آورد. این روابط عبارت‌اند از :

$$P = U.I \ , \ P = RI^2 \ , \ P = \frac{U^2}{R}$$

مثال ۵: توان مصرفی کل شبکه در شکل ۱۲ــ۱۱ در دو حالت الف و ب چه‌قدر است؟ در صورتی که $R_1 = R_2 = R_3$ باشد،

الف : کلید K باز است.

ب : کلید K بسته است.



شکل ۱۲ــ۱۱

راه حل :

الف) $P_{R1} = U.I_1$

توان مصرفی R_1 $\quad P_{R1} = 12V \times 100 \times 10^{-3} = 1/2(W)$

$P_t = E.I$

توان کل $\quad P_t = 12V \times 100 \times 10^{-3} = 1/2(W)$

در حالت کلید باز، توانی که منبع تولید می‌کند برابر با توانی است که مقاومت R_1 مصرف می‌کند.

ب) با بستن کلید، جریان کل افزایش می‌یابد (سه‌برابر می‌شود. چرا؟) و از مقاومت معادل کاسته می‌شود ($\frac{1}{3}$ می‌شود. چرا؟). بنابراین، جریان منبع برابر است با

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_t = 100 + 100 + 100 = 3 \times 100 = 300mA$$

$$P_t = I_t.U = 300 \times 10^{-3} \times 12 = 3/6W$$

توان مصرفی هر مقاومت برابر است با

$$P_1 = U.I_1 = 12V \times 100 \times 10^{-3} = 1/2W$$

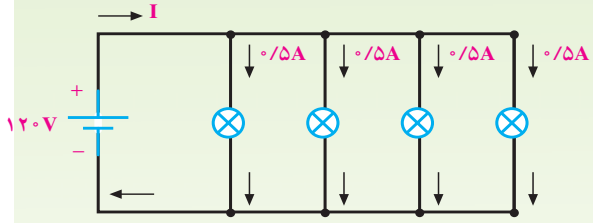
$$P_2 = U.I_2 = 12V \times 100 \times 10^{-3} = 1/2W$$

$$P_3 = U.I_3 = 12V \times 100 \times 10^{-3} = 1/2W$$

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 = 1/2 + 1/2 + 1/2 = 3/6W$$

نتیجه: توان تولید شده توسط منبع، با مجموع توان‌های مصرفی شاخه‌های موازی برابر است.

مثال ۶: برای تغذیه‌ی لامپ‌های مشابه شکل ۱۳ــ۱۱ که به‌طور موازی بسته شده‌اند، چه توانی از منبع به لامپ‌ها منتقل می‌شود؟



شکل ۱۳ــ۱۱

راه حل:

$$P_1 = U.I_1 = 120 \times 0/5 = 60(W)$$

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 60(W)$$

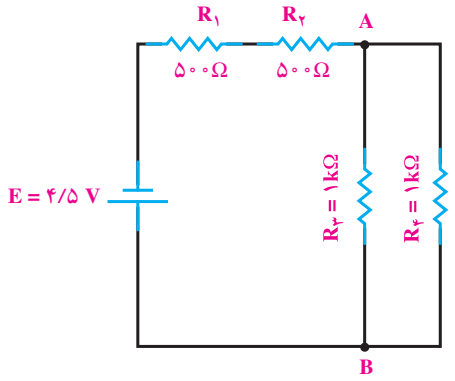
$$P_t = 4 \times 60W = 240(W)$$

یا $\quad I_t = 4 \times 0/5 = 2A$

$$P_t = U.I_t = 120 \times 2 = 240(W)$$

۷ــ۱۱ــ مدارهای ترکیبی (سری ــ موازی)

مدار سری ــ موازی به مداری گفته می‌شود که در آن ترکیبی از مقاومت‌های سری و موازی وجود داشته باشد. در شکل ۱۴ــ۱۱شمای فنی مدار سری ــ موازی اهمی را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۴ــ۱۱ــ مدار مختلط (سری ــ موازی)

مدارهای سری ــ موازی از قوانین مربوط به مدار سری و موازی تبعیّت می‌کنند. مثلاً در شکل ۱۴ــ۱۱ مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ به‌طور سری و مقاومت‌های $R_۳$ و $R_۴$ به طور موازی بسته شده‌اند.

مقاومت معادل قسمت سری (R_x) برابر است با :

$$R_x = R_۱ + R_۲$$

$$R_x = ۵۰۰ + ۵۰۰ = ۱۰۰۰\Omega \quad 1k\Omega$$

مقاومت معادل قسمت موازی (R_y) برابر است با

$$R_y = R_۳ \| R_۴$$

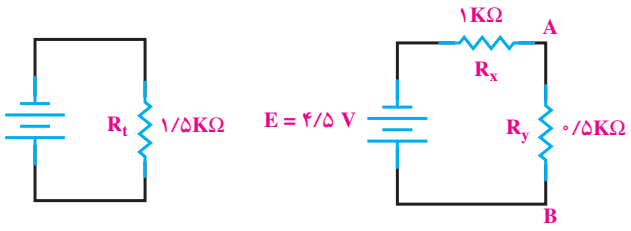
$$R_y = \frac{۱۰۰۰}{۲} = ۵۰۰\Omega \quad ۰/۵k\Omega$$

مقاومت R_x ، $(R_۱ + R_۲)$ و R_y ، $(R_۳ \| R_۴)$ با هم سری هستند و معادل آن دو ــ یعنی R_t ــ برابر است با

$$R_t = R_x + R_y$$

$$R_t = ۱ + ۰/۵ = ۱/۵k\Omega$$

مدارهایی که برای مراحل گفته شده می‌توان رسم کرد، در شکل‌های ۱۵ــ۱۱ــ الف و ۱۵ــ۱۱ــ ب آمده است.



(ب) (الف)

شکل ۱۵ــ۱۱ــ مدار معادل شکل ۱۴ــ۱۱

جریان کل از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{۴/۵V}{۱/۵k\Omega} = ۳mA$$

در شکل ۱۵ــ۱۱ــ الف شدّت جریان کل از $R_۱$ و $R_۲$ ، (R_x) عبور می‌کند. با داشتن جریان عبوری از R_x می‌توان افت ولتاژ دو سر آن را حساب کرد.

$$U_{Rx} = I.R_x$$

$$U_{Rx} = ۳mA \times ۱k\Omega \quad ۳V$$

طبق قانون ولتاژ کیرشهف، ولتاژ دو سر بخش موازی (R_y) یعنی U_{AB} برابر است با

$$U_{AB} = E - U_{Rx}$$

$$U_{AB} = U_{Ry} = ۴/۵V - ۳V = ۱/۵V$$

جریان کل، بعد از عبور از مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ در نقطه‌ی A تقسیم می‌شود. جریان هر شاخه را از دو راه می‌توان محاسبه کرد.

راه اول:

$$I_{R_۳} = \frac{U_{AB}}{R_۳} = \frac{۱/۵V}{۱k\Omega} = ۱/۵mA$$

$$I_{R_۴} = \frac{U_{AB}}{R_۴} = \frac{۱/۵V}{۱k\Omega} = ۱/۵mA$$

راه دوم:

$$I_{R_۳} = I\frac{R_۴}{R_۳ + R_۴} = ۳A\frac{۱k\Omega}{۱k\Omega \quad 1k\Omega} = ۱/۵mA$$

$$I_{R_۴} = I\frac{R_۳}{R_۳ + R_۴} = ۳A\frac{۱k\Omega}{۱k\Omega \quad ۱k\Omega} = ۱/۵mA$$

درهر مدار، توان کل از مجموع توان‌های جزء مصرف شده در آن مدار به‌دست می‌آید.

$$P_T = P_{R_۱} + P_{R_۲} + P_{R_۳} + P_{R_۴}$$

توان مصرفی $R_۱$

$$P_{R_۱} = R_۱I^۲ = ۰/۵k\Omega \quad (۳mA)^۲ = ۴/۵mw$$

توان مصرفی $R_۲$ $\quad P_{R_۲} = P_{R_۱} = ۴/۵mw$

توان مصرفی $R_۳$

$$P_{R_۳} = R_۳I_۳^۲ = ۱k\Omega \quad (۱/۵mA)^۲ = ۲/۲۵mw$$

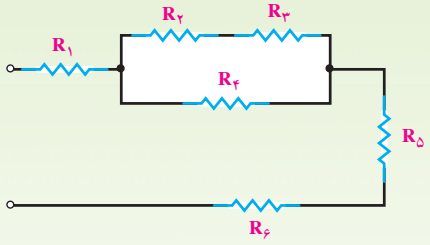
توان مصرفی $R_۴$

$$P_{R_۴} = P_{R_۳} = ۲/۲۵mw$$

$$P_T = ۴/۵mw + ۴/۵mw + ۲/۲۵mw + ۲/۲۵mw$$

توان کل $\quad = ۱۳/۵mw$

مثال ۷: درمدار شکل ۱۶ــ۱۱ مشخص کنید کدام مقاومت‌ها با هم سری و کدام مقاومت‌ها با هم موازی‌اند؟

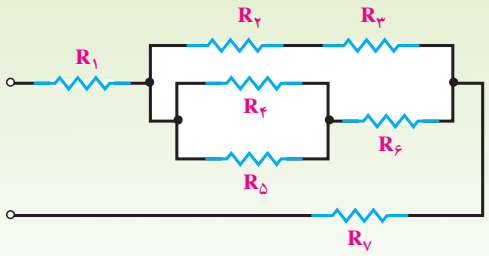


شکل ۱۶ــ۱۱

راه حل: $R_۲$ و $R_۳$ با هم سری، $R_{۲,۳}$ با $R_۴$ موازی و $R_۱$ و $(R_{۲,۳,۴})$ و $R_۵$ و $R_۶$ با هم سری‌اند. خلاصه‌ی این توضیح را به‌صورت زیر می‌توان نوشت :

$$R_t = R_۱ + \left[(R_۲ + R_۳) \| R_۴\right] + R_۵ + R_۶$$

مثال ۸: درمدار شکل ۱۷ــ۱۱ مقاومت‌های سری و موازی را به‌صورت نمادین (سمبلیک) بنویسید.

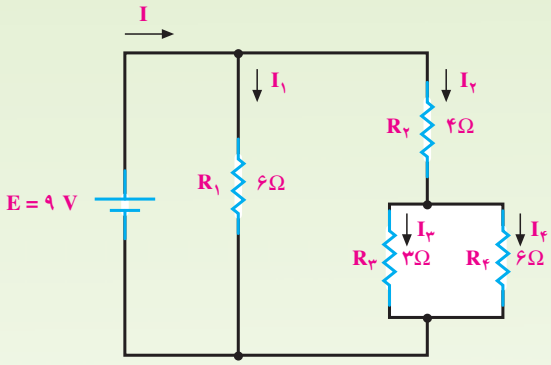


شکل ۱۷ــ۱۱

راه حل:

$$R_t = R_۱ + \left\{(R_۲ + R_۳) \| \left[(R_۴ \| R_۵) + R_۶\right]\right\} + R_۷$$

مثال ۹: مقاومت معادل، جریان کل و جریان هر شاخه از مدار شکل ۱۸ــ۱۱ را به‌دست آورید.



شکل ۱۸ــ۱۱

راه حل:

$$R_{۳,۴} = R_۴ \| R_۳ = \frac{۳\times۶}{۳+۶} = ۲\Omega$$

$$R_{۳,۴} + R_۲ = ۲\Omega \quad ۴\Omega \quad ۶\Omega$$

مقاومت کل $\quad R_t = R_۱ \| R_{۲,۳,۴} = \frac{۶\Omega}{۲} = ۳\Omega$

شدّت جریان کل $\quad I = \frac{E}{Rt} = \frac{۹V}{۳\Omega} = ۳A$

شدّت جریان $I_۱$ از تقسیم کردن ولتاژ منبع بر $R_۱$ به‌دست می‌آید.

$$I_۱ = \frac{E}{R_۱} = \frac{۹V}{۶\Omega} = ۱/۵A$$

شدّت جریان $I_۲$ پس از عبور از $R_۲$ به $I_۳$ و $I_۴$ تقسیم

می‌شود ؛ بنابراین، جریان $I_۲$ برابر است با

$$I_۲ = I_{۲,۳,۴} = \frac{E}{R_{۲,۳,۴}} = \frac{۹V}{۶Ω} = ۱/۵A$$

شدّت جریان $I_۳$ را از تقسیم کردن جریان $I_۲$ بین $R_۳$ و $R_۴$ محاسبه می‌کنیم.

$$I_۳ = I_۲ \frac{R_۴}{R_۴ + R_۳}$$

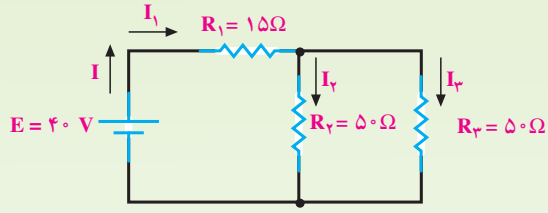
$$I_۳ = \frac{۱/۵A \times ۶Ω}{(۶+۳)Ω} = ۱A$$

با داشتن شدّت جریان $I_۲$ و $I_۳$ می‌توان با عمل تفریق، شدّت جریان $I_۴$ را به‌دست آورد.

$$I_۴ = I_۲ - I_۳$$

$$I_۴ = ۱/۵A - ۱A = ۰/۵A$$

مثال ۱۰: افت ولتاژ دو سر $R_۲$ و $R_۱$ را در مدار شکل ۱۱ــ۱۹ حساب کنید.



شکل ۱۱ــ۱۹

راه حل: با محاسبه‌ی مقاومت معادل، شدّت جریان کل را به‌دست می‌آوریم.

$$R_۲ \| R_۳ = \frac{۵۰Ω}{۲} = ۲۵Ω$$

$$R_t = R_۱ + R_{۲,۳}$$

$$R_t = ۱۵Ω \quad ۲۵Ω \quad ۴۰Ω$$

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{۴۰V}{۴۰Ω}$$

$$I = ۱A$$

افت ولتاژ دو سر $R_۱$ از حاصل ضرب شدّت جریان عبوری از آن در مقدار $R_۱$ به‌دست می‌آید.

$$U_{R_۱} = R_۱ I_۱$$

$$I = I_۱ = ۱A$$

$$U_{R_۱} = ۱۵Ω \quad ۱A = ۱۵V$$

یا $U_{R_{۲,۳}} = U_{R_۲} = U_{R_۳} = E - U_{R_۱} = ۴۰ - ۱۵ = ۲۵V$.

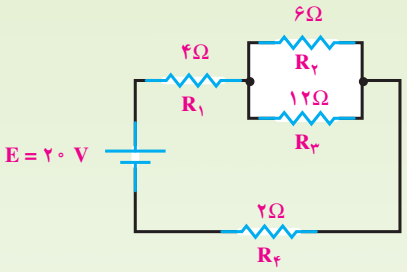
چون $R_۲$ و $R_۳$ با هم مساوی‌اند، شدّت جریان کل به‌نسبت مساوی بین آن‌دو تقسیم می‌شود ؛ یعنی :

$$I_۲ = \frac{I}{۲} = \frac{۱A}{۲} = ۰/۵A$$

$$U_{R_۲} = I_۲ R_۲$$

$$U_{R_۲} = ۰/۵A \times ۵۰Ω \quad ۲۵V$$

مثال ۱۱: توان کل و توان $R_۲$ را در مدار شکل ۱۱ــ۲۰ حساب کنید.



شکل ۱۱ــ۲۰

راه حل: ابتدا مقاومت معادل را حساب می‌کنیم.

$$R_t = R_۱ + (R_۲ \| R_۳) + R_۴$$

$$R_۲ \| R_۳ = \frac{۶ \times ۱۲}{۶+۱۲} = \frac{۱۲Ω}{۳} = ۴Ω$$

$$R_t = ۴Ω \quad ۴Ω \quad ۲Ω$$

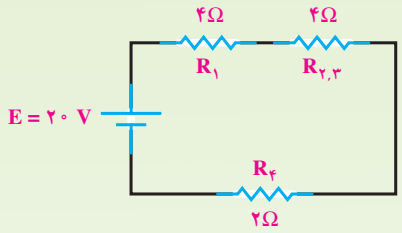
$$R_t = ۱۰Ω$$

با به‌دست آوردن R_t و داشتن ولتاژ کل، توان کل از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$P_t = \frac{(E)^۲}{R_t}$$

$$P_t = \frac{(۲۰)^۲}{۱۰} = ۴۰(W)$$

برای محاسبه‌ی توان مصرفی $R_۲$ ابتدا مدار شکل ۲۰ــ۱۱ را ساده کرده و به مدار سری تبدیل می‌کنیم (مطابق شکل ۲۱ــ۱۱).



شکل ۲۱ــ۱۱

اکنون با استفاده از تقسیم ولتاژها در مدار سری، افت ولتاژ دو سر $R_۲$ و $R_۳$ را به‌دست می‌آوریم.

$$U_{R_{۲,۳}} = E\frac{R_{۲,۳}}{R_t} = E\frac{R_{۲,۳}}{R_۱ + R_{۲,۳} + R_۴}$$

$$U_{R_{۲,۳}} = \frac{۲۰V \times ۴\Omega}{۴+۴+۲} = ۸V$$

چون $R_۲$ با $R_۳$ موازی است، پس $U_{R_۳} = U_{R_۲}$ خواهد بود.

مقدار توان $R_۲$ با استفاده از رابطه‌ی توان چنین می‌شود :

$$P_{R_۲} = \frac{(U_{R_۲})^۲}{R_۲}$$

$$P_{R_۲} = \frac{(۸V)^۲}{۶\Omega} = \frac{۶۴V}{۶\Omega}$$

$$P_{R_۲} = \frac{۳۲}{۳}(W)$$

۸ــ۱۱ــ مشخّصات مدار موازی

۱ــ ولتاژ دو سر هر شاخه از مدار موازی برابر ولتاژ منبع است.

$$E = U_۱ = U_۲ \cdots = U_n$$

۲ــ جریان عبوری از هر شاخه با مقدار مقاومت آن شاخه نسبتِ عکس دارد.

$$\uparrow I = \frac{U}{\downarrow R} \quad و \quad \downarrow I = \frac{U}{R \uparrow}$$

۳ــ جریان کل از مجموع جریان‌های شاخه‌ها به‌دست می‌آید.

$$I_T = I_۱ + I_۲ + \cdots + I_n$$

۴ــ مقاومت کل مدار از رابطه زیر محاسبه می‌شود :

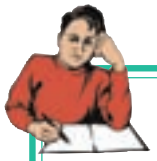
$$R_T = \frac{۱}{\frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + ... + \frac{۱}{R_n}}$$

۵ــ مقدار مقاومت کل (معادل) از کم اهم‌ترین مقاومت‌های مدار نیز کم‌تر است.

۶ــ توان کل برابر مجموع توان مقاومت‌های مدار است.

$$P_T = P_۱ + P_۲ + \cdots + P_n$$

۷ــ قطع (باز) شدن یک شاخه نقشی در جریان سایر شاخه‌ها ندارد اما جریان کل مدار کاهش می‌یابد.



پرسش

۱ــ چرا مقاومت‌ها را موازی می‌بندند؟

۲ــ مقاومت معادل مدار موازی را تعریف کنید.

۳ــ حالت‌های خاص را در محاسبه‌ی مقاومت معادل توضیح دهید.

۴ــ در مدار موازی، جریان کل چگونه بین شاخه‌ها تقسیم می‌شود؟

۵ ــ در مدار موازی از کدام قانون کیرشهف کمک می‌گیرید؟

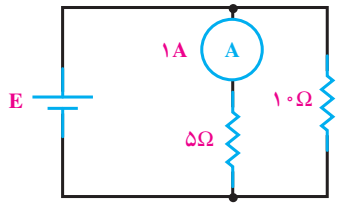
۶ــ مدار ترکیبی از چه قوانینی پیروی می‌کند؟

۷ــ مصرف کننده‌های برقی به چه صورت به شبکه بسته می‌شوند؟

تمرین

۱ــ در شکل ۲۲ــ۱۱ ولتاژ باتری (E) و جریان کل چه‌قدر است؟

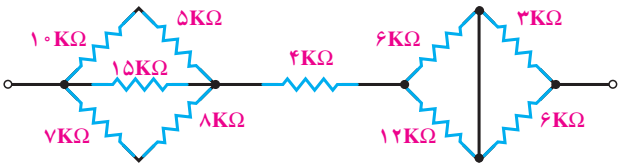
(جواب : ۵V ۱/۵A)



شکل ۲۲ــ۱۱

۲ــ مقاومت معادل مدار شکل ۲۳ــ۱۱ چه‌قدر است؟

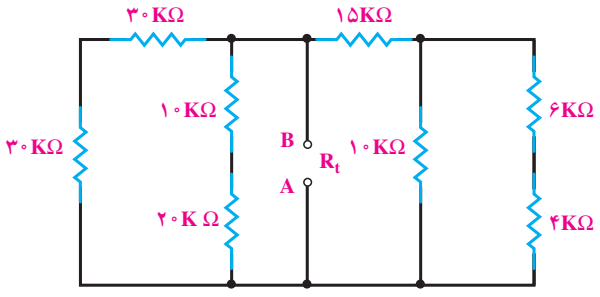
(جواب : ۱۵kΩ)



شکل ۲۳ــ۱۱

۳ــ مقاومت معادل مدار R_t بین دو نقطه‌ی A و B در مدار شکل ۲۴ــ۱۱ چه‌قدراست؟ اگر بین دو نقطه‌ی A و B منبع ولتاژ ۱۰۰ ولتی وصل شود، جریان کل چه‌قدر است؟

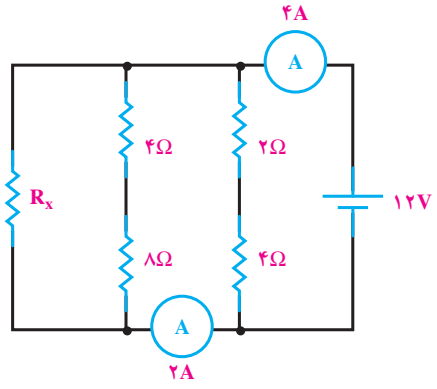
(جواب : ۱۰kΩ – ۱۰mA)



شکل ۲۴ــ۱۱

۴ــ مقدار مقاومت R_x درمدار شکل ۲۵ــ۱۱ چه‌قدر است؟

(جواب : ۱۲Ω)



شکل ۲۵ــ۱۱

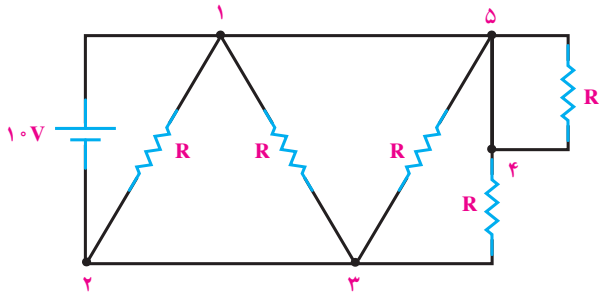
۵ــ در شکل ۲۶ــ۱۱ اختلاف پتانسیل‌های $U_{۱۲}$ ، $U_{۱۳}$ ، $U_{۵۳}$ ، $U_{۵۴}$ ، $U_{۴۳}$ ، $U_{۲۳}$ و $U_{۱۵}$ را به‌دست آورید.

جواب :

$U_{۱۲} = U_{۱۳} = U_{۵۳} = ۱۰V$

$U_{۵۴} = ۰, U_{۴,۳} = ۱۰V$

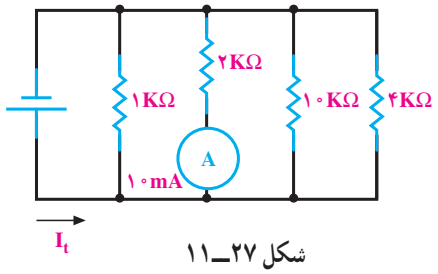
$U_{۱۵} = U_{۲۳} = ۰$



شکل ۲۶ــ۱۱

۶ــ درمدار شکل ۲۷ــ۱۱، I_t چه‌قدر است؟

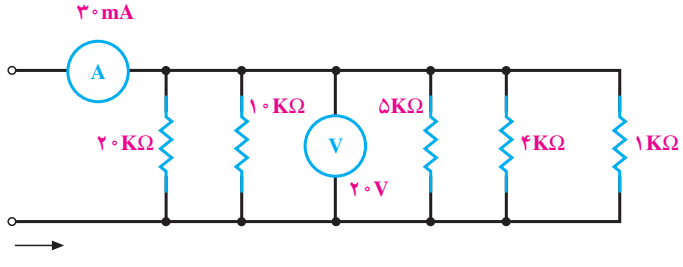
(جواب : ۳۷mA)



شکل ۲۷ــ۱۱

۷ــ درمدار شکل ۲۸ــ۱۱ کدام مقاومت باز شود تا دستگاه‌های اندازه‌گیری مقدار داده شده در شکل را نشان دهند؟

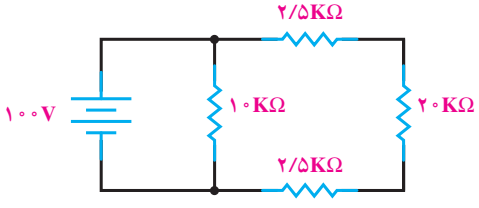
(جواب : ۱۰kΩ)



شکل ۲۸ــ۱۱

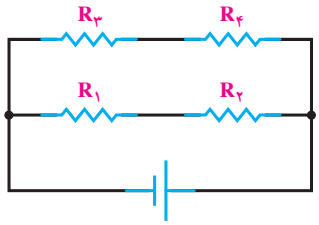
۸ــ توان کل مدار شکل ۲۹ــ۱۱ چه‌قدر است؟

(جواب : ۱/۴W)



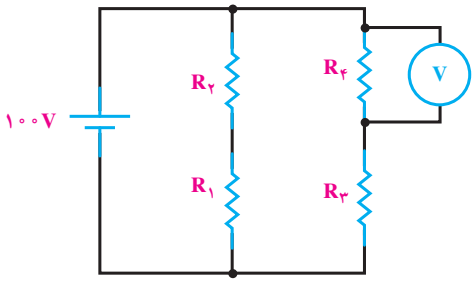
شکل ۲۹ ــ ۱۱

۹ــ در مدار شکل ۳۰ــ۱۱ اگر $R_۲$ راقطع یا دو سر آن را به‌وسیله‌ی سیمی به هم وصل کنیم، در توان $R_۴$ چه تغییری حاصل می‌شود؟



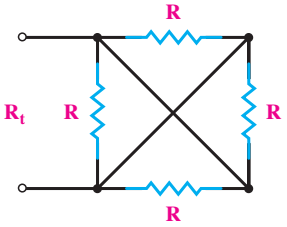
شکل ۳۰ــ۱۱

۱۰ــ درمدار شکل ۳۱ــ۱۱ در چه صورت ولت‌متر عدد صفر را نشان می‌دهد؟
(جواب : $R_۴ = ۰$ یا در قسمت‌های CD – AB یا DE قطع‌شدگی باشد.)



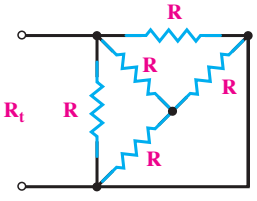
شکل ۳۱ــ۱۱

۱۱ــ در شکل ۳۲ــ۱۱ مقدار R_t چه‌قدر است؟
(جواب : $\frac{R}{۴}$)



شکل ۳۲ــ۱۱

۱۲ــ مقاومت معادل شکل ۳۳ــ۱۱ چه‌قدر است؟
(جواب : $\frac{۳}{۸}R$)



شکل ۳۳ــ۱۱

۱۳ــ در مداری با یک فیوز ۶ آمپری، چند لامپ ۴۰ واتی، ۲۲۰ ولتی می‌توانند روشن باشند، بدون این که جریان برق قطع شود؟ اگر از یک اتوی برقی ۷۵۰ واتی استفاده شود، چند عدد از لامپ‌ها را می‌توان روشن کرد؟
(جواب : ۳۳ لامپ و ۱۴ لامپ)

فصل دوازدهم

اتّصال پیل ها

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ اتّصال سری ــ موازی پیل‌ها را توضیح دهد.

۲ــ پیل‌ها را به طور سری، موازی و مختلط به یک‌دیگر اتّصال دهد.

۳ــ کاربرد پیل‌ها را به‌طور سری و موازی و مختلط توضیح دهد.

۴ــ مقاومت داخلی و اثرات آن را بیان کند.

۵ــ پلاریته‌ی نقاط مختلف را در اتّصال سری ــ موازی و مختلط مشخص کند.

۶ــ اتّصال متقابل را توضیح دهد.

۷ــ باتری‌ها را از نظر توان (آمپر ساعت) با هم مقایسه کند.

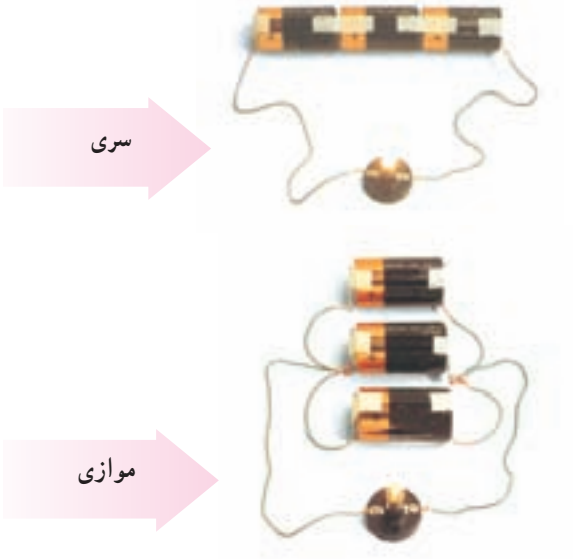
۱ــ۱۲ــ اتّصال باتری‌ها

یکی از منابع تأمین انرژی الکتریکی باتری‌ها هستند. باتری‌ها انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. نمونه‌ای از باتری‌ها، پیل‌های خشک و تر هستند که در چراغ قوه و اتومبیل به کار می‌روند.

واژه‌ی باتری و پیل را معمولاً به جای یک‌دیگر به کار می‌برند اما این دو از نظر تکنیکی با هم تفاوت دارند. باتری از دو یا چند پیل تشکیل می‌شود که به طور سری یا موازی به هم وصل شده‌اند. به عبارت دیگر، پیل‌ها واحد تشکیل دهنده‌ی باتری‌ها هستند. نمای مداری یک پیل به صورت دو خط موازی است که یکی بزرگ‌تر و دیگری کوچک‌تر می‌باشد (شکل ۱ــ۱۲).

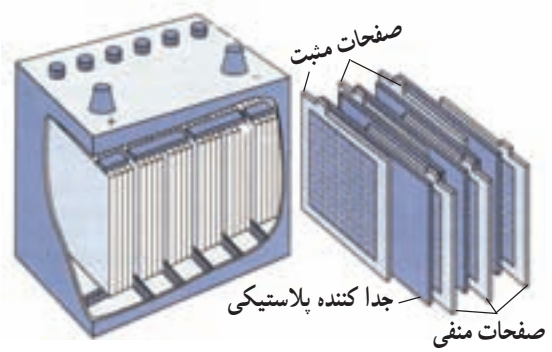
شکل ۱ــ۱۲ــ نمای مداری یک پیل

خط بزرگ‌تر را معمولاً قطب مثبت و خط کوچک‌تر را قطب منفی در نظر می‌گیرند. در شکل ۲ــ۱۲ اتصال سری و موازی پیل‌ها را مشاهده می‌کنید.



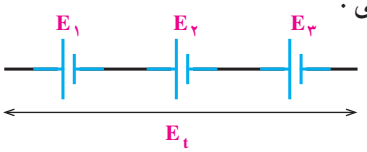
شکل ۲ــ۱۲ــ اتصال سری و موازی پیل‌ها

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 ۳ــ۱۲ یک نمونه پیل تر را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳ــ۱۲ــ 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 تک‌تک پیل‌های سری شده برابر است ؛ یعنی :



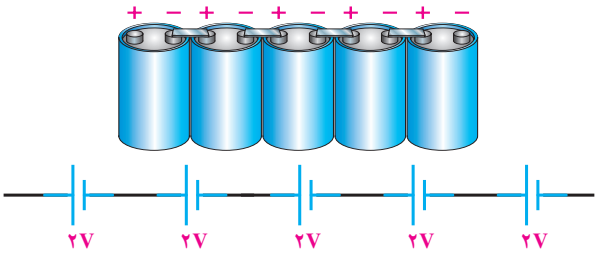
$$E_t = E_1 + E_2 + E_3$$

رابطه‌ی ولتاژ کل n پیل سری شده به صورت زیر است :

$$E_t = E_1 + E_2 + \cdots + E_n$$

لازم به ذکر است در اتصال سری پیل‌های سری جریان عبوری از مدار یکسان است.

در شکل ۴ــ۱۲اتصال سری چند پیل را می‌بینید.



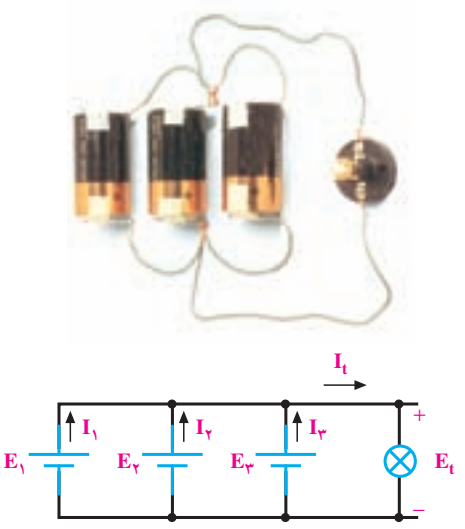
شکل ۴ــ۱۲ــ اتصال سری پیل‌ها

برای بالا بردن جریان‌دهی 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 ــ۱۲چند پیل موازی به صورت نمای الکتریکی و ظاهری نشان داده شده است.

لازم به توضیح است که در مدار شکل ۵ــ۱۲ ولتاژ دو سر پیل‌ها باید با هم برابر باشد امّا ظرفیّت جریان‌دهی، متناسب با تعداد پیل‌ها افزایش می‌یابد ؛ یعنی :

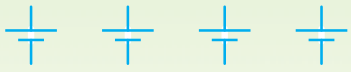
$$E_t = E_1 = E_2 = E_3$$

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3$$



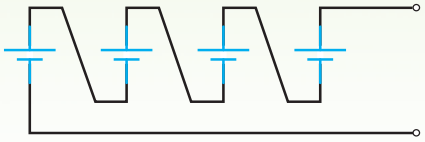
شکل ۵ــ۱۲ــ نمای ظاهری و مداری چند پیل موازی

مثال ۱: پیل‌های شکل ۶ــ۱۲ را طوری وصل کنید که حداکثر ولتاژ از آن‌ها به دست آید.



شکل ۶ــ۱۲

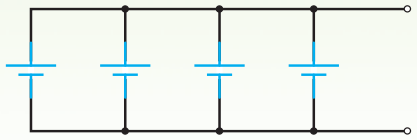
راه حل:



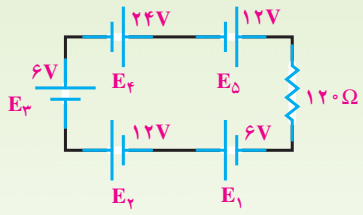
مثال ۲: پیل‌های شکل ۷ــ۱۲ را برای به دست آوردن حداکثر ظرفیّت جریان به یک‌دیگر اتّصال دهید.

شکل ۷ــ۱۲

راه حل:



مثال ۳: در مدار شکل ۸ــ۱۲ ولتاژ و جریان دو سر مصرف کننده چه‌قدر است؟



شکل ۸ــ۱۲

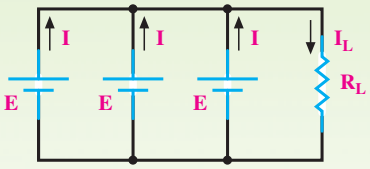
راه حل:

$$E_t = E_۱ + E_۲ + E_۳ + E_۴ + E_۵$$

$$E_t = ۶V + ۱۲V + ۶V + ۲۴V + ۱۲V = ۶۰V$$

$$I = \frac{E_t}{۱۲۰\Omega} = \frac{۶۰V}{۱۲۰\Omega} = ۰/۵A$$

مثال ۴: در مدار شکل ۹ــ۱۲ ولتاژ و جریان دو سر بار چه‌قدر است :



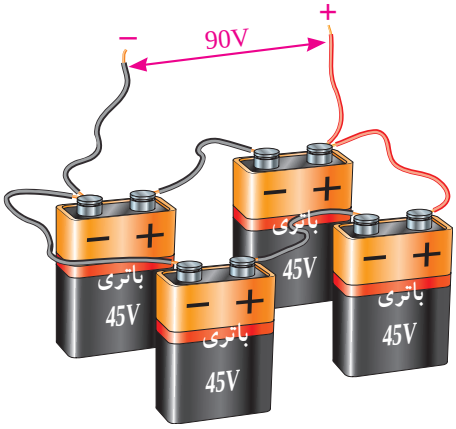
شکل ۹ــ۱۲

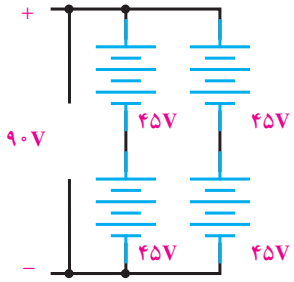
راه حل:

$$U_L = E_t = E$$

$$I_L = I + I + I = ۳I$$

اگر بخواهند ولتاژ باتری و جریان‌دهی را افزایش دهند، پیل‌های تشکیل دهنده‌ی باتری را به طور سری ــ موازی به هم وصل می‌کنند (شکل ۱۰ــ۱۲).





شکل ۱۰ــ۱۲ــ اتّصال ترکیبی باتری‌ها

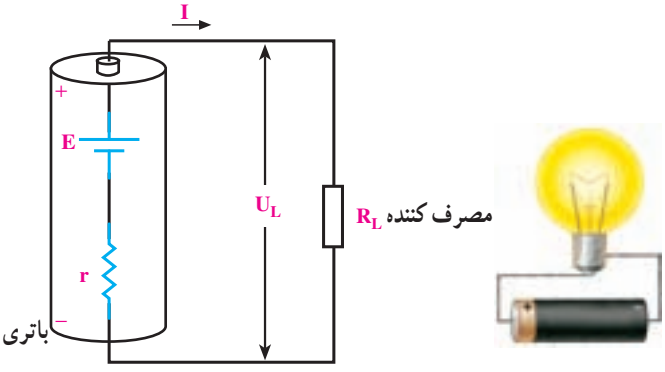
باتری‌ها را نیز می‌توان با یک‌دیگر به‌طور سری یا موازی بست. در صورتی که بخواهیم ولتاژ کل را بالا ببریم، باتری‌ها را سری می‌بندیم (ولتاژ باتری‌ها می‌تواند مساوی یا نامساوی باشد).

در صورتی که بخواهیم ظرفیّت جریان را بالا ببریم، باتری‌ها را موازی می‌بندیم اگر ولتاژ باتری‌ها مساوی باشد، هر باتری در افزایش ظرفیّت جریان کل شریک است امّا 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.

۲ــ۱۲ــ مقاومت داخلی پیل‌ها (باتری)

یک مولّد (باتری) را در نظر می‌گیریم ؛ ابتدا به کمک ولت‌متر، ولتاژ دو سر باتری را اندازه‌گیری کرده مقدار آن را

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 اوّل کم‌تر است ؛ در صورتی که انتظار می‌رفت، ولتاژ اندازه‌گیری شده در هر دو مرحله برابر باشد. از این‌رو 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 ۱۱ــ۱۲ 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 ۱۱ــ۱۲ــ 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 شدّت جریان تولیدی باتری را کاهش می‌دهد.

علّت کاهش ولتاژ دوسر باتری ــ همان‌گونه که در مقدمه ذکر شد ــ 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، شدّت جریان کاهش می‌یابد، مثلاً برای مدار شکل ۱۱ــ۱۲ ولتاژ و جریانی که به مصرف‌کننده می‌رسد برابر است با :

$$R_t = r + R_L$$

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{E}{r + R_L}$$

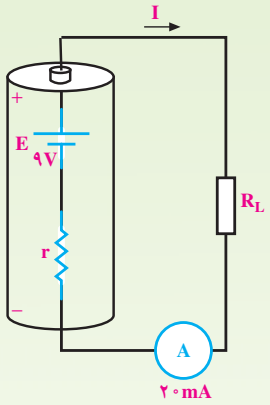
$$U_L = E - U_r = E - I.r$$

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 مصرف‌کننده می‌رسد، همیشه به اندازه‌ی افت ولتاژ دو سر مقاومت داخلی از ولتاژ باتری کم‌تر است.

مثال ۵: در مدار شکل ۱۲ــ ۱۲

الف : مقدار r و ولتاژی که به بار می‌رسد وقتی که $R_L = ۳۰۰\Omega$ باشد، چه‌قدر است؟



شکل ۱۲ــ۱۲

ب : اگر R_L را به ۳۴۵۰ اهم افزایش دهیم، ولتاژ دو سر بار و شدّت جریان مدار چه‌قدر می‌شود؟

راه حل: الف ــ $R_L = ۳۰۰\Omega$

مقاومت معادل با استفاده از قانون اهم

$$R_t = \frac{E}{I} = \frac{۹V}{۲۰mA} = ۴۵۰\Omega$$

$$R_t = r + R_L$$

$$r = R_t - R_L = ۴۵۰ - ۳۰۰ = ۱۵۰\Omega$$

$$U_L = IR_L = ۲۰mA \times ۳۰۰\Omega \quad ۶V$$

در بار $R_L = ۳۰۰\Omega$ از ولتاژ باتری فقط ۶ ولت به بار می‌رسد و ۳ ولت دو سر مقاومت داخلی افت می‌کند.

ب ـ $R_L = ۳۴۵۰\Omega$

با معلوم شدن مقاومت داخلی، مقاومت کل برابر است با

$R_t = r + R_L = ۱۵۰\Omega + ۳۴۵۰\Omega = ۳۶۰۰\Omega$

شدّت جریانی که در این حالت از مدار می‌گذرد، برابر است با $I = \frac{E}{R_t}$

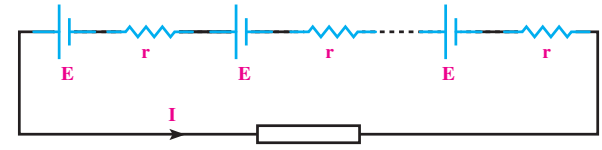
$$I = \frac{۹V}{۳۶۰۰\Omega} = ۲/۵mA$$

$$U_L = I.R_L = ۲/۵mA \times ۳۴۵۰\Omega = ۸/۶۲۵V$$

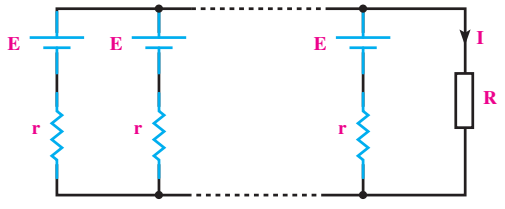
در این حالت، با اضافه شدن R_L ولتاژ بیش‌تری به بار می‌رسد (۸/۶۲۵V) و ولتاژ کم‌تری در دوسر مقاومت داخلی افت می‌کند (۰/۳۷۵V).

نتیجه: اگر مقاومت مصرف‌کننده نسبت به مقاومت داخلی مولّد خیلی بزرگ باشد، از مقاومت داخلی می‌توان صرف‌نظر کرد.

در صورتی که چند باتری کاملاً مشابه با مقاومت داخلی معین را با مصرف کننده (مطابق شکل ۱۳ـ۱۲) سری یا موازی ببندیم، شدت جریان کل مدار به ترتیب از روابط زیر به‌دست می‌آید.



$$I = \frac{nE}{nr + R}$$

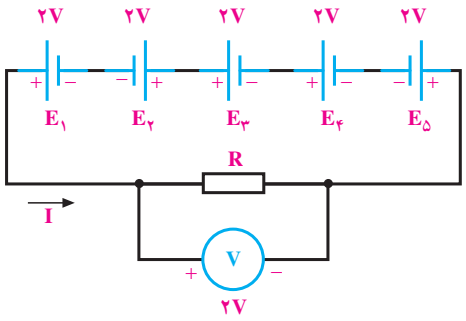


$$I = \frac{E}{\frac{r}{n} + R}$$

شکل ۱۳ـ۱۲ــ اتّصال باتری‌ها با مقاومت داخلی به صورت سری و موازی

۳ـ۱۲ــ اتّصال متقابل پیل‌ها

در صورتی که دو یا چند پیل، مطابق شکل ۱۴ـ۱۲ به هم اتّصال 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:

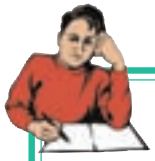


شکل ۱۴ـ۱۲ــ اتصال متقابل پیل‌ها

$$E_t = E_۱ - E_۲ + E_۳ + E_۴ - E_۵$$
$$E_t = ۲ - ۲ + ۲ + ۲ - ۲ = ۲V$$

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 اتّصال نمی‌دهند؛ زیرا انرژی الکتریکی پیل‌های با ولتاژ بالاتر در پیل‌های با ولتاژ کم‌تر 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.



پرسش

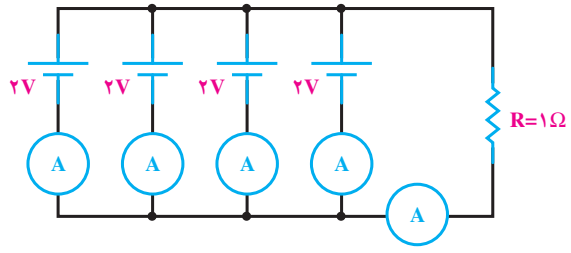
۱ــ پیل را تعریف کنید.
۲ــ باتری را تعریف کنید.
۳ــ چند پیل تر و خشک را نام ببرید.
۴ــ اتّصال چند پیل سری را از لحاظ پلاریته (قطب‌های مثبت و منفی) بررسی کنید.
۵ــ در اتّصال موازی، شدّت جریان کل چگونه تغییر می‌کند؟
۶ــ برای افزایش ولتاژ و تأمین ولتاژ مورد نیاز، پیل‌ها را چگونه اتّصال می‌دهند؟
۷ــ مقاومت داخلی پیل چیست و چه تأثیری در مدار دارد؟
۸ــ اتّصال متقابل پیل‌ها یعنی چه؟

تمرین

۱ــ برای تأمین ولتاژ ۹ ولت حداقل از چند باتری ۱/۵ ولتی و به چه صورت استفاده می‌کنیم؟
(جواب : ۶ ــ سری)

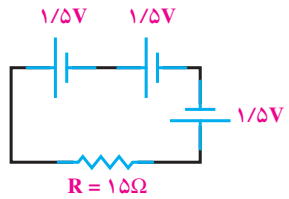
۲ــ برای افزایش میزان جریان‌دهی یک باتری به ۵ برابر، چند باتری مشابه دیگر را و به چه صورت باید به مدار اضافه کنیم؟
(جواب : ۴ــ موازی)

۳ــ در مدار شکل ۱۲ــ۱۵ شدّت جریان هر پیل و شدّت جریان کل را به دست آورید.
(جواب : ۰/۵A ، ۲A)



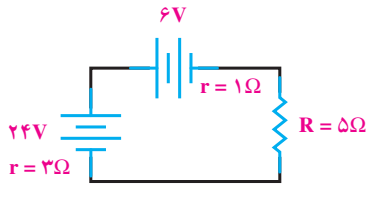
شکل ۱۲ــ۱۵

۴ــ در مدار شکل ۱۲ــ۱۶ ولتاژ و جریان کل چه‌قدر است؟
(جواب : ۱/۵V ، ۱۰۰mA)



شکل ۱۲ــ۱۶

۵ــ در مدار شکل ۱۲ــ۱۷ شدّت جریان مدار چه‌قدر است؟
(جواب : ۲A)



شکل ۱۲ــ۱۷

فصل سیزدهم

جریان متناوب

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ جریان متناوب را تعریف کند.

۲ــ انواع جریان متناوب را شرح دهد.

۳ــ نحوه‌ی تولید جریان متناوب سینوسی را بیان کند.

۴ــ دامنه‌ی موج را تعریف کند.

۵ــ فرکانس و دوره‌ی تناوب موج سینوسی را توضیح دهد و آن‌ها را محاسبه کند.

۶ــ ماکزیمم دامنه‌ی موج را شرح دهد.

۷ــ مقدار مؤثّر دامنه‌ی موج را توضیح دهد و آن را حساب کند.

۸ــ مقدار متوسط دامنه‌ی موج را شرح دهد و آن‌را حساب کند.

۹ــ اختلاف فاز دو موج سینوسی را بیان کند.

۱۰ــ معادلات زمانی جریان و ولتاژی را که دارای شکل موج متناوب سینوسی هستند بنویسد.

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 این‌جا جریانی را که مقدار و جهت آن در طول زمان تغییر می‌کند، با عنوان جریان متناوب[1] یا جریان AC مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱ــ۱۳ــ تعریف جریان متناوب

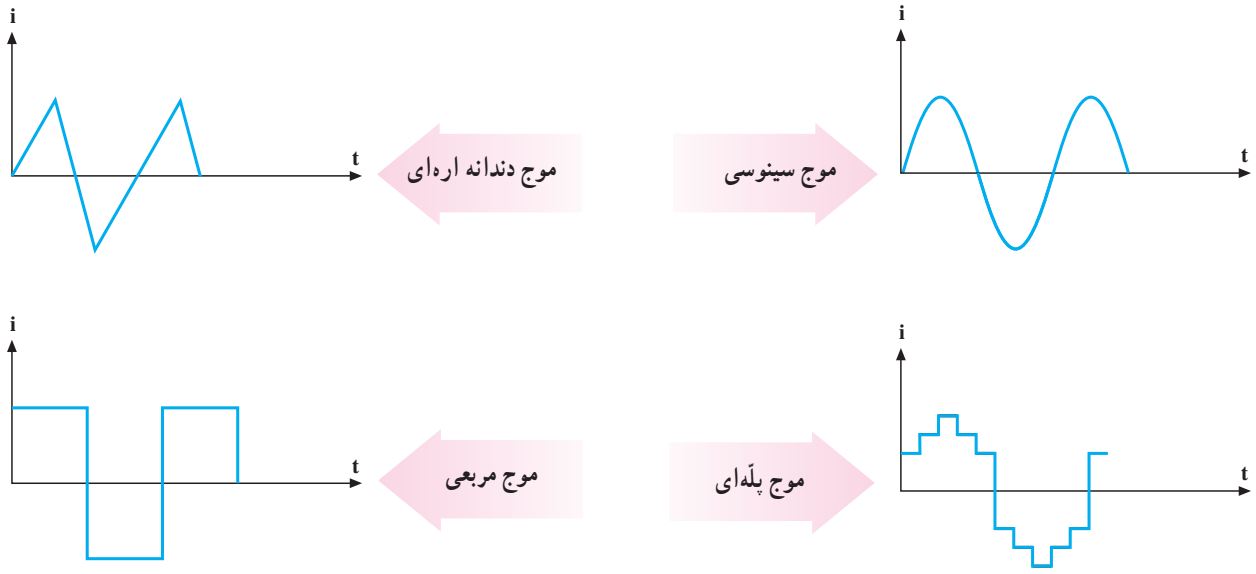
جریان متناوب جریانی است که جهت آن طی زمان تغییر می‌کند و دامنه‌ی آن نیز نسبت به زمان، از صفر تا حداکثر مثبت و از حداکثر مثبت تا صفر و از صفر تا حداکثر منفی و از حداکثر منفی تا صفر تغییر می‌کند.

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 ــ مخالف جهت قبل ــ 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.

۲ــ۱۳ــ انواع جریان متناوب

برای نشان دادن چگونگی تغییر جریان در زمان از شکل

۱ ــ Alternative currnet



شکل ۱ــ۱۳ــ چند نمونه از شکل موج‌های جریان متناوب

موج استفاده می‌کنیم. در شکل ۱ــ۱۳ چند نمونه شکل موج را مشاهده می‌کنید. یکی از انواع شکل موج‌ها، شکل موجِ 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.

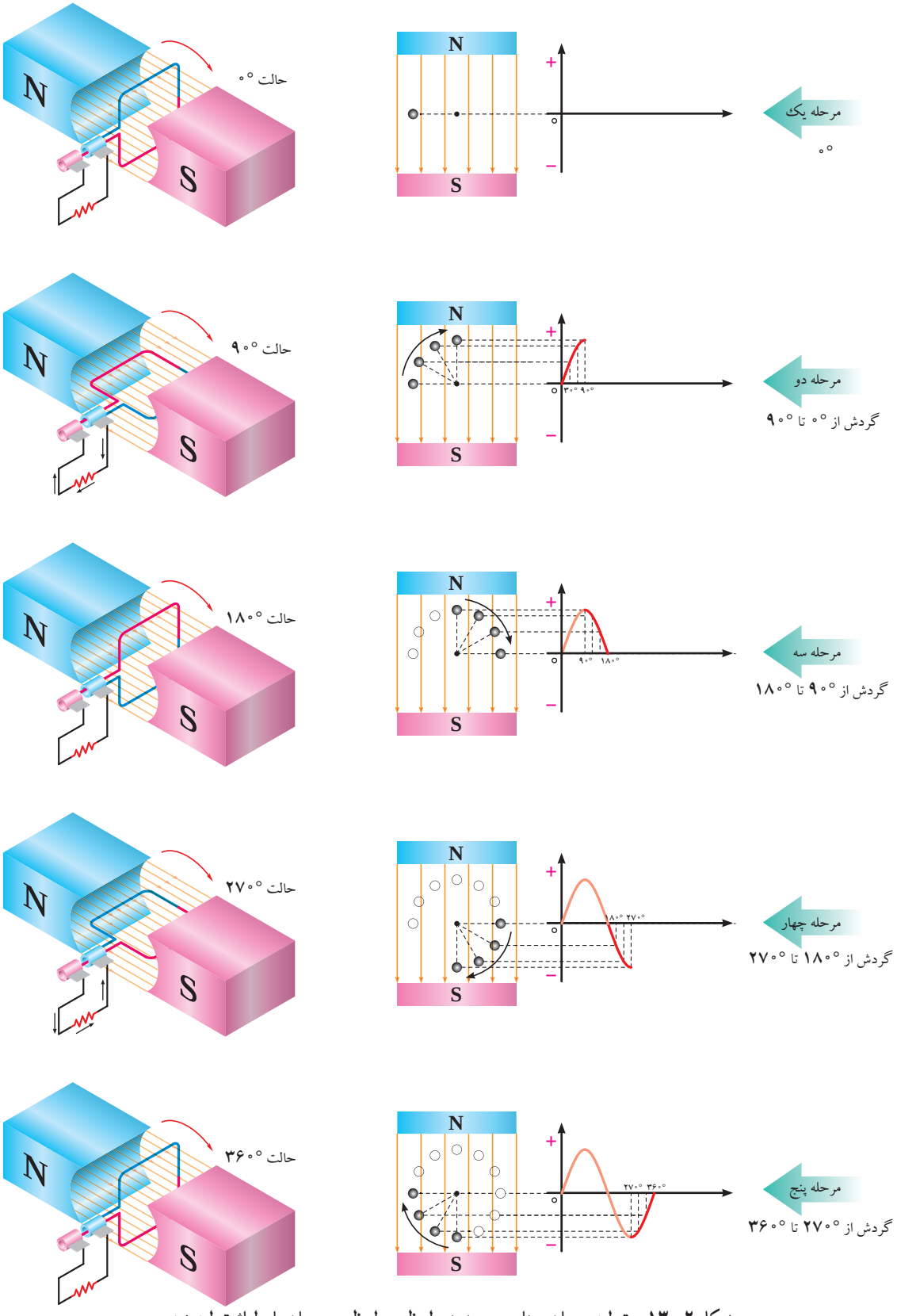
۳ــ۱۳ــ تولید جریان متناوب

با شناخته شدن جریان متناوب و تولید و انتقال آسان آن، روزبه‌روز بر اهمیّت 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. بدین‌ترتیب که اگر دو قطب یک آهن‌ربا در نزدیکی یک‌دیگر قرار داشته باشند، همواره فلوی مغناطیسی (خطوط قوا) از قطب شمال آهن‌ربا خارج و به قطب جنوب آن وارد می‌شود. چنان‌چه در مسیر خطوط قوا سیم‌پیچی دوران کند، خطوط قوا توسط سیم‌پیچ قطع می‌شود. هرگاه این عمل به‌طور مستمر انجام گیرد، جریان متناوب از مولّد جریان متناوب به‌وجود می‌آید.

شکل ۲ــ۱۳ نمای یک ژنراتور ساده و چگونگی حرکت سیم‌پیچ و تولید لحظه به لحظه‌ی شکل موج جریان یا ولتاژ متناوب را نشان می‌دهد.

در مرحله‌ی ۱ خطوط قوای مغناطیسی به وسیله‌ی سیم‌پیچ قطع نمی‌شود (سیم‌پیچ با خطوط قوا موازی است). در نتیجه، ولتاژ در این مرحله صفر است. چنان‌چه سیم‌پیچ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت بچرخد، (مرحله‌ی ۲) قطع خطوط قوا به‌وسیله‌ی سیم‌پیچ افزایش می‌یابد. در نتیجه، ولتاژ تولید شده، رفته‌رفته زیاد می‌شود و پس از پیمودن ۹۰ درجه به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. در مرحله‌ی ۳، با ادامه‌ی دوران سیم‌پیچ تا ۱۸۰ درجه قطع خطوط قوا کاهش می‌یابد در نتیجه ولتاژ تولید شده نیز کاهش می‌یابد و در ۱۸۰ درجه از گردش، دوباره به مقدار صفر می‌رسد.

از این لحظه به بعد، جهت ولتاژ تولیدی عوض می‌شود و در مرحله‌ی ۴ تا ۲۷۰ درجه، مقدار آن دوباره افزایش می‌یابد تا در جهت عکس، به نقطه‌ی ماکزیمم خود می‌رسد. در مرحله‌ی۵ با ادامه‌ی گردش تا ۳۶۰ درجه، مقدار ولتاژ تولید شده کاهش می‌یابد و دوباره به صفر می‌رسد. تا این‌جا سیم‌پیچ، یک دور کامل زده است. با ادامه‌ی هر گردش سیم‌پیچ، ولتاژ تولید شده تغییرات مشابهی را طی می‌کند. در همه‌ی این حالت‌ها جریان در مصرف‌ــ کننده هم تغییراتی مانند ولتاژ دارد و مقدار آن به طور مرتب صفر، ماکزیمم، صفر، ماکزیمم در جهت عکس و بالاخره صفر می‌شود.

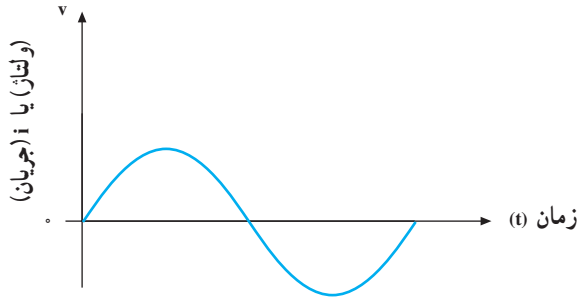


شکل ۲ــ۱۳ــ تولید جریان متناوب و منحنی لحظه به لحظه‌ی جریان یا ولتاژ تولید شده

تذکر: در شکل ۲ــ۱۳ دو سر مقاومت‌ها به دو حلقه (رینگ)ی مجزا از هم وصل است و قطبین حلقه‌ها در اثر حرکت سیم‌پیچ عوض می‌شوند.

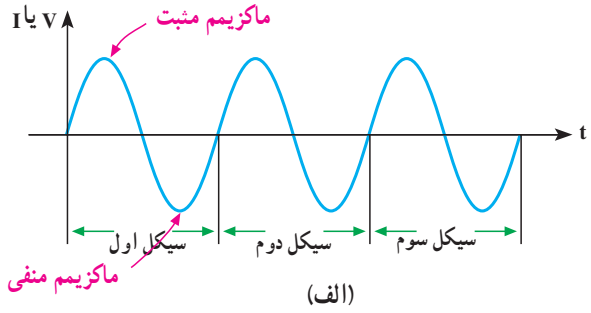
۴ــ۱۳ــ مشخصات جریان متناوب

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 ۳ــ۱۳ یک موج سینوسی را نشان می‌دهد که بیانگر جریان یا ولتاژ سینوسی است.



شکل ۳ــ۱۳ــ موج سینوسی

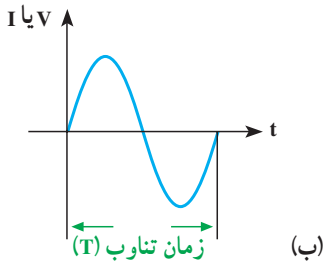
همان‌طور که می‌بینید، مقدار و جهت ولتاژ یا جریان با زمان تغییر می‌کند؛ یعنی از صفر شروع می‌شود و به مقدار پیک یا ماکزیمم مثبت می‌رسد. آن‌گاه دوباره صفر می‌شود و سپس به پیک یا ماکزیمم منفی می‌رسد و باز صفر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، هنگامی که موج سینوسی از صفر می‌گذرد، پلاریته‌ی خود را عوض می‌کند. به عبارت ساده‌تر، موجِ سینوسی بین مقادیر مثبت و منفی تناوب می‌کند. مجموعه‌ی یک تناوب مثبت و منفی را یک **سیکل** گویند (شکل ۴ــ۱۳ــ الف).



(الف)

۵ــ۱۳ــ زمان تناوب

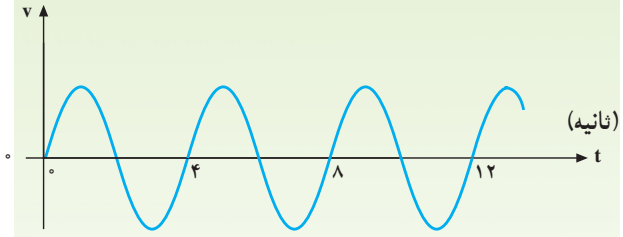
همان‌طور که دیدید، موج سینوسی با زمان (t) تغییر می‌کند. بنا به تعریف، مدت زمانی را که طول می‌کشد تا یک سیکل کامل به‌وجود آید، **زمان تناوب** یا **پریود** می‌گویند و آن را با حرف T نمایش می‌دهند (شکل ۴ــ۱۳ ــ ب).



(ب)

شکل ۴ــ۱۳ــ دوره‌ی تناوب یک موج سینوسی

مثال ۱: در شکل ۵ــ۱۳ زمان تناوب موج سینوسی را به دست آورید.

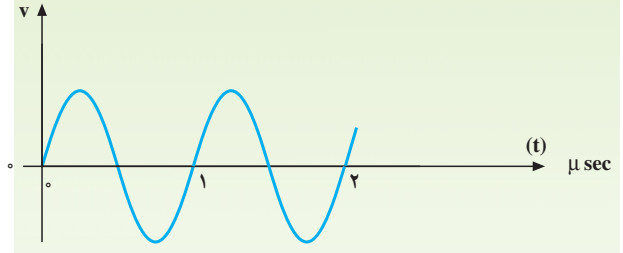


شکل ۵ــ۱۳

راه حل: یک سیکل کامل را مشخص می‌کنیم زمان انجام آن را از روی محور زمان به‌دست می‌آوریم.

$T = ۴$ ثانیه

مثال ۲: در شکل ۶ــ۱۳ سه روش برای اندازه‌گیری زمان تناوب پیدا کنید.



شکل ۶ــ۱۳

راه حل:

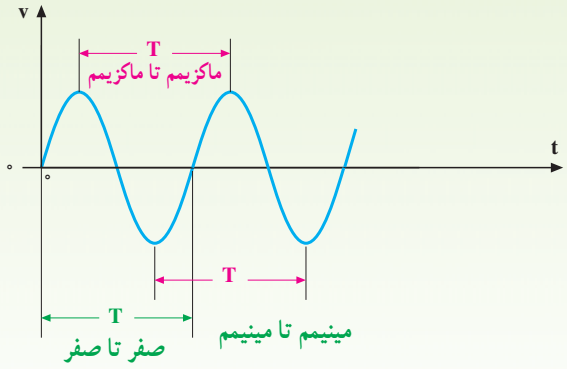
روش اوّل ــ زمان تناوب را می‌توان از یکی از صفرها در سیکل اول تا صفر مشابه در سیکل دوم اندازه گرفت.

روش دوم ــ زمان تناوب را می‌توان بین دو پیک

(ماکزیمم) مثبتِ متوالی اندازه گرفت.

روش سوم ــ زمان تناوب را می‌توان بین دو پیک (ماکزیمم) منفیِ متوالی اندازه گرفت.

شکل ۷ــ۱۳ سه روش اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

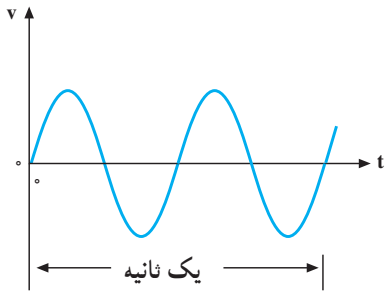


شکل ۷ــ۱۳

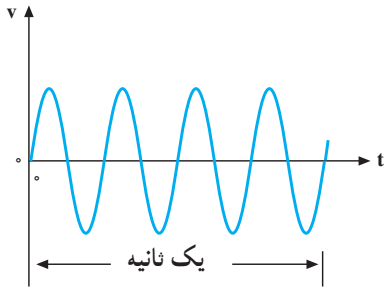
۶ــ۱۳ــ فرکانس

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)[1] یا اصطلاحاً **هرتز** (Hz) می‌نامند. هرچه تعداد سیکل‌ها در ثانیه بیش‌تر باشد، فرکانس بیش‌تر است. شکل ۸ــ۱۳ 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.



(الف) فرکانس کم‌تر



(ب) فرکانس بیش‌تر

شکل ۸ــ۱۳ــ نمایش فرکانس

مقدار فرکانس با توجه به کاربرد آن مقادیر خاصی دارد ؛ مثلاً فرکانس برق شهر در ایران ۵۰ هرتز یا ۵۰cps است. یعنی برق شهر در ایران ۵۰ سیکل کامل را در یک ثانیه طی می‌کند. فرکانس برق در بعضی از کشورها ۶۰ هرتز (۶۰cps) 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 :

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{هرتز}$$

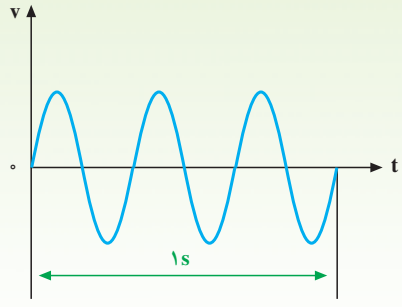
$$T = \frac{1}{f} \quad \text{ثانیه}$$

با توجه به این روابط، هرقدر 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 ۹ــ۱۳

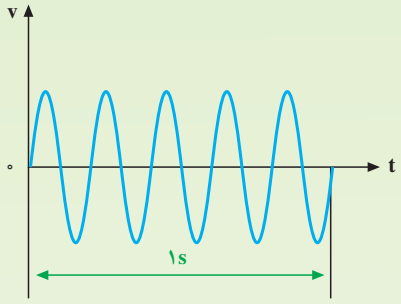
الف ــ فرکانس کدام موج بیش‌تر است؟

ب ــ مقادیر زمان تناوب و فرکانس را حساب کنید.



(الف)

۱ ــ cps مخفف کلمات cycle per second و به معنای سیکل بر ثانیه است.



(ب)

شکل ۹ــ۱۳

راه حل: موج الف ۳ سیکل و موج ب ۵ سیکل را در ۱ ثانیه طی کرده‌اند. پس فرکانس موج ب بیش‌تر است.

موج الف: $T = \frac{۱}{۳} \cong ۰/۳۳$ ثانیه و $f = ۳Hz$

موج ب: $T = \frac{۱}{۵} = ۰/۲$ ثانیه و $f = ۵Hz$

در صنعت برای زمان تناوب از واحدهای کوچک‌تر و برای فرکانس از واحدهای بزرگ‌تر استفاده می‌کنند. این واحدها به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$T \begin{cases} ۱ms = ۱۰^{-۳}s & \text{یک میلی ثانیه} \\ ۱\mu s = ۱۰^{-۶}s & \text{یک میکرو ثانیه} \\ ۱ns = ۱۰^{-۹}s & \text{یک نانوثانیه} \end{cases}$$

$$f \begin{cases} ۱kHz = ۱۰^{۳}Hz & \text{یک کیلوهرتز} \\ ۱MHz = ۱۰^{۶}Hz & \text{یک مگا هرتز} \\ ۱GHz = ۱۰^{۹}Hz & \text{یک گیگاهرتز} \end{cases}$$

مثال ۴: اگر زمان تناوب یک موج سینوسی ۱۰ میلی ثانیه باشد، فرکانس آن‌چه‌قدر است؟

حل: $f = \frac{۱}{T} = \frac{۱}{۱۰\times۱۰^{-۳}(s)} = ۱۰۰Hz$

مثال ۵: فرکانس یک موج سینوسی ۶۰ هرتز است. زمان تناوب آن چه‌قدر است؟

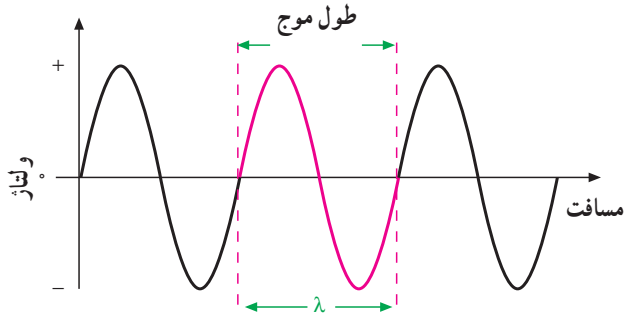
حل: $T = \frac{۱}{f} = \frac{۱}{۶۰Hz} = ۱۶/۶۷(ms)$

۷ــ۱۳ــ 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 ۱۰ــ۱۳). 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 λ (لاندا) نمایش می‌دهند و رابطه‌ی آن به صورت زیر است.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f}$$

$C = \upsilon$ سرعت نور یا امواج الکترومغناطیسی، یعنی ۳×۱۰^{۸} متر بر ثانیه و f فرکانس بر حسب هرتز و λ برحسب متر است.



شکل ۱۰ــ۱۳ــ نمایش طول موج در یک موج سینوسی

مثال ۶: طول موج یک صدا با فرکانس ۱۰۰Hz که به وسیله‌ی بلندگویی پخش می‌شود، چه‌قدر است؟ (سرعت صوت ۳۴۰m/sec فرض شود.)

حل:

$V = ۳/۴\times۱۰^{۲}$ متر/ ثانیه

$f = ۱۰۰Hz$

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{۳/۴\times۱۰^{۲}}{۱۰۰} = ۳/۴\ (m)$$

مثال ۷: طول موج یک موج رادیویی با فرکانس ۳ گیگاهرتز چه‌قدر است؟

$$c = ۳\times۱۰^{۸} \quad m/s$$

$$f = ۳\times۱۰^{۹} \quad Hz$$

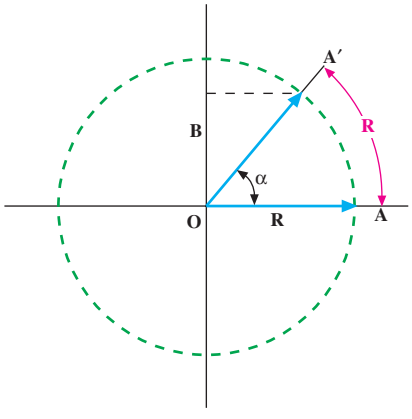
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{۳\times۱۰^{۸}}{۳\times۱۰^{۹}} = ۰/۱m = ۱۰(cm)$$

۸ــ۱۳ــ سرعت زاویه‌ای

سرعت را با مقدار مسافتی که یک متحرک در واحد زمان طی می‌کند، می‌سنجند؛ مثلاً وقتی می‌گویند سرعت یک اتومبیل ۸۰ کیلومتر برساعت 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 اُمگا (ω) نشان می‌دهند.

برای محاسبه‌ی سرعت زاویه‌ای (ω)، شکل ۱۱ــ۱۳ را ــ که دایره‌ای به شعاع R است ــ در نظر می‌گیریم. در این شکل، متحرک A′ از نقطه‌ی A روی محیط دایره حرکت می‌کند. هرگاه مسافتی از محیط دایره ــ که به اندازه‌ی شعاع (R) است ــ پیموده شود، یک رادیان پیموده شده است.



شکل ۱۱ــ۱۳ــ نمایش سرعت زاویه‌ای و مسافت طی شده نسبت به زمان

زاویه‌ای را که متحرک از A تا A′ پیموده است، با α نمایش می‌دهند. در صورتی که AA′ برابر R باشد، مقدار زاویه‌ی α برابر یک رادیان یا ۵۷/۳° خواهد بود.

زاویه‌ای را که در واحد زمان طی شود، با ω 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 α مسافت‌های پیموده شده برحسب متر و رادیان می‌باشند.

زاویه‌ی پیموده شده در یک دور کامل ــ یعنی در زمان یک پریود ــ برابر ۳۶۰ درجه یا ۲π رادیان است. در این صورت، رابطه‌ی سرعت زاویه‌ای برابر است با

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{۲\pi(Rad)}{T(sec)}$$

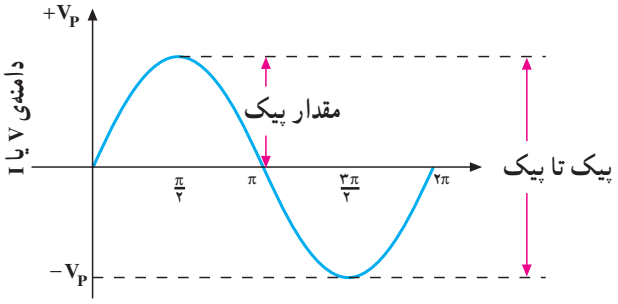
از طرفی، می‌دانیم، $T = \frac{۱}{f}$. پس

$$\omega = \frac{۲\pi}{T} = ۲\pi f$$

۹ــ۱۳ــ 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 اوّلین 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 ۱۲ــ۱۳ 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 منفیِ شکل موج است. در موج سینوسی مقدار پیک برابر $\frac{۱}{۲}$ پیک تا پیک است. با استفاده از اسیلوسکوپ می‌توان مقادیر پیک و پیک تا پیک را اندازه گرفت.

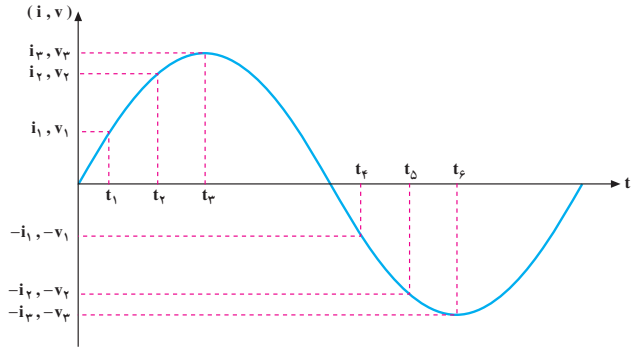


شکل ۱۲ــ۱۳

۱۰ــ۱۳ــ مقادیر لحظه‌ای

طبق شکل موج نشان داده شده در شکل ۱۳ــ۱۳ ولتاژ یا جریان، در هر زمان مقادیر خاص خود را دارند که به آن‌ها **مقادیر لحظه‌ای** یا **دامنه** می‌گویند. بدیهی است که در تناوب مثبت، مقادیر لحظه‌ای مثبت و در تناوب منفی، مقادیر لحظه‌ای منفی خواهد بود.

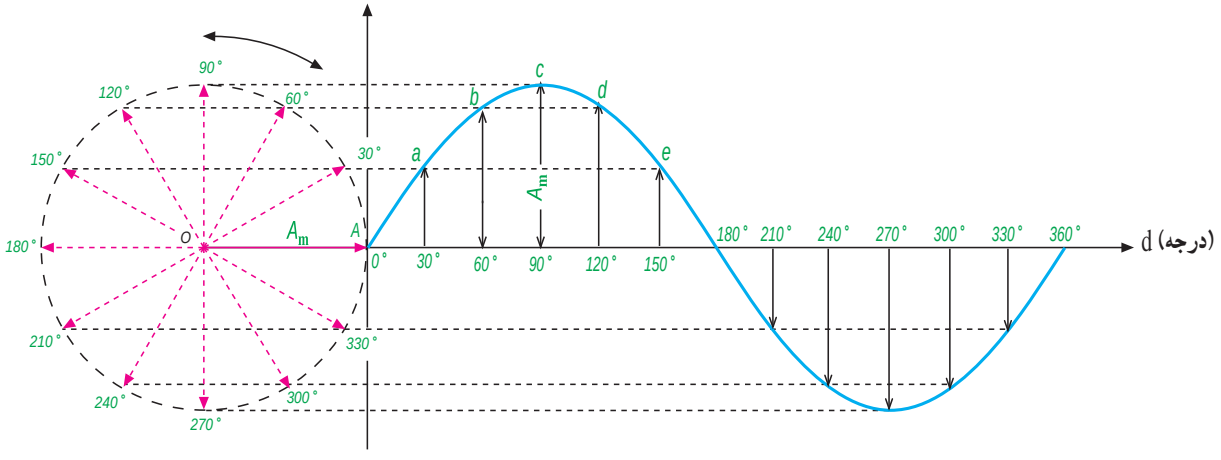
مقادیر لحظه‌ای را با حروف کوچک v و i نشان می‌دهند. گاهی ممکن است که به دانستن مقدار لحظه‌ای یک ولتاژ یا جریان نیاز داشته باشیم. در اغلب موارد هیچ کدام از مقادیر پیک تا پیک یا لحظه‌ای قادر نیستند اندازه‌ی واقعی ولتاژ یا جریان را بیان کنند و به جای آن‌ها اغلب از دو مقدار دیگر به نام‌های مقدار متوسّط (Average) و مقدار مؤثر (Effective) استفاده می‌کنند.



شکل ۱۳ــ۱۳ــ نمایش مقادیر لحظه‌ای

۱۱ــ۱۳ــ معادله‌ی زمانی جریان یا ولتاژ سینوسی

همان‌گونه که آموختید در اثر گردش یک سیم‌پیچ با قاب مستطیل شکل در میدان مغناطیسی آهن‌ربای دائم، ولتاژی روی سیم‌پیچ القا یا تولید می‌شود. شکل موج این ولتاژ در لحظات مختلف در شکل ۱۴ــ۱۳ ترسیم شده است.



شکل ۱۴ــ۱۳ــ نمایش موج سینوسی ولتاژ

شعاع دایره یعنی OA با ماکزیمم دامنه‌ی موج ایجاد شده برابر است. با گردش سیم‌پیچی OA و طی ۳۰ درجه، ولتاژ القا شده دامنه‌ای برابر a تا محور افقی دارد و در ۶۰ درجه، دامنه‌ی ولتاژ برابر b تا محور افقی خواهد بود. پس با توجه به زاویه‌ی چرخش $\alpha = 30^\circ$ 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 :

$$a = A_m \sin\alpha$$

$$U = U_{max} \sin\alpha \quad \text{یا}$$

قبلاً دانستیم که $\alpha = \omega t$

پس $U = U_{max} \sin\omega t$

معادله‌ی جریان نیز به همین صورت اثبات می‌شود ؛ یعنی :

$$i = I_{max} \sin\omega t$$

یا $i = I_{max} \sin\alpha$

مثال ۸ : معادله‌ی ولتاژ متناوبی را بنویسید که فرکانس آن ۶۰ هرتز و ماکزیمم ولتاژ آن ۱۵۶ ولت باشد.

حل: سرعت زاویه‌ای ω برابر با $2\pi f$ است. پس :

$$\omega = 2\pi f = 2 \times 3/14 \times 60$$

$$\omega = 376/8 \text{Rad/sec} \cong 377 \text{Rad/sec}$$

$$U_{max} = 156 V$$

$$U = U_{max} \sin\omega t$$

$$U = 156 \sin 377 t$$

مثال ۹ : مقدار لحظه‌ای ولتاژ مثال شماره‌ی ۸ را در پایان $t = 0/002$ ثانیه به دست آورید.

حل:

$$U = 156 \sin 377 t$$

$$t = 0/002 \text{sec}$$

$$U = 156 \sin 377 \times 0/002$$

$$U = 156 \sin 0/754$$

چون ωt بر حسب رادیان و هر رادیان برابر ۵۷/۳ درجه است، پس

$$U = 156 \sin(0/754 \times 57/3^\circ)$$

$$U = 156 \sin 43/2^\circ$$

با استفاده از جدول مثلثاتی

$$\sin 43/2^\circ \cong 0/685$$

$$U = 156 \times 0/685 \cong 107 \quad \text{ولت}$$

۱۲ــ۱۳ــ مقدار متوسط (Average) موج سینوسی

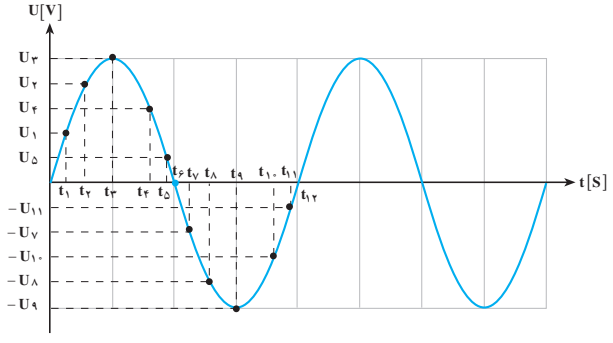
مقدار متوسط یک ولتاژ یا جریان متناوب ؛ میانگین مقادیر لحظه‌ای آن موج در یک دوره تناوب است.

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 بر۲ تقسیم کرد و یا برای محاسبه میانگین بین سه عدد ۱۰، ۱۸ و ۱۷ 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 ۱۵ــ۱۳ 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.



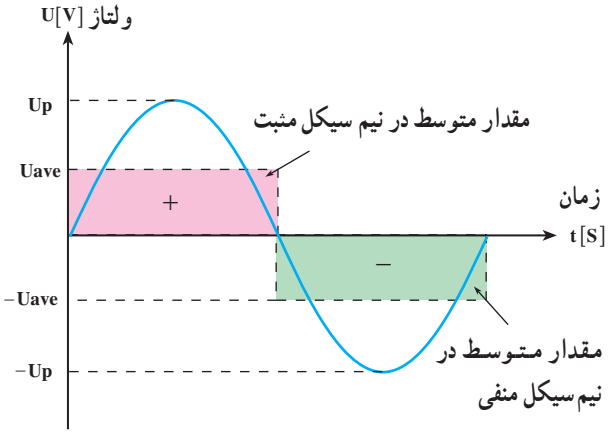
شکل ۱۵ــ۱۳

نکته: هر قدر تعداد نقاط بیش‌تر باشد، مقدار میانگین محاسبه شده دقیق‌تر است.

$$U_{av}^{+} = \frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6}{6}$$ (میانگین مقادیر لحظه‌ای نیم سیکل مثبت)

$$U_{av}^{-} = \frac{(-U_7) + (-U_8) + (-U_9) + (-U_{10}) + (-U_{11}) + (-U_{12})}{6}$$ (میانگین مقادیر لحظه‌ای نیم سیکل منفی)

مقدار متوسط هر یک از نیم سیکل‌های یک موج سینوسی در شکل ۱۶ــ۱۳ نشان داده شده است مساحت زیر هر نیم‌سیکل با مساحت مقدار متوسط در همان نیم سیکل برابر است.

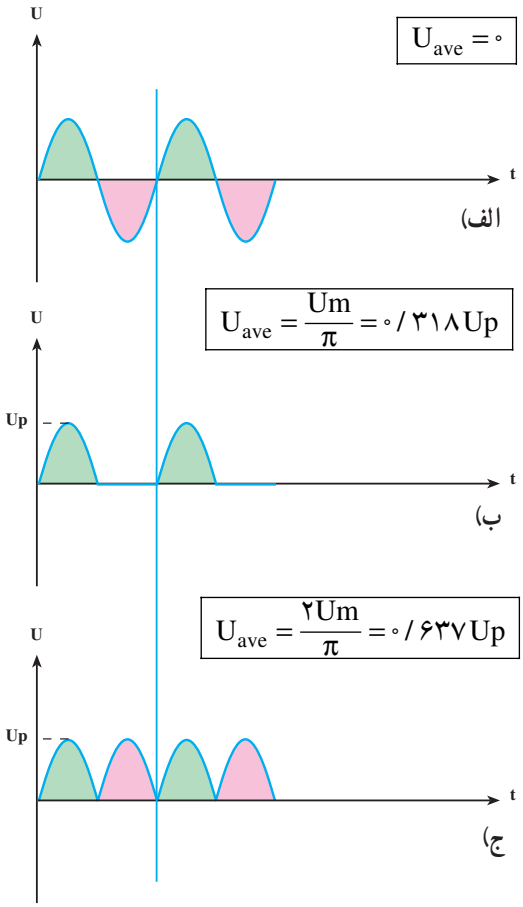


شکل ۱۶ــ۱۳

همان‌طوری که از شکل ۱۶ــ۳ مشخص است مقدار متوسط در یک سیکل کامل که از جمع دو نیم‌سیکل به‌دست می‌آید که مقدار آن مساوی صفر می‌شود.

$$U_{ave} = U_{ave}^{+} + U_{ave}^{-} = 0$$

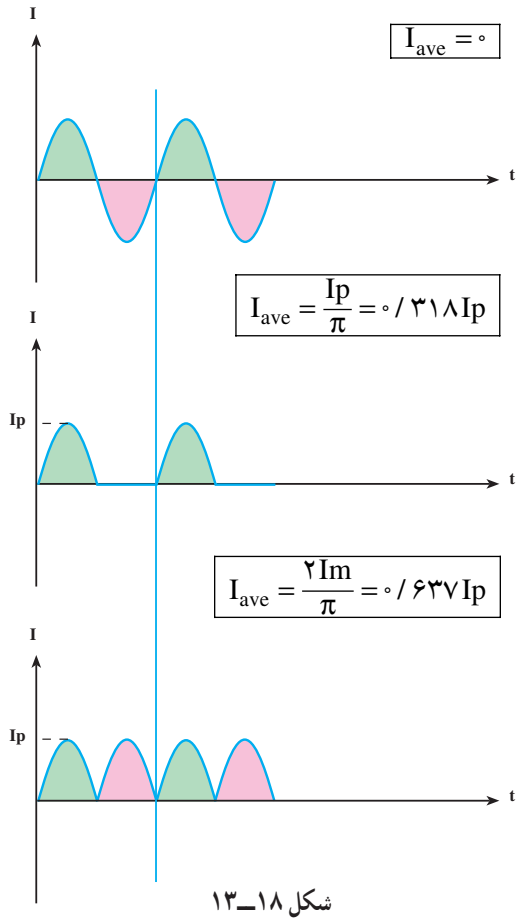
هرگاه شکل موج‌هایی به صورت امواج نشان داده شده در شکل ۱۷ــ۱۳ داشته باشیم و بخواهیم مقدار متوسط هر یک از آن‌ها را حساب کنیم می‌توانیم از روابط نوشته شده در مقابل آن‌ها استفاده کنیم[1].



شکل ۱۷ــ۱۳

لازم به ذکر است برای محاسبه مقدار متوسط شکل موج جریان نیز به همین ترتیب و بر پایه این روابط می‌توان عمل کرد یعنی :

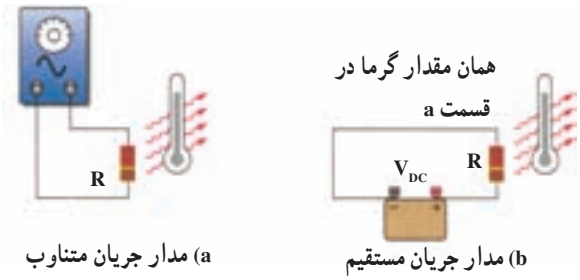
۱ــ با چگونگی محاسبه و زمینه کاربرد مقدار متوسط در مباحث الکتریکی و الکترونیکی سال‌های بعد آشنا خواهید شد.



شکل ۱۸ــ۱۳

۱۳ــ۱۳ــ مقدار مؤثّر (Rms[1]) موج سینوسی

مقدار مؤثّر 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 مصرف‌کننده برابر اثر حرارتی جریان AC مورد نظر باشد، مقدار مؤثر (Effective) آن جریان AC می‌گویند.

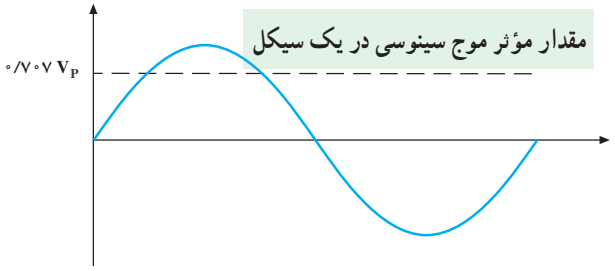


a) مدار جریان متناوب

b) مدار جریان مستقیم

شکل ۱۹ــ۱۳

ولتاژ مؤثّر در یک موج سینوسی برابر ۰/۷۰۷ یا $\frac{۱}{\sqrt{۲}}$ مقدار ماکزیمم است (شکل ۲۰ــ۱۳).



شکل ۲۰ــ۱۳ــ مقدار مؤثّر (Rms) یک موج سینوسی کامل ۰/۷۰۷ مقدار پیک موج است.

$$U_{مؤثر} = U_{rms} = U_{eff} = U_e = \frac{۱}{\sqrt{۲}} U_p \cong ۰/۷۰۷ U_P$$

$$I_{مؤثر} = I_{rms} = I_{eff} = I_e = \frac{۱}{\sqrt{۲}} I_p \cong ۰/۷۰۷ I_P$$

مثال ۱۰: مقدار مؤثّر ۲۰ ولت پیک تا پیک را به دست آورید.

راه حل: ابتدا آن را بر ۲ تقسیم کرده و سپس در ۰/۷۰۷ ضرب می‌کنیم. بنابراین :

$$U_p = \frac{۱}{۲} U_{p-p} = \frac{۱}{۲} \times ۲۰ = ۱۰V$$

$$U_e = ۱۰ U_P \times ۰/۷۰۷ = ۷/۰۷ \quad \text{ولت}$$

در محاسبه‌ها، فرمول کلی را به صورت :

$$U_p = \sqrt{۲} U_e \quad \text{یا} \quad U_e = \frac{U_P}{\sqrt{۲}} = \frac{U_P}{۱/۴۱}$$

می‌نویسند. چنان‌چه فرمول U_e برحسب ولتاژ پیک تا پیک نوشته شود، مقدار آن برابر با $U_{P-P} = ۲/۸۲۸ V_{rms}$ خواهد بود.

مثال ۱۱: مقدار پیک تا پیک ولتاژ ۲۲۰ ولت (برق شهر) چند ولت است؟

راه حل:

$$U_e = \frac{U_P}{\sqrt{۲}}$$

۱ــ Rms مخفف کلمات Root mean Square به معنای جذر میانگین مربّعات است.

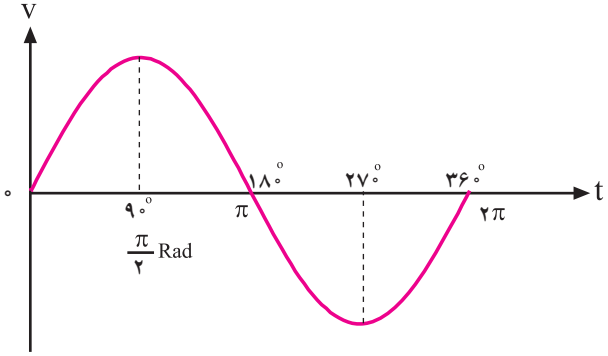
$U_P = U_e \cdot \sqrt{2} = ۲۲۰ \times ۱/۴۱ = ۳۱۱$ ولت

$U_{P-P} = ۲U_P = ۲ \times ۳۱۱ = ۶۲۲$ ولت

۱۴ــ۱۳ــ اختلاف فاز و زاویه فاز در امواج سینوسی[۱]

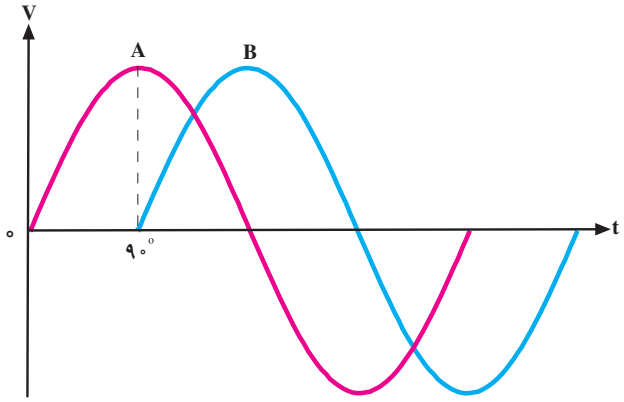
در الکتریسیته موقعیت زمانی یک کمیت الکتریکی را نسبت به یک مبدأ فاز (phase) می‌گویند.

فاز یک موج سینوسی، مقدار زاویه‌ای است که موقعیت یک موج سینوسی را نسبت به مبدأ مشخص می‌کند. در شکل ۲۱ ــ۱۳، یک سیکل کامل از یک موج سینوسی نشان داده شده است. در شکل موج نشان داده شده، نقطه O مبدأ حرکت و نقطه ۹۰ درجه نقطه ماکزیمم دامنه‌ی شکل موج در جهت مثبت است. در نقطه ۱۸۰ درجه مقدار دامنه به صفر می‌رسد در نقطه ۲۷۰ درجه مقدار ولتاژ در جهت منفی ماکزیمم می‌شود و در زاویه ۳۶۰ درجه یا ۲π رادیان مقدار دامنه به صفر می‌رسد. وقتی شکل موج سینوسی نسبت به شکل موج مبدأ به سمت چپ یا راست جابه جا شود، فاز به وجود می‌آید.



شکل ۲۱ــ۱۳ ــ یک سیکل کامل از موج سینوسی

در شکل ۲۲ــ۱۳ شکل موج سینوسی B به اندازه ۹۰ درجه یا $\frac{\pi}{۲}$ رادیان نسبت به شکل ولتاژ مبدأ به سمت راست جابه‌جا شده است. بنابراین بین شکل موج A و شکل موج B یک زاویه فاز یا اختلاف فاز ۹۰ درجه به وجود آمده است.

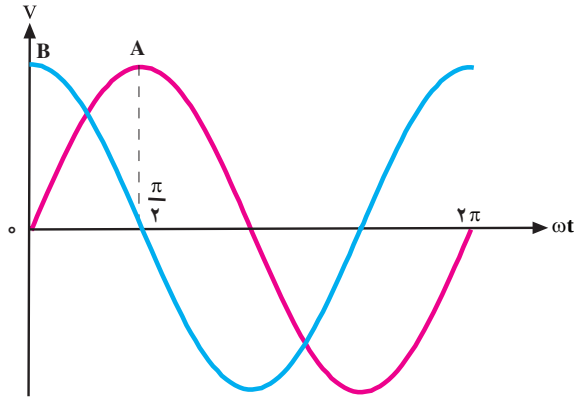


شکل ۲۲ــ۱۳ ــ بین شکل موج A و شکل موج B، $\frac{\pi}{۲}$ رادیان یا ۹۰° اختلاف فاز وجود دارد.

در این شکل موج چون پیک ولتاژ (حداکثر دامنه ولتاژ) موج سینوسی B، بعد از پیک ولتاژ شکل موج سینوسی A به‌وجود آمده است لذا می‌توان گفت که شکل موج سینوسی B، نسبت به شکل موج سینوسی A ۹۰ درجه تأخیر فاز (پس فاز) دارد یا شکل موج A نسبت به B، ۹۰ درجه تقدم فاز (پیش فاز) دارد.

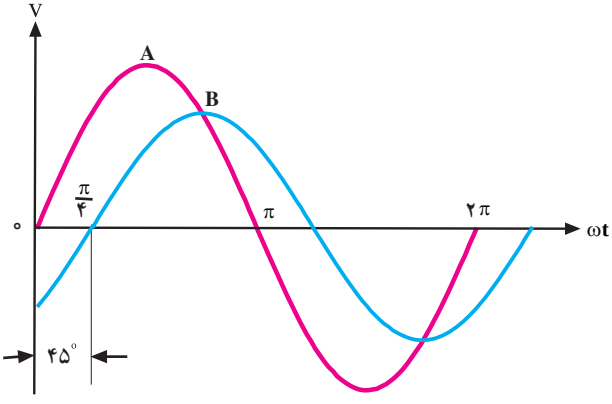
در شکل۲۳ــ۱۳ شکل موج سینوسی B، به اندازه ۹۰ درجه ($\frac{\pi}{۲}$ رادیان) به سمت چپ شیفت پیدا کرده و دامنه‌ی شکل موج سینوسی B، زودتر از دامنه‌ی شکل موج سینوسی A به ماکزیمم رسیده است، لذا شکل موج سینوسی B نسبت به شکل موج سینوسی A به اندازه ۹۰ درجه یا $\frac{\pi}{۲}$ رادیان تقدم فاز دارد یا شکل موج سینوسی A نسبت به شکل موج سینوسی B، ۹۰ درجه تأخیر فاز دارد به مقدار فاز بین دو شکل موج سینوسی **اختلاف فاز** نیز می‌گویند.

۱ ــ Phase sine wave



شکل ۲۳ــ۱۳ ــ شکل موج سینوسی B نسبت به شکل موج سینوسی A تقدم فاز دارد (جلوتر است).

در شکل ۲۴ــ۱۳ اختلاف فاز بین دو شکل موج سینوسی، ۴۵ درجه است.

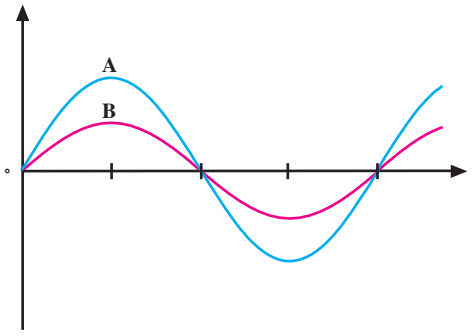


شکل ۲۴ــ۱۳ ــ اختلاف فاز بین دو شکل موج A و B برابر ۴۵ درجه است.

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.

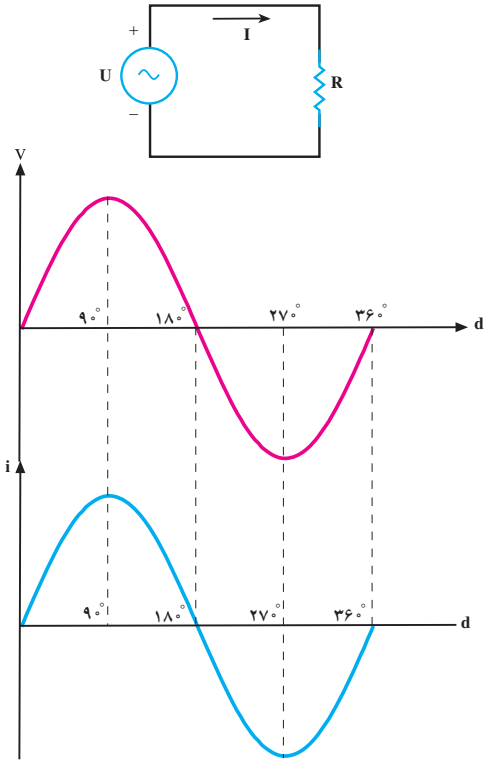
شکل ۲۵ــ۱۳ دو موج A و B را نشان می‌دهد که نسبت به هم اختلاف فاز ندارند و یا به عبارتی دیگر دو موج A و B هم‌فاز هستند.



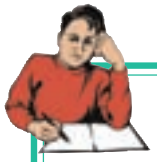
شکل ۲۵ــ۱۳ ــ شکل موج A و B با هم هم فاز هستند.

۱۵ــ۱۳ــ منحنی ولتاژ و جریان در یک مقاومت اهمی

همان‌طوری 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 ۲۶ــ۱۳ بین شکل موج ولتاژ و شکل موج جریان هیچ‌گونه اختلاف فازی وجود ندارد یا به عبارتی دیگر هم‌فاز هستند.



شکل ۲۶ــ۱۳



پرسش

۱ــ هر یک از مفاهیم زیر را تعریف کنید.

ولتاژ ثابت، ولتاژ متناوب، فرکانس، زمان تناوب، مقدار مؤثر و متوسط یک موج سینوسی

۲ــ دو سیکل کامل یک موج دندانه ارّه‌ای و مربّعی را که دارای مقدار پیک تا پیک ۴۰ ولت است، رسم کنید.

۳ــ مقدار ولتاژ پیکِ یک موج سینوسی برابر با یک ولت است مقدار مؤثر، متوسط، پیک تا پیک ولتاژ را به دست آورید.

۴ــ با رسم سه موج سینوسی، اختلاف زاویه‌ی آن‌ها را که اوّلی نسبت به دومی ۳۰ درجه جلوتر و دومی نسبت به سومی ۴۵ درجه جلوتر است، نشان دهید.

۵ــ مقدار ولتاژ لحظه‌ای برق شهر را که دارای فرکانس ۵۰ هرتز و مقدار مؤثر ۲۲۰ ولت است، در زاویه‌های صفر، ۳۰، ۴۵، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰، ۳۶۰ درجه پیدا کنید.

۶ــ زاویه‌ی فاز 90° برابر با چند رادیان است؟

۷ــ منبع ولتاژ ۲۲۰ ولت AC را به یک مقاومت ۲۰ اهمی اتّصال داده‌ایم ؛

الف) مقدار جریان rms در مقاومت را محاسبه کنید.

ب) فرکانس جریان برق چه‌قدر است؟ اگر $\omega = 100$ 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 مؤثّر در این مقاومت حرارت تولید شود؟

۸ــ فرکانس امواج (AC) زیر چه‌قدر است؟

الف ــ ده سیکل در یک ثانیه

ب ــ یک سیکل در $\frac{1}{10}$ ثانیه

پ ــ ۵۰ سیکل در یک ثانیه

ت ــ ۵۰ سیکل در ۵ ثانیه

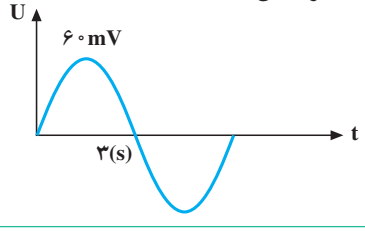
۹ــ پریود T را برای فرکانس‌های زیر محاسبه کنید.

الف ــ ۵۰۰ هرتز (Hz)

ب ــ ۵ مگا هرتز (MHz)

پ ــ ۵ گیگاهرتز (GHz)

۱۰ــ در شکل ۲۷ــ۱۳ مقادیر U_{rms} ، پریود (T) و فرکانس را محاسبه کنید.



شکل ۲۷ــ۱۳

۱ــ جریان متناوبی دارای ماکزیمم مقدار ۲۰A است، معادله‌ی زمانی آن‌را بنویسید و مقدار لحظه‌ای آن را در موقعی که زاویه‌ی α برابر با 18°، 67°، 136°، 242° و 326° درجه باشد، مشخص کنید.

۲ــ مقدار لحظه‌ای نیروی محرّکه‌ی جریان متناوبی در 17° برابر با ۳۴/۲ ولت است. مقدار ماکزیمم آن چه‌قدر است؟

(جواب : ۱۱۶/۹۷ ولت)

۳ــ مقدار لحظه‌ای نیروی محرکه‌ی متناوبی در ۳۳۴/۴ درجه برابر با ۱۹۰− ولت است. مقدار ماکزیمم آن را به دست آورید.

(جواب : ۴۳۹/۸ ولت)

۴ــ مقدار لحظه‌ای ولتاژ متناوب سینوسی را در 2π رادیان به دست آورید ؛ در صورتی که مقدار ماکزیمم ولتاژ آن ۱۶۵ ولت باشد.

(جواب : صفر)

۵ــ سیم‌پیچی در داخل میدان مغناطیسی دارای حرکت دورانی است. در چه زاویه‌ای مقدار ولتاژ لحظه‌ای ۰/۷ برابر مقدار ماکزیمم خواهد بود؟

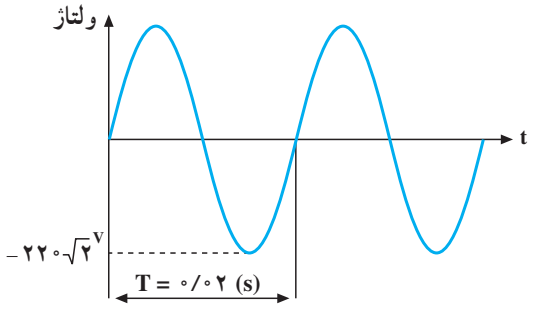
(جواب : تقریباً 45°)

۶ــ جریانی به معادله‌ی $i = 10\sin\omega t$ از یک مقاومت ۱۰ اهمی عبور می‌کند. معادله‌ی ولتاژ آن را بنویسید.

(جواب : $v = 100\sin\omega t$)

۷ــ مقدار ولتاژ منحنی شکل ۲۸ــ۱۳ را در $\frac{T}{2}$ حساب کنید. فرکانس و مقدار مؤثر آن چه‌قدر است؟

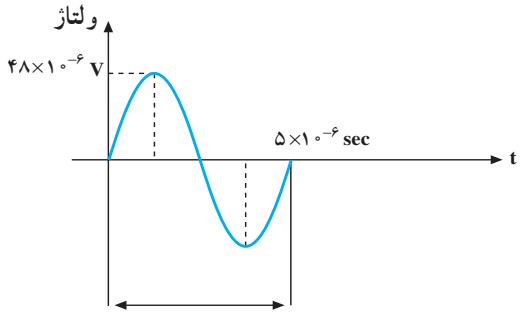
(جواب: ۰V ، ۵۰ هرتز ، ۲۲۰ ولت)



شکل ۲۸ــ۱۳

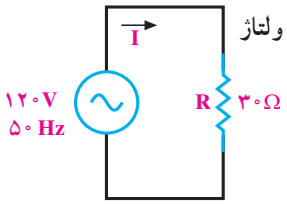
۸ــ مطلوب است محاسبه‌ی مقادیر مؤثر، زمان تناوب، فرکانس و دامنه P-P شکل ۲۹ــ۱۳.

(جواب : $33/9\mu V$ – 5×10^{-6} se – ۲۰۰KHz – $96\mu V$)



شکل ۲۹ــ۱۳

۹ــ در مدار شکل ۳۰ــ۱۳ شکل موج منبع سینوسی است. مقادیر I_t ، V_{max} ، V_{P-P} ، V_{ave} ، I_{max} ، I_{P-P} ، I_{ave} و توان (P) را در مقاومت R به‌دست آورید.



شکل ۳۰ــ۱۳

فصل چهاردهم

بوبین (سلف)

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ بوبین را تعریف کند و انواع آن را نام ببرد.

۲ــ میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب را شرح دهد.

۳ــ خودالقا را تعریف کند.

۴ــ مقدار و جهت نیروی محرکه‌ی الکتریکی خودالقا را توضیح دهد.

۵ــ قانون لنز را تعریف کند.

۶ــ ضریب خودالقا و عوامل مؤثّر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.

۷ــ رابطه‌ی اندوکتانس و نیروی ضد محرّکه را توضیح دهد و نیروی ضد محرکه را محاسبه کند.

۸ــ واحد خودالقا را تعریف کند.

۹ــ بوبین ایده‌ال و واقعی را شرح دهد.

۱۰ــ مقاومت خودالقا و عوامل مؤثّر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.

۱۱ــ ثابت زمانی را تعریف و محاسبه کند.

۱۲ــ منحنی‌های ولتاژ داده شده، جریان و نیروی ضد محرکه را تجزیه و تحلیل کند.

۱۳ــ تأثیر هسته‌ی مغناطیسی را در اندوکتانس بیان کند.

۱۴ــ اتّصال سری و موازی بوبین‌ها را توضیح دهد و مقادیر معادل را محاسبه کند.

۱۵ــ القای متقابل و ضریب کوپلاژ را توضیح دهد.

۱۶ــ انرژی ذخیره شده در سلف و عوامل مؤثّر در آن را توضیح دهد و محاسبه کند.

۱ــ۱۴ــ تعریف بوبین

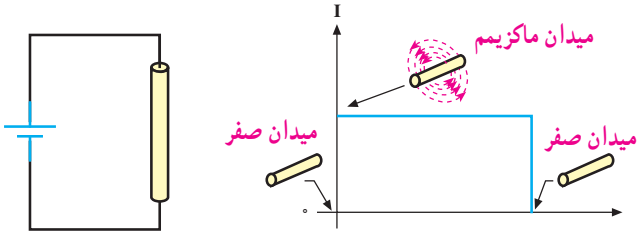
اگر مقداری سیم به دور محور یا هسته‌ای پیچانده شود، بوبین یا سیم‌پیچ به وجود می‌آید. از هسته علاوه بر اثرات القایی ــ به جای تکیه‌گاه ــ جهت پیچاندن و نگهداری سیم استفاده می‌شود. در شکل ۱ــ۱۴ تعدادی بوبین با هسته‌ی هوایی و فلزّی را مشاهده می‌کنید.

بوبین‌هایی را که هسته‌ی فلزّی 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.

شکل ۱ــ۱۴ــ انواع بوبین‌ها با هسته‌های مختلف

۲ــ۱۴ــ میدان مغناطیسی حاصل از یک جریان مستقیم و متناوب

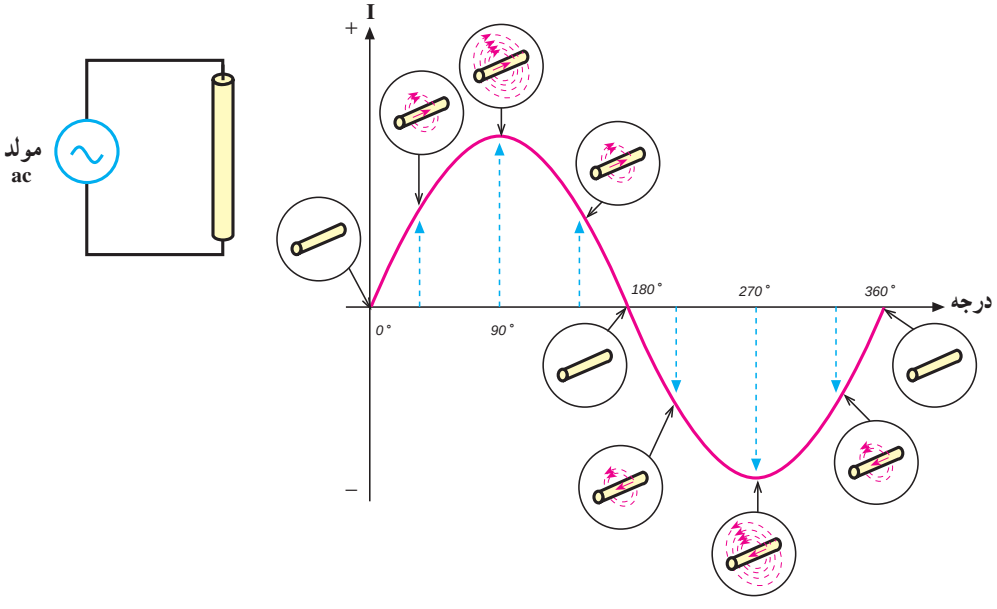
اگر دوسر یک هادی را مطابق شکل ۲ــ۱۴ به جریان مستقیم وصل کنیم، شدّت جریان به طور ناگهانی از صفر به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و میدان مغناطیسی در اطراف هادی نیز به ناگاه از صفر به مقدار ماکزیمم خود افزایش می‌یابد. تا موقعی که جریان در هادی جاری است، میدان در ماکزیمم مقدار خود باقی می‌ماند. چنان‌چه مدار باز شود جریان، صفر شده و میدان نیز به صفر کاهش می‌یابد.



شکل ۲ــ۱۴ــ میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیله‌ی جریان مستقیم

اگر دو سر یک هادی را مطابق شکل ۳ــ۱۴ به یک جریان متناوب وصل کنیم، مقدار جریان و در نتیجه، شدّت 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.



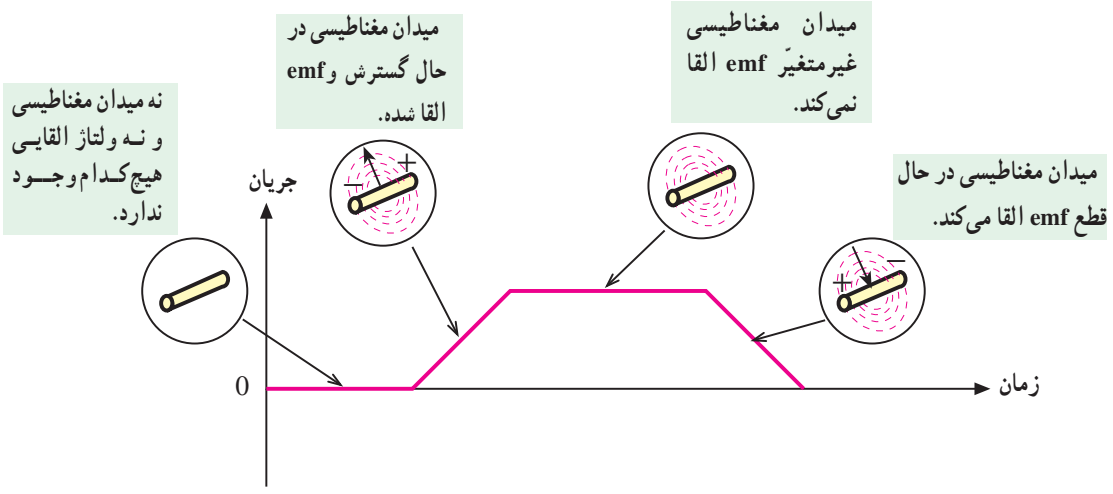
شکل ۳ــ۱۴ــ میدان مغناطیسی حاصل از جریان متناوب

۳ــ۱۴ــ خودالقایی[1]

با طی نیم پریود 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 به‌تدریج 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 محرّکه‌ی الکتریکی (emf)[2] در هادی تولید می‌گردد.

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 خاصیّت 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 ۴ــ۱۴ القای نیروی محرکه را در زمان تغییر جریان نشان می‌دهد.



شکل ۴ــ۱۴ــ نمایش تولید emf

۴ــ۱۴ــ مقدار نیروی محرکه‌ی الکتریکی خودالقا

نیروی محرّکه‌ی الکتریکی القا شده در یک هادی به وسیله‌ی تغییر در شدّت جریان عبوری از آن، همانند هر نیروی محرکه‌ای دارای مقدار و جهت است. از جمله عواملی که مقدار نیروی محرّکه‌ی القا شده را معیّن می‌کند، میزان تغییرات شدّت میدان مغناطیسی است. به طوری که می‌توان نوشت :

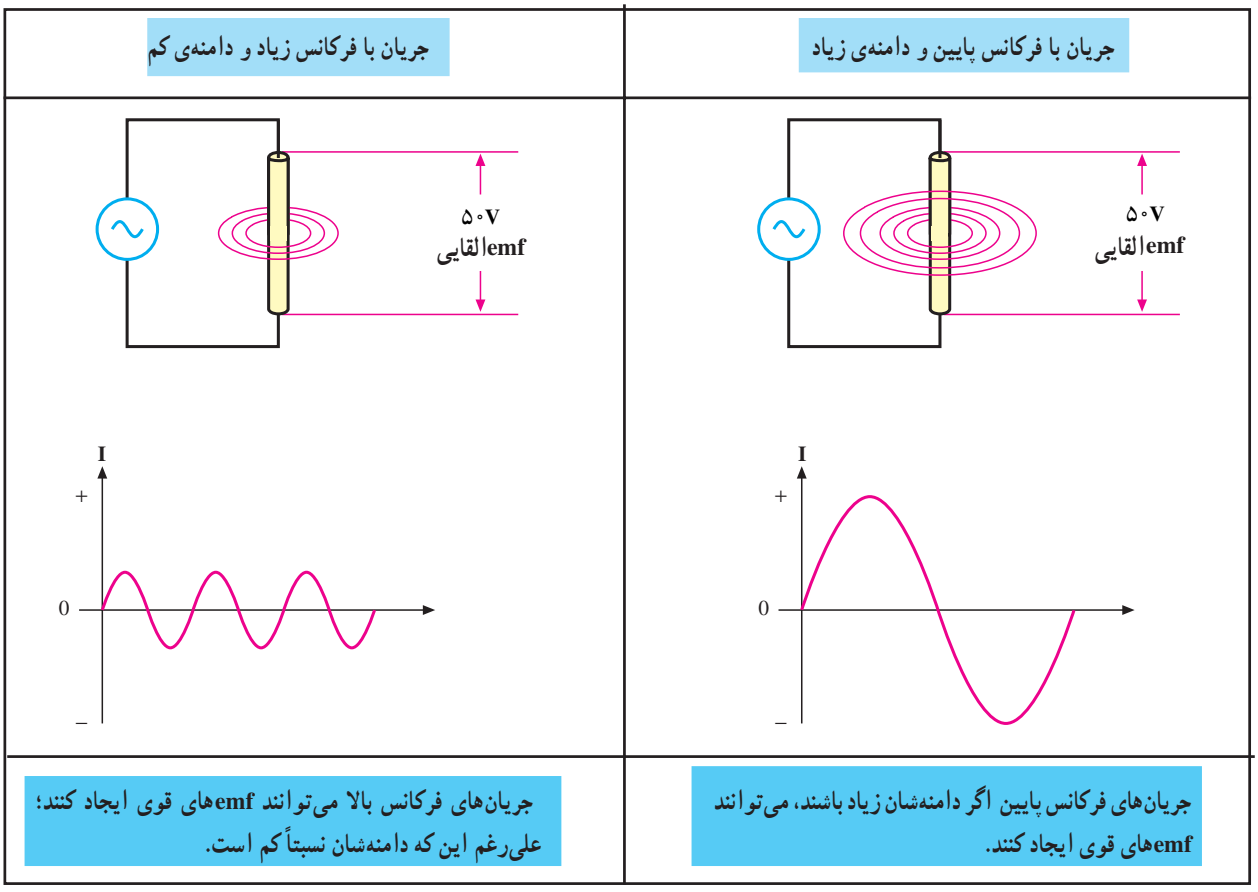
مقدار emf در این رابطه، Φ تغییرات شار مغناطیسی $= \frac{\Phi}{\Delta T}$

و ΔT تغییرات زمان را نشان می‌دهد. شدت میدان مغناطیسی به سرعت تغییرات جریان یا تغییرات فرکانس بستگی دارد ؛ بنابراین مقدار نیروی محرّکه‌ی 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 معیّن می‌کند ؛ یعنی، هر چه شدّت 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 ۵ــ۱۴ عوامل ذکر شده را به خوبی نشان می‌دهد.

۱ــ self-induction

۲ــ Electro motive force یا نیروی الکتروموتوری



شکل ۵ــ۱۴ــ تأثیر دامنه و فرکانس جریان بر مقدار emf القایی

۵ــ۱۴ــ جهت نیروی محرکه‌ی خودالقا

شاید تصوّر شود که پلاریته یا جهت نیروی محرکه‌ی القایی همیشه باید در جهت جریانِ به وجود آورنده‌ی آن باشد. این تصوّر درست نیست. می‌دانیم که افزایش جریان هادی از صفر تا مقدار ماکزیمم، سبب افزایش میدان مغناطیسی و نیروی محرّکه‌ی القایی می‌شود. اگر نیروی محرکه‌ی القا شده در همان جهت جریان باشد، شدّت 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 امّا می‌دانیم که چنین اتّفاقی نمی‌افتد ؛ یعنی جهت نیروی محرکه‌ی القایی همیشه طوری است که اثر آن مخالف با تغییر جهت جریانِ به وجود آورنده‌ی آن است.

۶ــ۱۴ــ قانون لنز

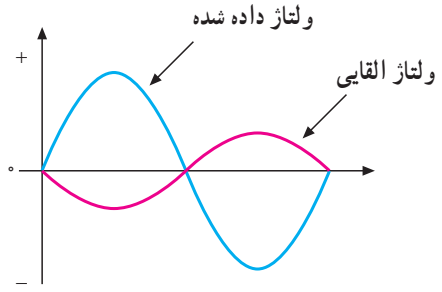
در سال ۱۸۳۴ یک فیزیک‌دان آلمانی به نام **لنز**[۱] قانونی را به جهانیان ارائه داد که بیانگر جهت نیروی محرکه‌ی القایی در یک هادی بود و ما اکنون آن را به نام **قانون لنز** می‌شناسیم.

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

۱ــ نام این فیزیک‌دان آلمانی Heinrich F.E. Lenz است.

افزایش جریان مخالفت می‌کند. شکل ۶ــ۱۴ رابطه‌ی بین ولتاژ یا نیروی محرکه‌ی القا شده را با ولتاژی که باعث ایجاد جریان می‌شود (ولتاژ داده شده)، با اختلاف فاز ۱۸۰ 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 Cemf نمایش می‌دهند. مقدار آن را از رابطه‌ی $Cemf = -\frac{\Phi}{\Delta t}$[1] محاسبه می‌کنند.



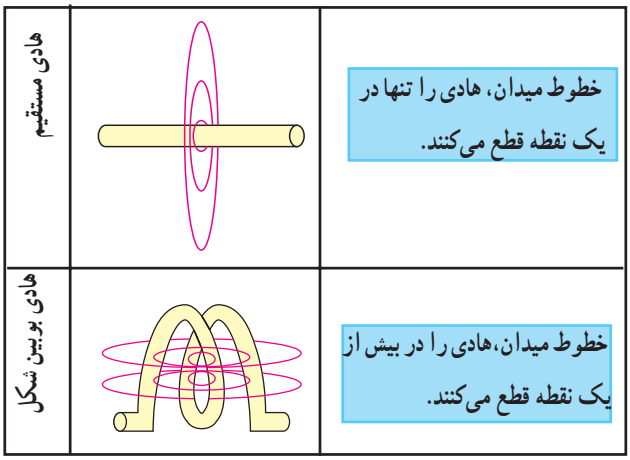
شکل ۶ــ۱۴ــ نیروی محرکه‌ی القایی همیشه با ولتاژ داده شده مخالفت می‌کند.

۷ــ۱۴ــ 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 ضدّ محرکه‌ی القایی ایجاد شده کمک می‌گرفتیم. اکنون اگر یک هادی به صورت بوبین (سیم‌پیچ) باشد اولاً، به دلیل این که طول آن بیش‌تر است، نیروی ضدّ محرّکه‌ی بیش‌تری القا می‌شود. ثانیاً چون هر خط میدان، در بیش از یک نقطه از هادی نیروی ضدّ محرّکه‌ی القایی ایجاد می‌کند، نیروی ضدّ محرّکه‌ی حلقه‌ها به هم کمک کرده نیروی ضدّ محرّکه‌ی قوی‌تری تشکیل می‌شود. هر چه تعداد حلقه‌های یک سیم‌پیچ بیش‌تر باشد، نیروی ضدّ محرّکه‌ی تشکیل شده قوی‌تر خواهد بود. به طوری که می‌توان نوشت: $Cemf = -N\frac{\Phi}{\Delta t}$ که در این رابطه، N تعداد دور سیم‌پیچ است.

شکل ۷ــ۱۴ تأثیر شکل فیزیکی هادی بر خودالقای ایجاد شده را نشان می‌دهد.



اگر هادی بوبین شکل باشد، نیروی ضد محرکه‌ی بیش‌تری بر اثر خودالقا ایجاد می‌گردد.

شکل ۷ــ۱۴ــ نیروی ضد محرکه در یک هادی صاف و یک سیم‌پیچ

۸ــ۱۴ــ 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 ضدّ محرّکه‌ی ایجاد شده در آن به دست می‌آید؛ یعنی:

$$U_{Cemf} = L \times \frac{\text{تغییرات جریان}}{\text{تغییرات زمان}}$$

ضریب مورد بحث ــ یعنی L ــ را که مقدار آن به شکل هادی بستگی دارد، ضریب خودالقا یا اندوکتانس آن هادی می‌گویند. قبلاً گفتیم که نیروی ضدّ محرکه‌ی القا شده در یک سیم‌پیچ، بسیار قوی‌تر از نیروی محرکه‌ی القا شده در یک هادی است؛ زیرا اندوکتانس یک هادی مستقیم بسیار کوچک و اندوکتانس یک سیم‌پیچ ــ بسته به تعداد حلقه‌های آن ــ نسبتاً بزرگ می‌باشد.

۱ــ Counter electro motive force

اندوکتانس در حقیقت یکی از خصوصیت‌های فیزیکی یک هادی یا سیم‌پیچ است امّا اغلب آن را بر اساس تأثیری که بر عبور جریان دارد، تعریف می‌کنند. بنابراین، اندوکتانس عبارت است از خاصیّت هر هادی در مقابل هر تغییر در شدّت جریان عبوری از آن. لذا بدیهی است که اندوکتانس در جریان مستقیم اثری ندارد و تنها اثرش ــ که مخالف با تغییر شدّت جریان است ــ هنگامی ظاهر می‌شود که شدّت جریان متغیر باشد. اندوکتانس در واقع معیاری است برای سنجش این که به ازای هر تغییری در شدت جریان چه مقدار نیروی ضدّ محرکه تولید می‌شود. پس به‌طور کلی، اندوکتانس هر سیم‌پیچ نشان می‌دهد که به ازای یک آمپر در ثانیه تغییر در جریان، چند ولت نیروی محرکه در آن القا می‌گردد.

واحد اندوکتانس هانری[1] 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 ضدّ 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.

$$U_{Cemf} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$[2]

علامت منفی نشان می‌دهد که نیروی ضدّ محرّکه‌ی ایجاد شده، با ولتاژ داده شده در فاز مخالف است.

مثال ۱: در یک بوبین اگر شدّت جریان در یک ثانیه از ۵۰۰ میلی‌آمپر به ۱۰۰ میلی‌آمپر برسد و نیروی ضدّ محرکه‌ای مساوی یک ولت در آن تولید کند، مقدار ضریب خودالقا (اندوکتانس) بوبین را به دست آورید.

راه حل:

$$U_{Cemf} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t} = -L\frac{i_2 - i_1}{t_2 - t_1}$$

$$1V = -L\frac{(0/1 - 0/5)A}{1sec}$$

$$L = \frac{1}{0/4} = 2/5H$$

۹ــ۱۴ــ عوامل مؤثر در ضریب خودالقا (اندوکتانس)

عوامل مؤثّر در ضریب خودالقا یا اندوکتانس یک سلف را به دو دسته تقسیم می‌کنیم :

الف ــ جنس هسته

ب ــ عوامل فیزیکی

الف ــ جنس هسته: همان‌طور که می‌دانیم، اصولاً سلف از یک سیم‌پیچ 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 سیم‌پیچ را به‌راحتی از خود عبور می‌دهند ؛ یعنی قابلیت نفوذپذیری (ضریب‌نفوذ) آن‌ها زیاد است. این مواد را معمولاً مواد **فرومغناطیسی** می‌نامند.

ضریب‌نفوذ هسته را با حرف μ (مو) مشخص می‌کنند. ضریب نفوذ مغناطیسی هسته تعیین کننده‌ی ضعف میدان مغناطیسی در هسته است. ضریب نفوذ مواد (μ) نسبت به ضریب نفوذ هوا (μ_0) سنجیده و به‌صورت $\mu = \mu_r.\mu_0$ بیان می‌شود.

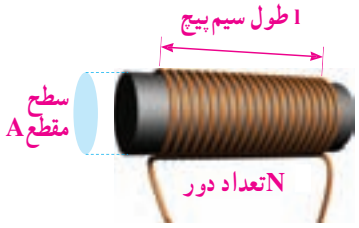
در این رابطه $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\left[\frac{H}{m}\right]$ و μ_r برای مواد فرومغناطیسی بزرگ‌تر از ۱۰۰ و برای مواد غیرمغناطیسی حدود یک است.

ب ــ عوامل فیزیکی: پارامترهای زیر ــ همان‌گونه که در شکل ۸ــ۱۴ نشان داده شده است ــ بر اندوکتانس سلف مؤثّرند.

۱ــ تعداد دور سیم‌پیچ

۲ــ طول سیم‌پیچ

۳ــ سطح مقطع هسته



شکل ۸ــ۱۴ــ پارامترهای مهم در یک سلف

۱ــ ژوزف هانری نام فیزیک‌دان آمریکایی است که همراه با مایکل فاراده خاصیت القایی را کشف کرده است.

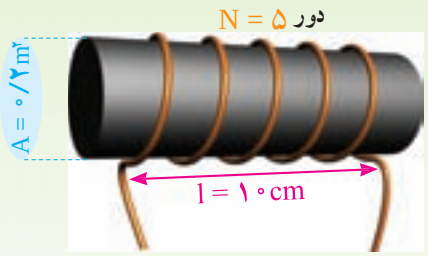
۲ــ Δi و Δt که دلتا آی و دلتا تی تلفظ می‌شود، همان تغییرات شدّت جریان و تغییرات زمان است.

اندوکتانس با توجه به عوامل مؤثّر در آن به صورت زیر نوشته می‌شود.

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

L اندوکتانس بر حسب هانری، μ ضریب نفوذ هسته برحسب هانری بر متر، A سطح مقطع هسته برحسب مترمربع و l طول سیم‌پیچی برحسب متر است.

مثال ۲: با توجه به شکل ۹ــ۱۴ مقدار اندوکتانس بوبین چه قدر است؟



شکل ۹ــ۱۴

راه حل:

$$L = \frac{\mu . A . N^2}{l} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 0/2 \times 5^2}{10 \times 10^{-2}} = 62/8 \mu H$$

۱۰ــ۱۴ــ ثابت زمانی

در یک مدار مقاومتیِ جریان مستقیم، شدّت جریان به طور لحظه‌ای تغییر می‌کند ؛ یعنی، با بستن کلید، جریان به‌طور ناگهانی از صفر به ماکزیمم و با قطع کلید، دفعتاً 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 امّا نیروی ضدّمحرکه‌ی 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 به‌طور آنی به صفر نمی‌رسد ؛ زیرا نیروی ضدّ 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 مدّت زمان رسیدن به این جریان، به وجود می‌آید که به وسیله‌ی کمیّتی به نام ثابت زمانی بیان می‌شود و آن را با حرف τ (تاو) نمایش می‌دهند. برحسب تعریف، ثابت زمانی به مدت زمانی گفته می‌شود که جریان در یک سلف به ۶۳/۲ درصد مقدار ماکزیمم یا مینیمم خود برسد. مقدار ثابت زمانی در یک مدار سلفی به مقدار مقاومت (R) واندوکتانسِ (L) بستگی دارد و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\tau = \frac{L}{R}$$

همان‌گونه 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) برحسب هانری و مقاومت (R) برحسب اهم باشد، ثابت زمانی (τ) برحسب ثانیه به دست خواهد آمد.

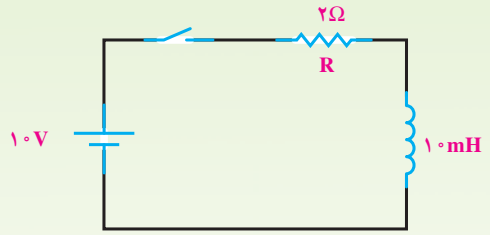
معمولاً ۵ ثابت زمانی طول می‌کشد تا جریان در یک سلف به مقدار ماکزیمم یا مینیمم خود برسد. مقدار درصد افزایش یا کاهش شدّت جریان را در ثابت‌های زمانی مختلف با توجه به منحنی‌های شکل ۱۱ــ۱۴ تحت عناوین صعود و نزول جریان بررسی می‌کنیم.

در ثابت زمانی اوّل جریانی به اندازه‌ی ۶۳/۲ درصد کل جریان نهایی از سیم‌پیچ می‌گذرد. در ثابت زمانی دوم، جریان به ۸۶/۴ درصد می‌رسد. در ثابت‌های زمانی سوم، چهارم و پنجم نیز به همین منوال. به‌طوری که در ثابت زمانی پنجم تقریباً به مقدار حداکثر خود می‌رسد. منحنی ۱۱ــ۱۴ ــ الف روند افزایش جریان‌و مقادیر هر ثابت زمانی را نشان می‌دهد.

۱ــ این فرمول در حالتی صادق است که l از قطر مقطع هسته بسیار بزرگ‌تر باشد.

با قطع جریان در مدار ــ همان گونه که در منحنی شکل ۱۱ــ۱۴ ــ ب مشهود است ــ در ثابت زمانی اوّل 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 ۱۰ــ۱۴ پس از بستن کلید، مدت زمانی را که شدّت جریان به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد، حساب کنید.



شکل ۱۰ــ۱۴

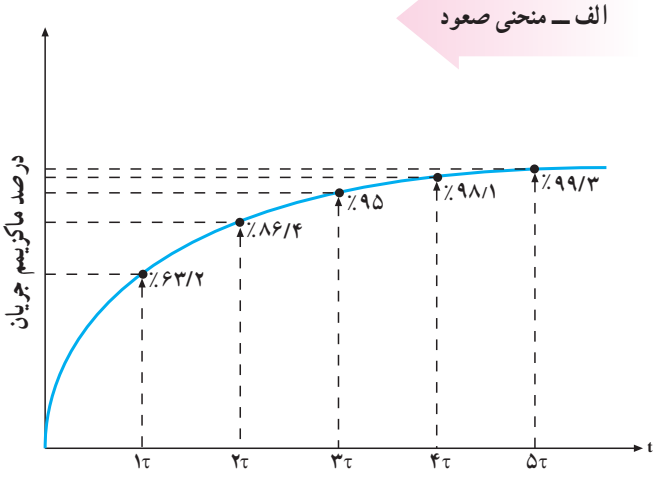
حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{۱۰\times۱۰^{-۳}(H)}{۲(\Omega)} = ۵(ms)$$

$$۵\tau = ۵\times۵ms = ۲۵(ms)$$

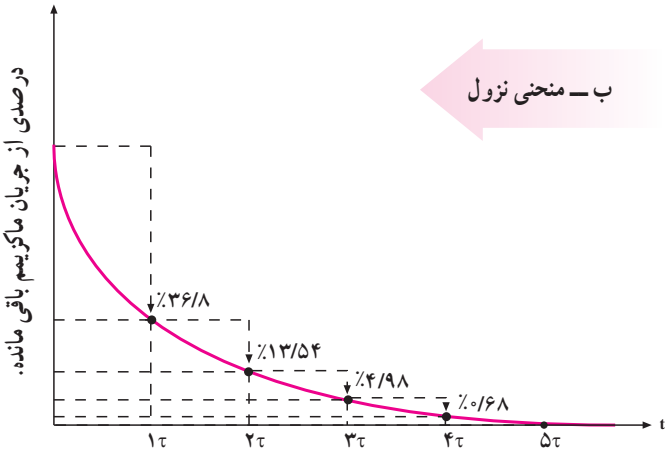
در طول ۵ ثابت زمانی، جریان به ۹۹٪ مقدار ماکزیمم می‌رسد. این مقدار عملاً همان ۱۰۰٪ است.

الف ــ منحنی صعود



در ۵ ثابت زمانی، جریان به کم‌تر از ۱٪ مقدار ماکزیمم سقوط می‌کند. که عملاً همان صفر است.

ب ــ منحنی نزول



شکل ۱۱ــ۱۴ــ منحنی صعود و نزول شدت جریان در مدار سلفی

مثال ۴: در مثال ۳ اگر بوبینی با اندوکتانس ۲۰mH به جای بوبین ۱۰mH قرار گیرد، ثابت زمانی چگونه تغییر می‌کند؟

راه حل:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{۲۰\times۱۰^{-۳}}{۲} = ۱۰(ms)$$

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 اوّل

$$I_۱ = ۱۰\times\frac{۶۳/۲}{۱۰۰} = ۶/۳۲(A)$$

باقیمانده‌ی جریان $۱۰-۶/۳۲ = ۳/۶۸(A)$

افزایش جریان در ثابت زمانی دوم

$$۳/۶۸\times\frac{۶۳/۲}{۱۰۰} = ۲/۳۲(A)$$

مقدار جریان در پایان ثابت زمانی دوم

$$I_۲ = ۶/۳۲+۲/۳۲ = ۸/۶۴(A)$$

تمرین: مقدار جریان را در پایان ثابت زمانی سوم و چهارم به دست آورید.

۱۱ــ۱۴ــ بوبین در جریان متناوب

برخلاف مدارهای DC که در آن‌ها جریان فقط هنگام باز وبسته 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 خاصیّت القایی از خاصیّت 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.

۱۲ــ۱۴ــ مقاومت القایی

می‌دانیم که مقاومت اهمی در مقابل جریان DC و AC به‌ازای ولتاژ ثابتی عکس‌العمل مشابهی دارد امّا اگر مداری تنها شامل اندوکتانس باشد، مقدار جریان به نیروی ضدّ محرکه‌ی ایجاد شده بستگی دارد که با عبور جریان مخالفت می‌کند امّا چون نیروی ضدّ محرکه (Cemf) 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 :

$$X_L = ۲\pi f L$$

در رابطه‌ی فوق، X_L مقاومت القایی بر حسب اهم، ۲π عدد ثابت و برابر ۶/۲۸ 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 باشد، مقاومت القایی بیش‌تر و هر چه فرکانس کم‌تر باشد، مقدار مقاومت القایی کم‌تر خواهد بود.

از طرفی، $۲\pi f$ همان سرعت زاویه‌ای(ω) است که سرعت تغییرات جریان را نمایش می‌دهد و برحسب رادیان بر ثانیه بیان می‌شود. هرقدر جریان با سرعت بیش‌تری تغییر کند، افت ولتاژ القایی در دو سر سلف نیز زیادتر خواهد شد. بنابراین، با توجّه به قانون اهم می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت.

$$X_L = ۲\pi f L = \frac{U_L}{I_L}$$

۱۳ــ۱۴ــ اتّصال بوبین‌ها

برای دست‌یابی به اندوکتانس مناسب، اغلب مجبوریم بوبین‌ها را به طور سری یا موازی ببندیم. در چنین مواردی، بدون درنظر گرفتن اثر میدان‌ها بر یک دیگر، اندوکتانسِ کل عیناً شبیه مقاومت معادل در مدارهای سری و موازی به دست می‌آید.

الف ــ اتّصال سری بوبین‌ها: با اتّصال پی‌درپی (متوالی) بوبین‌ها، اندوکتانس کل برابر مجموع تک‌تک اندوکتانس‌های موجود در مدار است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$L_t = L_۱ + L_۲ + \cdots + L_n$$

در صورت مساوی بودن اندوکتانس‌ها، اندوکتانس کل برای n بوبین برابر است با

$$L_t = nL$$

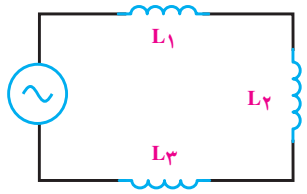
ب ــ اتّصال موازی بوبین‌ها: در اتّصال موازی بوبین‌ها اندوکتانس کل از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\frac{۱}{L_t} = \frac{۱}{L_۱} + \frac{۱}{L_۲} + \cdots + \frac{۱}{L_n}$$

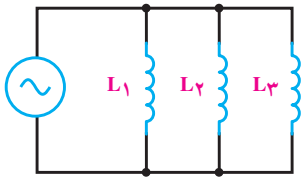
در صورت مساوی بودن بوبین‌ها اندوکتانس کل برای n بوبین، برابر است با

$$L_t = \frac{L}{n}$$

شکل‌های ۱۲ــ۱۴ و ۱۳ــ۱۴ اتّصال سری و موازی را برای سه بوبین که با فاصله‌ی زیاد از یک دیگر قرار دارند (بدون داشتن ارتباط مغناطیسی)، نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ــ۱۴ ــ اتصال سری بوبین‌ها



شکل ۱۳ــ۱۴ ــ 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.

مدار سری $X_{L_t} = X_{L_۱} + X_{L_۲} + \cdots + X_{L_n}$

مدار موازی $\frac{۱}{X_{L_t}} = \frac{۱}{X_{L_۱}} + \frac{۱}{X_{L_۲}} + \cdots + \frac{۱}{X_{L_n}}$

تذکر: در هر یک از اتصالات سری یا موازی بوبین‌ها مقاومت القایی کل را می‌توان از رابطه زیر به‌دست آورد.

$$X_{L_t} = ۲\pi f L_t = W.L_t$$

مثال ۶: سه بوبین با اندوکتانس‌های ۱۵ و ۶ و ۱۰ میلی‌هانری یک بار به صورت سری و یک بار به صورت موازی بسته شده‌اند. اندوکتانس کل را در هر حالت به دست آورید.

راه حل:

۱ــ اتّصال سری

$$L_t = L_۱ + L_۲ + L_۳$$

$$L_t = ۱۵ + ۶ + ۱۰ = ۳۱(mH)$$

۲ــ اتّصال موازی

$$\frac{۱}{L_t} = \frac{۱}{L_۱} + \frac{۱}{L_۲} + \frac{۱}{L_۳} = \frac{۱}{۱۵} + \frac{۱}{۶} + \frac{۱}{۱۰}$$

$$\frac{۱}{L_t} = \frac{۲+۵+۳}{۳۰} = \frac{۱۰}{۳۰}(mH)$$

$$L_t = \frac{۳۰}{۱۰} = ۳(mH)$$

مثال ۷: در مثال ۶، اگر فرکانس مدار ۱۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شود، مقاومت القایی معادل را در هر حالت به دست آورید.

۱ــ حالت سری

$$L_t = ۳۱(mH)$$

$$X L_t = ۲\pi f L_t = ۲ \times ۳/۱۴ \times ۱۰۰۰ \times ۳۱ \times ۱۰^{-۳}(\Omega)$$

$$X L_t = ۱۹۴/۶۸\Omega$$

۲ــ حالت موازی

$$L_t = ۳mH$$

$$X L_t = ۲\pi f L_t = ۲ \times ۳/۱۴ \times ۱۰۰۰ \times ۳ \times ۱۰^{-۳}\Omega$$

$$X L_t = ۱۸/۸۴\Omega$$

۱۴ــ۱۴ــ القای متقابل

هرگاه دو سیم‌پیچ طوری در نزدیکی یک دیگر قرار گیرند که خطوط قوای تولید شده توسط یکی حلقه‌های سیم‌پیچ دیگری را قطع کند، در سیم‌پیچ دوم ولتاژی القا می‌شود. ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ دوم ــ در صورت بسته بودن مدارش با مصرف‌کننده ــ به نوبه‌ی خود جریانی را تولید می‌کند که با تولید خطوط قوای جدید، حلقه‌های سیم‌پیچی اوّل را قطع می‌کند و در سیم‌پیچ اوّل ولتاژی القا می‌شود. به این عمل **القای متقابل** گفته می‌شود؛ یعنی، دو سیم‌پیچ متقابلاً بر یک‌دیگر اثر می‌گذارند. با توجّه به این که هیچ‌گونه ارتباط الکتریکی بین دو سیم‌پیچ وجود ندارد ولی حلقه‌های آن‌ها توسط میدان مغناطیسی با هم در ارتباط‌اند،

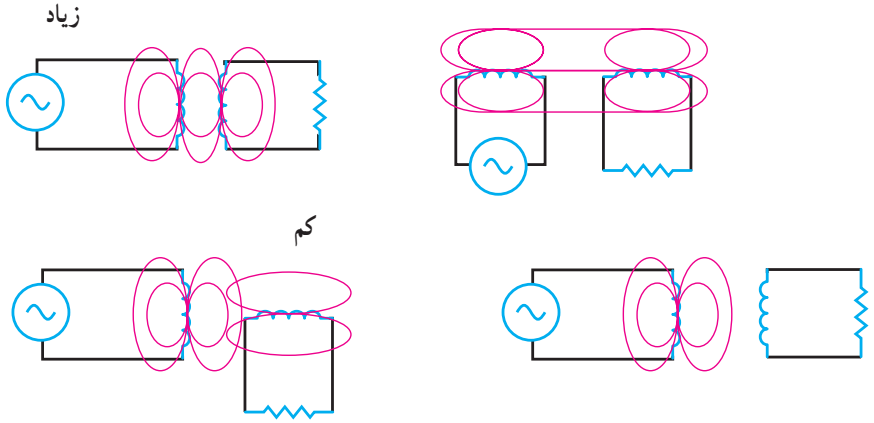
این ارتباط، متقابل است.

مقدار ولتاژ القایی ناشی از القای متقابلِ دو بوبین، به وضع قرار گرفتن آن‌ها نسبت به یک‌دیگر و تعداد خطوط قوایی که ارتباط بین دو بوبین را برقرار می‌کنند، بستگی دارد. درجه‌ی ارتباط خطوط قوا، توسط ضریبی به نام **ضریب تزویج** بیان می‌شود. وقتی همه‌ی خطوط قوای یک بوبین توسط بوبین دیگر قطع شود، ضریب تزویج برابر یک و هرگاه قسمتی از خطوط قوای تولید شده توسط بوبین دیگر قطع شود، ضریب تزویج کم‌تر از یک خواهد بود. در صورتی که بین دو بوبین هیچ‌گونه القای متقابلی وجود نداشته باشد، ضریب تزویج برابر صفر خواهد بود.

هرگاه ضریب تزویج ــ که آن را با حرف k نمایش می‌دهند ــ برابر یک باشد، تزویج را کامل یا سفت گویند. چنان‌چه ضریب تزویج (k) کم‌تر از یک باشد، تزویج را ناقص یا سست می‌گویند.

تزویج حداکثر (واحد) زمانی اتفاق می‌افتد که خطوط قوای یک بوبین، تمام حلقه‌های بوبین دیگر را قطع کند.

شکل ۱۴ــ۱۴ درجه‌ی تزویج را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ــ۱۴ــ نمایش درجه‌ی تزویج بین بوبین‌ها

برای نشان دادن میزان القای متقابل بین دو بوبین از ضریبی استفاده می‌شود، که آن‌را ضریب القای متقابل می‌نامند و با حرف M نمایش می‌دهند. ضریب القای متقابل به اندوکتانس دو سیم‌پیچ و ضریب تزویج بین آن‌ها وابسته است و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

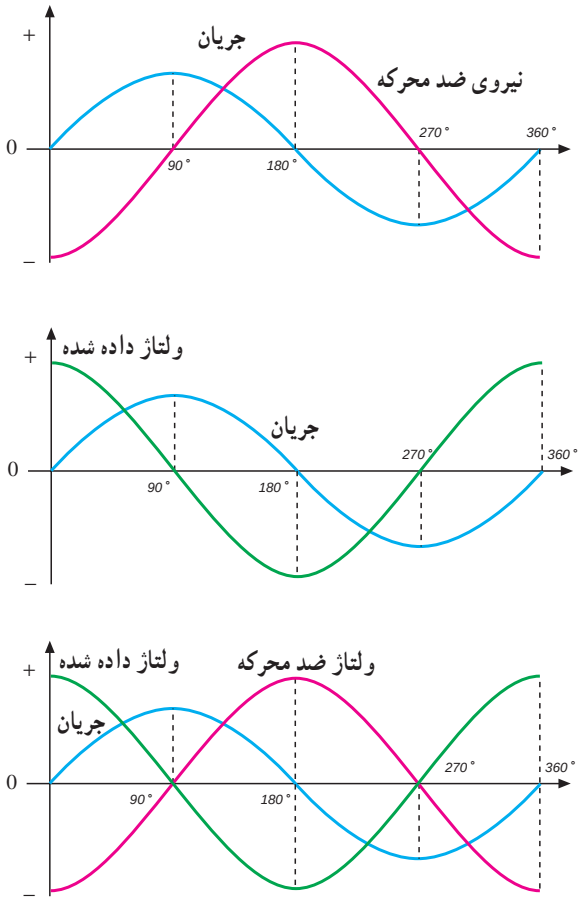
$$M = k\sqrt{L_1 L_2}$$

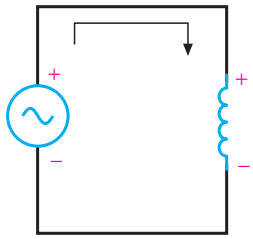
در این رابطه M ضریب القای متقابل بر حسب هانری L_1 و L_2 اندوکتانس بوبین‌ها برحسب هانری و k ضریب تزویج است که بدون واحد می‌باشد.

۱۵ــ۱۴ــ 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 می‌باشد. امّا اگر مداری شامل اندوکتانس باشد، نیروی ضدّ محرکه و تأخیر ایجاد شده توسط اندوکتانس در جریان، بین ولتاژ داده شده و جریان عبوری از آن، اختلاف فاز ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، جهت نیروی ضدّمحرکه چنان است که همیشه با تغییرات جریان مخالفت می‌کند. به علاوه، می‌دانیم که ولتاژ داده شده با ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ همفاز نیستند و کاملاً در جهت مخالف یک دیگرند. منحنی‌های شکل ۱۵ــ۱۴ ارتباط بین منحنی‌های جریان، ولتاژ داده شده و نیروی ضد محرکه را به خوبی نشان می‌دهد. زمانی که دامنه‌ی جریان ماکزیمم است، به دلیل اینکه تغییرات آن صفر است، دامنه‌ی نیروی ضدّ محرکه صفر است. زمانی که جریان از صفر می‌گذرد، تغییرات آن بیش‌ترین مقدار را دارا است. پس نیروی ضدّ محرکه بسته به جهت تغییرات جریان، ماکزیمم یا مینیمم می‌باشد. به تعبیر دیگر در ۹۰ و ۲۷۰ درجه، جریان تغییرات ناچیزی دارد و ولتاژ داده شده صفر است. لذا نیروی ضد محرکه‌ای ایجاد نمی‌شود. در صفر، ۱۸۰ و ۳۶۰ درجه تغییراتِ جریان، زیاد و ولتاژ داده

شده ماکزیمم است. لذا حداکثر نیروی ضدّ محرکه در خلاف جهت ولتاژ داده شده تولید می‌شود.





شکل ۱۵ــ۱۴ــ نمایش منحنی‌های جریان ولتاژ داده شده و نیروی ضد محرکه

۱۶ــ۱۴ــ انرژی ذخیره شده در سلف

میدان مغناطیسی وابسته به جریان در یک سیم‌پیچ دارای انرژی الکتریکی است که از طریق منبع ولتاژی که جریان را تولید می‌کند، تأمین می‌شود. این انرژی در میدان مغناطیسی ذخیره می‌شود و به اندوکتانس (L) و مجذور جریان بستگی دارد ؛ یعنی :

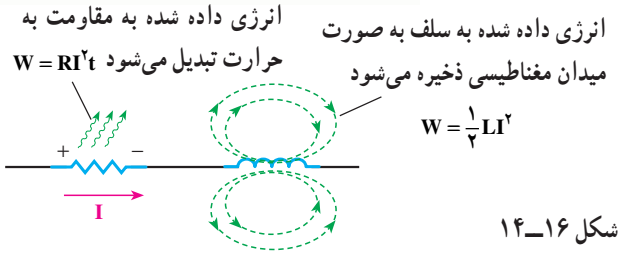
$$W = \frac{1}{2}LI^2$$

در رابطه‌ی فوق I برحسب آمپر، L برحسب هانری و انرژی ذخیره شده، (W) برحسب وات ثانیه یا ژول است.

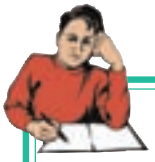
مثال ۸ : از یک سیم‌پیچ با ضریب خودالقایی ۳ هانری، جریان مستقیمی برابر با ۶۰ آمپر می‌گذرد. هنگام قطع این سیم‌پیچ چه قدر انرژی آزاد می‌شود؟

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

$$W = \frac{1}{2}\times 3\times (60)^2 = \frac{3\times 3600}{2} = 5400\,j = 5/4\,kj$$



شکل ۱۶ــ۱۴



پرسش

۱ــ خودالقایی و ضریب خودالقایی را تعریف کنید.
۲ــ تغییرات جریان چه اثراتی بر سیم‌پیچ می‌گذارد؟
۳ــ قانون لنز چیست؟
۴ــ اثرات جریان DC و AC را بر سیم‌پیچ با یک دیگر مقایسه کنید.
۵ــ فرق بین emf و Cemf چیست؟
۶ــ عوامل مؤثّر بر مقدار ضریب القا و خودالقا کدام‌اند؟
۷ــ القای متقابل یعنی چه؟
۸ــ اثرات جریان DC در القای متقابل چیست؟
۹ــ اثرات هسته را در سیم‌پیچ‌ها توضیح دهید.
۱۰ــ انرژی ذخیره شده در سلف یعنی چه؟
۱۱ــ اثر مقاومت القایی را در جریان متناوب توضیح دهید.
۱۲ــ دلیل سری یا موازی بستن سیم‌پیچ‌ها را بیان کنید.
۱۳ــ رابطه‌ی فازی بین ولتاژ و جریان یک بوبین چیست؟ چرا؟

تمرین

۱ــ سیم‌پیچی به طول ۵۰ سانتی‌متر و سطح مقطع ۰/۰۲ متر مربع با هسته‌ی هوا دارای ۱۰۰۰ دور است ؛ اولاً ضریب خودالقایی آن تقریباً چند میلی هانری است؟ ثانیاً اگر بخواهیم ضریب خود القا دو برابر شود، تعداد دور سیم‌پیچ باید چند دور شود؟
(جواب : ۵۰mH و دور ۱۴۱۰)

۲ــ دو بوبین با ضریب خودالقای ۱۰۰ میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی به هم وصل می‌کنیم. ضریب خودالقایی کل در هر دو حالت چه قدر می‌شود؟
(جواب : ۲۰۰ و ۵۰ میلی هانری)

۳ــ ضریب خود القایی سیم‌پیچی ۲۰mH و جریان عبوری از آن ۱۰ آمپر است. چه مقدار انرژی در سیم‌پیچ ذخیره می‌شود؟
(جواب : ژول ۱ =W)

۴ــ چهار بوبین با ضریب‌های خودالقای ۰،۵۰ ،۲۵ ،۱۰۰ و ۲۵ میلی هانری را یک بار به طور سری و بار دیگر به طور موازی ببندید. ضریب خودالقای کل را در هر حالت به دست آورید.

(جواب : ۲۰۰ و ۹ میلی هانری)

۵ــ از یک بوبین با ضریب خودالقایی ۱۰mH جریان متناوبی با فرکانس ۵۰ هرتز عبور می‌کند. مقاومت القایی بوبین چند اهم است؟ اگر فرکانس به یک کیلو هرتز تغییر یابد، مقاومت القایی بوبین چند اهم می‌شود؟

(جواب : ۳/۱۴ و ۶۲/۸)

۶ــ در یک بوبین با ضریب خودالقایی ۳ میلی‌هانری، جریان در مدت دو ثانیه از یک آمپر به ۷ آمپر افزایش می‌یابد ولتاژ خودالقایی در بوبین چند میلی ولت است؟ اگر ضریب خودالقایی ۳ هانری باشد، ولتاژ القایی چند میلی‌ولت می‌شود؟

(جواب : ۹- و ۹۰۰۰-)

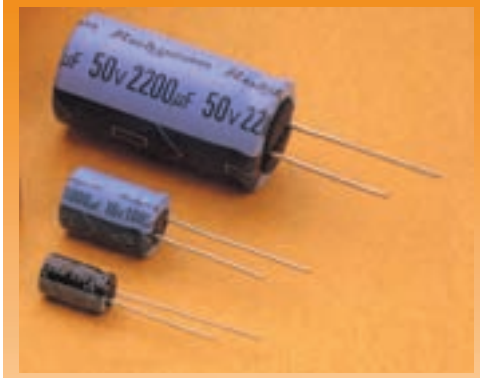
۷ــ یک بوبین با ضریب خودالقایی ۲ هانری و مقاومت اهمی ۰/۵ اهمی در دست است. اگر این بوبین را به ولتاژ ۱/۵ ولت مستقیم وصل کنیم، ماکزیمم جریان مدار چند آمپر می‌شود؟ چه مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان ماکزیمم شود؟

(جواب : ۳ آمپر و ۲۰ ثانیه)

فصل پانزدهم

خازن در جریان مستقیم

هدف‌های رفتاری



در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

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

۲ــ ظرفیّت خازن را تعریف کند.

۳ــ ضریب دی‌الکتریک را توضیح دهد.

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

۵ــ رفتار خازن را در مدارهای DC بیان کند.

۶ــ چگونگی شارژ و دشارژ خازن را بیان کند.

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

۸ــ انرژی ذخیره‌شده و ثابت زمانی را محاسبه کند.

۹ــ ظرفیت معادل خازن‌های سری را محاسبه کند.

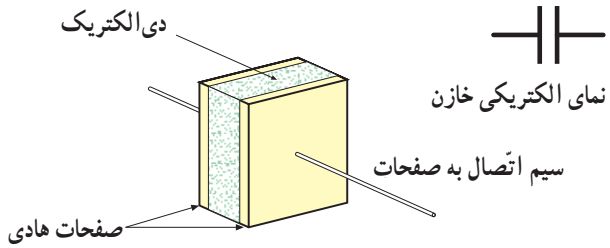
۱۰ــ ظرفیت معادل خازن‌های موازی را محاسبه کند.

۱ــ۱۵ــ خازن

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

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

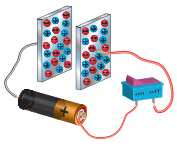
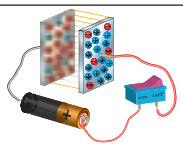
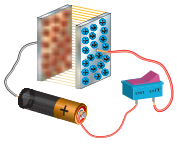
صفحات هادی نسبتاً بزرگ‌اند و در فاصله‌ای بسیار نزدیک به هم قرار می‌گیرند. دی‌الکتریک انواع مختلفی دارد و با ضریب مخصوصی که نسبت به هوا سنجیده می‌شود، معرفی می‌گردد. این ضریب را **ضریب دی‌الکتریک** می‌گویند و آن‌را با حرف ε نمایش می‌دهند.



شکل ۱ــ۱۵ــ نمای یک خازن ساده

۲ــ۱۵ــ میدان الکتریکی

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

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

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

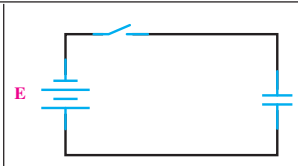
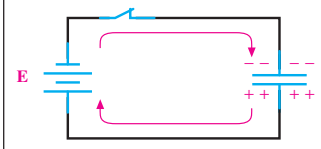
۳ــ۱۵ــ شارژ خازن با ولتاژ DC

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

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

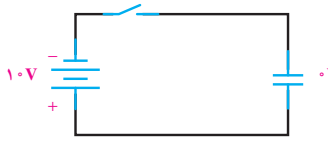
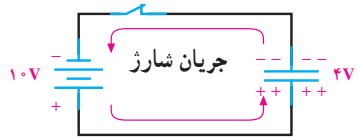
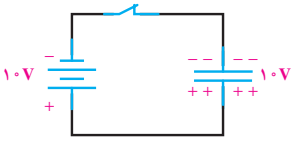
وارد و خارج‌شدن الکترون‌ها از صفحات خازن، میدان الکتریکی ساکن را بالا می‌برد و ولتاژی در خلاف جهت ولتاژ اعمال شده به دو سر خازن ایجاد می‌کند. ولتاژ ایجادشده در خازن، با جاری‌شدن جریان در مدار مخالفت می‌کند. به تعبیر دیگر، ولتاژ خازن با ولتاژ باتری مخالفت می‌کند. هرچه ولتاژ دو سر خازن بیش‌تر می‌شود، ولتاژ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

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

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

شکل ۳ــ۱۵ــ اتصال باتری و شارژ خازن

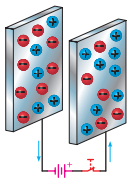
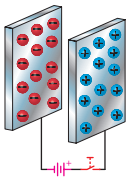
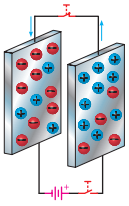
باید به این نکته توجه کرد که جریان شارژ و ولتاژ خازن مخالف یک‌دیگر عمل می‌کنند ؛ یعنی، در ابتدای شارژ جریان ماکزیمم و ولتاژ خازن صفر است. هرچه به ولتاژ خازن اضافه می‌شود، شدّت جریان کاهش می‌یابد. وقتی ولتاژ خازن به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد، جریان صفر می‌شود. شکل ۴ــ۱۵این مطلب را به‌روشنی نشان می‌دهد.

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

شکل ۴ــ۱۵ــ شارژشدن خازن به‌اندازه‌ی ولتاژ باتری

۴ــ۱۵ــ دشارژ (تخلیه) خازن

یک خازن شارژشده باید شارژ خود را به‌مدّت نامحدودی نگاه دارد ؛ درحالی که این امر عملی نیست. با جداشدن منبع شارژ از خازن، دیر یا زود خازن شارژ (بار) خود را از دست می‌دهد. عمل از دست‌دادن شارژ را **دشارژشدن** می‌نامند. برای دشارژ خازن تنها لازم است یک مسیر هادی بین دو صفحه ایجاد شود. با ایجاد مسیر، الکترون‌های صفحه‌ی منفی به طرف پتانسیل مثبت در صفحه‌ی مثبت جاری می‌شوند. تبادل الکترون بین صفحات آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا صفحات خنثیٰ شوند. در این موقع، خازن هیچ‌گونه ولتاژی ندارد و می‌گویند خازن دشارژشده است. حرکت الکترون‌ها از مسیر ایجادشده **جریان دشارژ** نامیده می‌شود. در شکل ۵ ــ۱۵ شارژ و دشارژ خازن را مشاهده می‌کنید.

خازن در حال شارژ	
خازن شارژشده	
خازن در حال تخلیه	

شکل ۵ــ۱۵ــ نمایش شارژ و دشارژ خازن

۵ــ۱۵ــ ظرفیت خازن

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

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

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

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

جدول ۱ــ۱۵

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

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

راه حل:

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

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

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

راه حل:

$$Q = CV$$

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

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

راه حل:

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

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

۶ــ۱۵ــ عوامل مؤثر بر ظرفیّت خازن

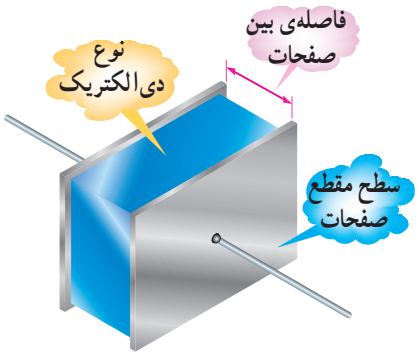
مهم‌ترین عوامل مؤثر در تعیین ظرفیت خازن عبارت‌اند از :

۱ــ مساحت صفحات

۲ــ فاصله‌ی بین صفحات

۳ــ دی‌الکتریک به‌کار رفته بین صفحات

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

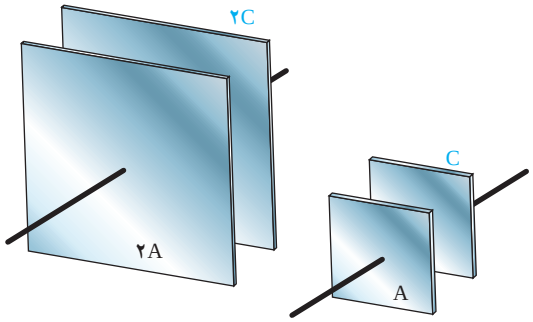


شکل ۶ــ۱۵ــ عوامل مؤثر بر ظرفیت خازن

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

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

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

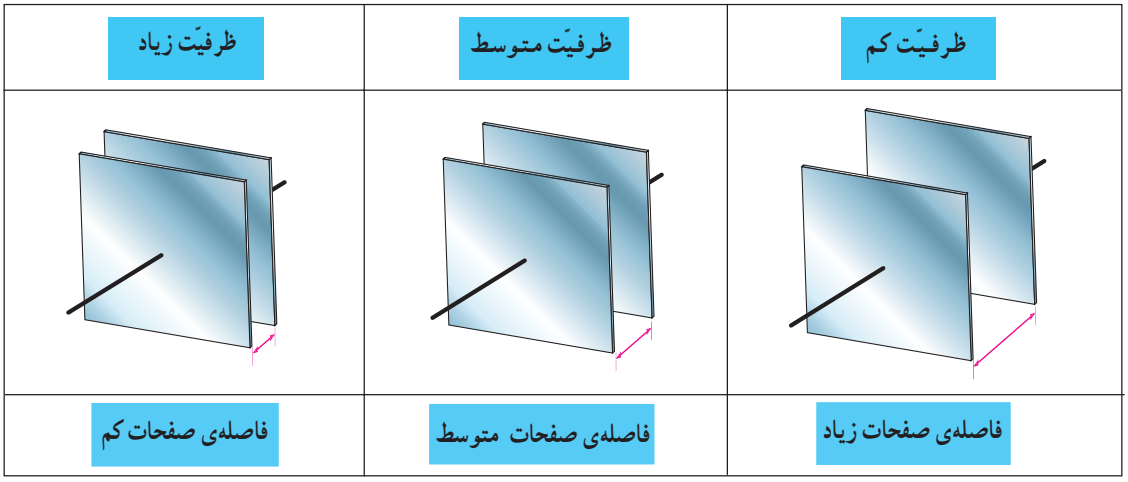


ظرفیّت خازن سمت راست، نصفِ ظرفیّت خازنِ سمت چپ است.

شکل ۷ــ۱۵ــ تأثیر مساحت صفحات بر ظرفیّت خازن

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

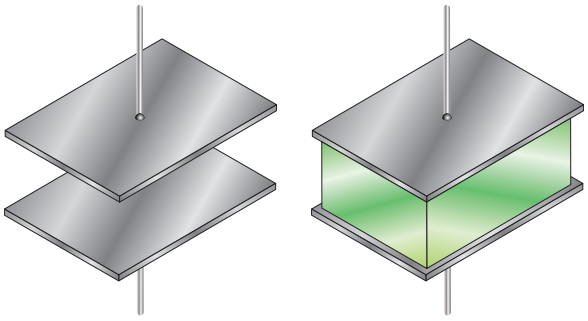
کم‌ترین فاصله‌ای که می‌تواند بین دو صفحه وجود داشته باشد، به ولتاژ داده شده به خازن و عایق بین صفحات آن بستگی دارد. امروزه خازن‌هایی با فاصله‌ی بسیار کوچک ساخته شده است که می‌توانند ولتاژهای بزرگ تا چند صد ولت را تحمل کنند.



شکل ۸ــ۱۵ــ تأثیر فاصله‌ی بین صفحات بر ظرفیّت خازن

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

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



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

شکل ۹ــ۱۵ــ تأثیر دی‌الکتریک بر ظرفیّت خازن

۷ــ۱۵ــ ثابت دی‌الکتریک و قابلیت تحمل دی‌الکتریک

جنس دی‌الکتریک‌ها بر ظرفیّت خازن اثر دارد ؛ از این‌رو خواصّ دی‌الکتریکی مواد باید مورد توجّه قرار گیرد. برای این منظور، خواصّ دی‌الکتریکی مواد نسبت به خواص هوا سنجیده می‌شود. ثابت دی‌الکتریک هوا را ε_0[1] و ثابت دی‌الکتریک هر ماده‌ی دیگر را ε در نظر می‌گیرند. مقدار ε برابر است با

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

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

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

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

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

حداکثر ولتاژی را که دی‌الکتریک بدون خطر می تواند تحمّل کند، **قابلیّت تحمّل دی‌الکتریک** می‌نامند و آن‌را برحسب V/mil[2] (ولت بر میل) می‌سنجند. هر میل (mil) برابر $\frac{1}{1000}$ اینچ است. در جدول ۲ــ۱۵ ضریب‌دی‌الکتریک (ε_r) و قابلیّت تحمل دی‌الکتریک بعضی عایق‌ها نشان داده شده است ؛ مثلاً اگر عایق خازنی از جنس میکا و فاصله‌ی بین صفحات آن یک میل باشد، حداکثر ولتاژی که این خازن می‌تواند تحمل کند و صدمه نبیند، ۱۵۰۰ ولت خواهد بود. اگر ولتاژ اعمال‌شده به خازن بیش از ۱۵۰۰ ولت شود، مولکول‌های دی‌الکتریک (میکا) می‌شکنند. در نتیجه،بین دی‌الکتریک و صفحات خازن، قوس الکتریکی ایجاد می‌شود و این خازن دیگر قابل استفاده نخواهد بود. اگر فاصله‌ی بین صفحات همین خازن را دو برابر کنیم (دو میل)، حداکثر ولتاژی که می‌تواند تحمّل کند و خراب نشود، ۳۰۰۰ ولت است.

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

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

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

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

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

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

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

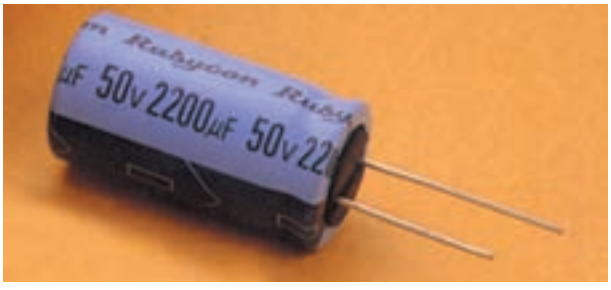
۱ــ خوانده می‌شود اپسیلون صفر.

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

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

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

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



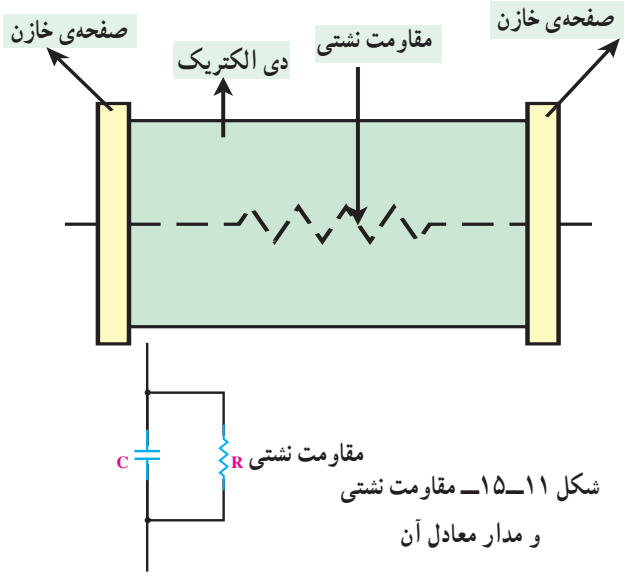
شکل ۱۰ــ۱۵

۸ــ۱۵ــ ضریب حرارتی

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

۹ــ۱۵ــ نشت در خازن‌ها

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



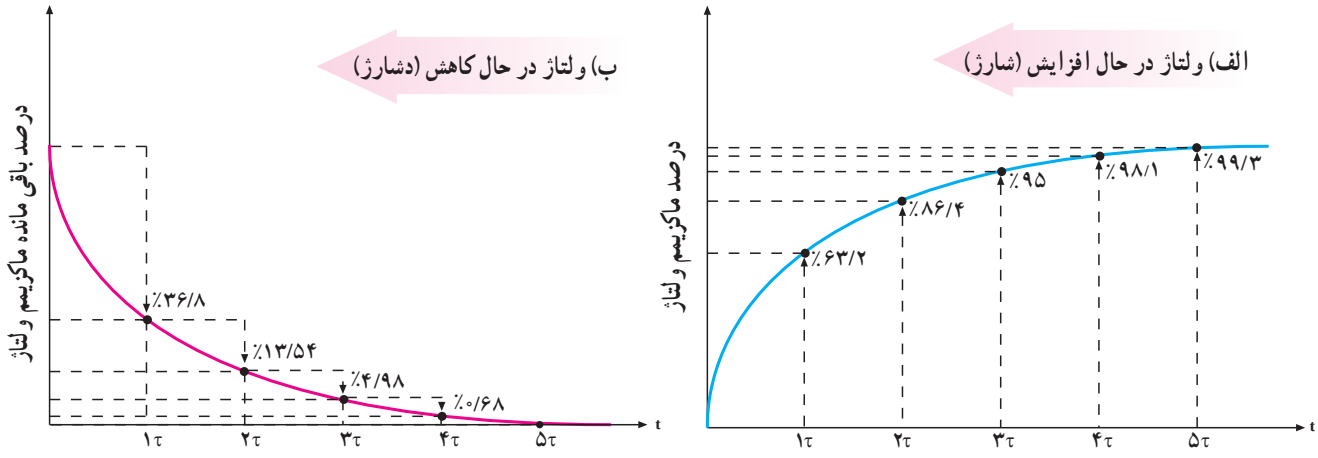
شکل ۱۱ــ۱۵ــ مقاومت نشتی و مدار معادل آن

۱۰ــ۱۵ــ ثابت زمانی خازن

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

$$\tau = RC$$

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



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

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

شکل ۱۲ــ۱۵ــ منحنی‌های شارژ و دشارژ خازن

جدول ۳ــ۱۵ــ درصد شارژ و دشارژ خازن از ولتاژ ماکزیمم

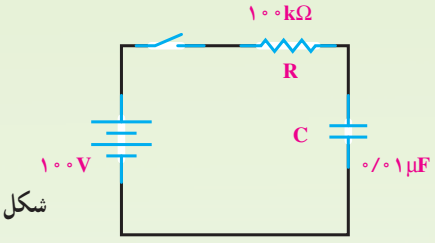
تعداد ثابت زمانی	درصد باقی‌مانده‌ی ولتاژ دشارژ
۱	۳۷
۲	۱۴
۳	۵
۴	۲
۵	۱
	تقریباً صفر

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

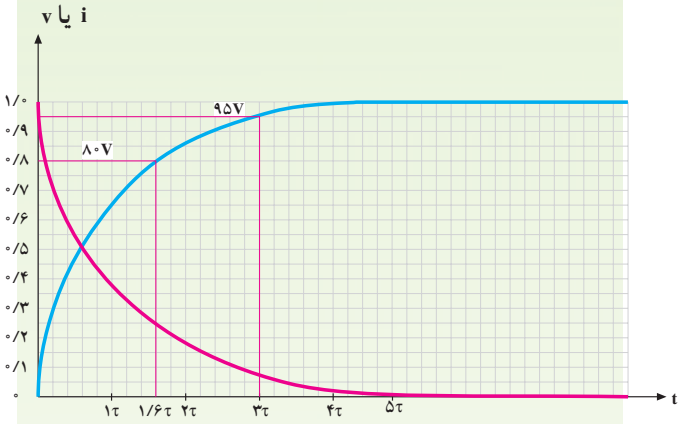
مثال ۵: مدار شکل ۱۳ــ۱۵ را در نظر می‌گیریم. پس از بستن کلید و با استفاده ازمنحنی شکل ۱۴ــ۱۵

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

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



شکل ۱۳ــ۱۵



شکل ۱۴ــ۱۵

راه‌حل:

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

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

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

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

۱۱ــ۱۵ــ انرژی ذخیره‌شده در خازن

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

$$W = \frac{۱}{۲}CV^{۲}$$

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

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

راه حل:

$$W = \frac{۱}{۲}CV^{۲}$$

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

$$W = ۰/۰۸ \quad \text{ژول}$$

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

تحقیق کنید

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

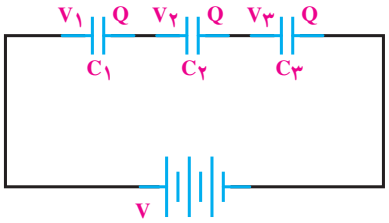
۱۲ــ۱۵ــ اتصال خازن‌ها

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

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

$$Q = Q_۱ = Q_۲ = Q_۳ \qquad (۱)$$

$$V = V_۱ + V_۲ + V_۳ \qquad (۲)$$



شکل ۱۵ــ۱۵ــ اتّصال سری خازن‌ها

می‌دانیم که

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

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

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

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

با حذف Q از طرفین رابطه چنین می‌شود :

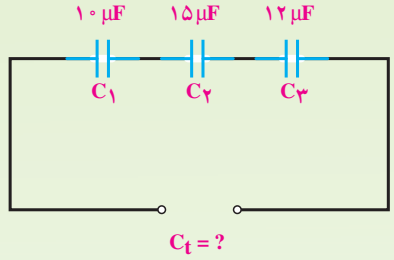
$$\boxed{\frac{۱}{C_t} = \frac{۱}{C_۱} + \frac{۱}{C_۲} + \frac{۱}{C_۳}} \qquad (۵)$$

با رابطه‌ی ۵ ظرفیت خازن معادل را می‌توان محاسبه کرد.

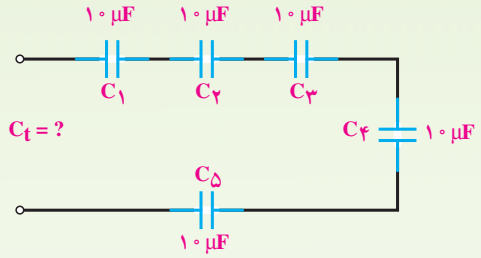
درصورتی که خازن‌ها با هم مساوی باشند، رابطه‌ی ظرفیت خازن معادل برای n خازن چنین است :

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

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



شکل ۱۶ــ۱۵



شکل ۱۷ــ۱۵

راه‌حل: مدار ۱۶ــ۱۵ :

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

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

$$C_t = \frac{۶۰}{۱۵} = ۴\mu F$$

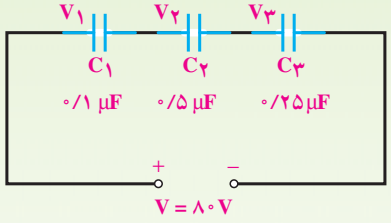
راه‌حل: مدار ۱۷ــ۱۵

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

$$C_t = ۲\mu F$$

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

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



شکل ۱۸ــ۱۵

راه‌حل:

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

$$C_t=\frac{۰/۵}{۸}\mu F$$

در مدار سری مقدار بار خازن‌ها یکسان و برابر است با

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

در این جا ولتاژ دو سر خازن‌ها برابر می‌شود با

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

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

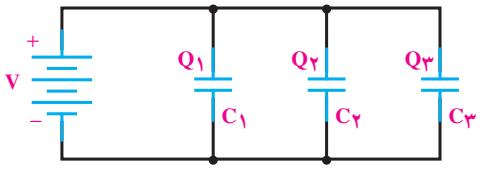
$$V_۳=\frac{Q_۳}{C_۳}=\frac{۵}{۰/۲۵}=۲۰V$$

$$V=V_۱+V_۲+V_۳$$

$$V=۵۰+۱۰+۲۰=۸۰V$$

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

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



شکل ۱۹ــ۱۵ ــ اتصال موازی خازن‌ها

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

$$Q=Q_۱+Q_۲+Q_۳ \qquad (۱)$$

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

$$Q=C_tV \qquad (۲)$$

$$Q_۱=C_۱V$$

$$Q_۲=C_۲V$$

$$Q_۳=C_۳V$$

$$C_tV=C_۱V+C_۲V+C_۳V$$

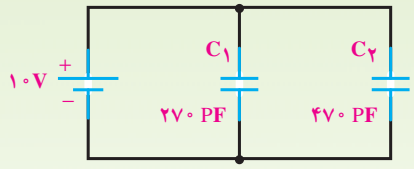
ولتاژ V را از طرفین حذف می‌کنیم تا C_t به‌دست آید.

$$C_t=C_۱+C_۲+C_۳$$

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

$$C_t=nC$$

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



شکل ۲۰ــ۱۵

راه‌حل: ظرفیت معادل برابر است با

$$C_t = C_1 + C_2 = ۲۷۰ + ۴۷۰ = ۷۴۰PF$$

$$V = V_1 = V_2 = ۱۰V$$

مقدار بار هر خازن نیز به‌راحتی محاسبه می‌شود.

$$Q_1 = C_1V = ۲۷۰\times۱۰^{-۱۲}\times۱۰ = ۲/۷\times۱۰^{-۹}$$ کولن

$$Q_2 = C_2V = ۴۷۰\times۱۰^{-۱۲}\times۱۰ = ۴/۷\times۱۰^{-۹}$$ کولن

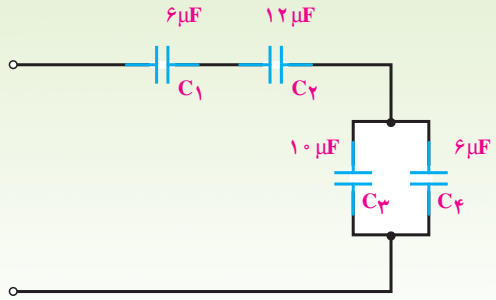
مثال ۱۰: ظرفیت معادل ۱۵ خازن ۱۰۰۰ میکروفارادی را که به‌طور موازی بسته شده‌اند، حساب کنید.

$$C_t = nC_1$$

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

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

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



شکل ۲۱ــ۱۵

راه حل:

در این مدار C_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 :

$$C_{1,2} = \frac{C_1C_2}{C_1+C_2} = \frac{۶\times۱۲}{۶+۱۲} = ۴\mu F$$

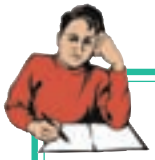
$$C_{3,4} = C_3 + C_4 = ۱۰+۶ = ۱۶\mu F$$

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

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

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

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



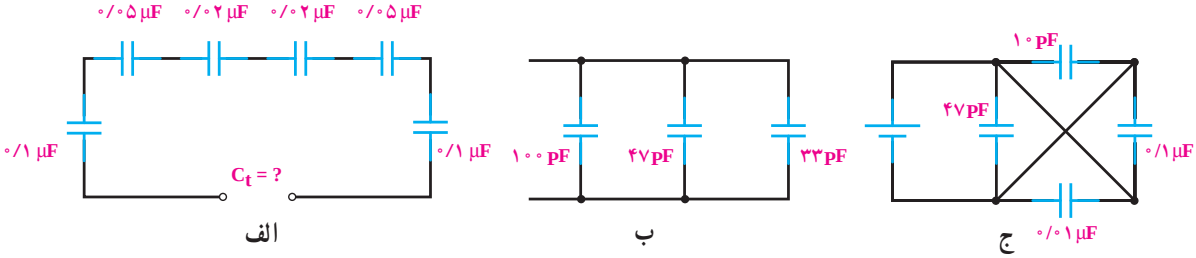
پرسش

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

تمرین

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

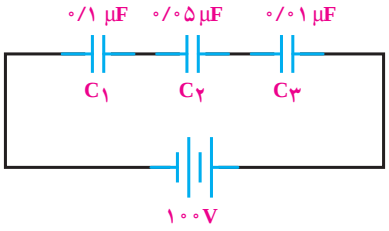
(جواب : الف ــ ۶/۲۵nF ب ــ ۱۸۰pF ج ــ ۱۱۰۰۵۷pF



شکل ۲۲ــ۱۵

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

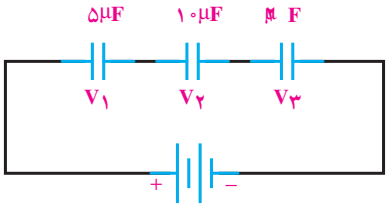
(جواب : $V_1 = \frac{۱۰۰}{۱۳}V, V_2 = \frac{۱۰۰۰}{۶۵}V, V_3 = \frac{۱۰۰۰}{۱۳}$)



شکل ۲۳ــ۱۵

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

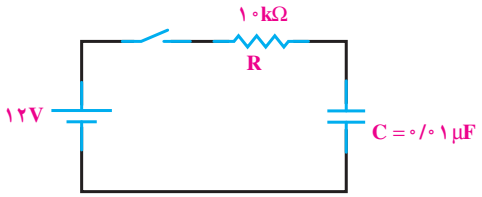
(جواب : $V_3 = 50V, V_2 = 10V, V_1 = 20V, C_t = 1/25\mu F$)



شکل ۲۴ــ۱۵

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

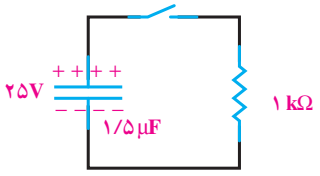
(جواب : شارژ کامل)



شکل ۲۵ــ ۱۵

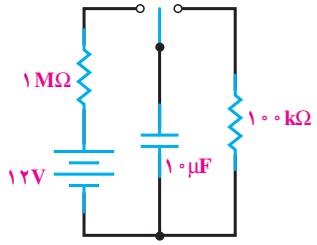
۵ ــ در مدار شکل ۲۶ــ۱۵ خازن دارای شارژ کامل است. کلید را به‌مدّت ۳ میلی‌ثانیه می‌بندیم. چه ولتاژی از خازن خالی می‌شود؟

(جواب : ۲۱/۶ ولت)



شکل ۲۶ــ۱۵

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



شکل ۲۷ــ۱۵

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

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

فصل شانزدهم

خازن در جریان متناوب

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ منحنی‌های ولتاژ و جریان خازن را در جریان متناوب رسم کند.

۲ــ اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان خازن را رسم کند.

۳ــ اثرات فرکانس را بر راکتانس خازن شرح دهد.

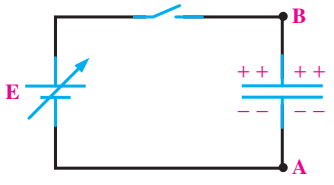
۴ــ انواع اتّصال خازن‌ها را شرح دهد.

۵ ــ مقاومت معادل خازن‌ها را در اتّصال سری و موازی محاسبه کند.

۱ــ۱۶ــ مدارهای جریان متناوبی خازنی

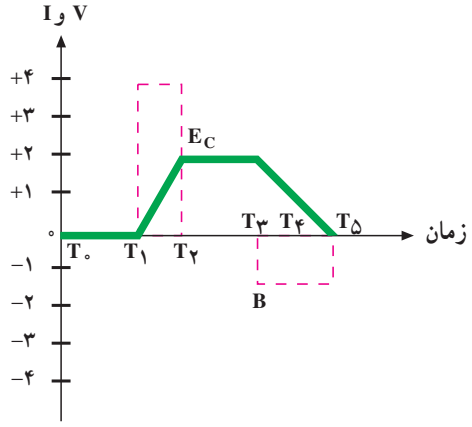
در فصل ۱۵ رفتار خازن در جریان مستقیم بررسی شد. اکنون چگونگی رفتار خازن را وقتی که جریان متناوب به آن وارد می‌شود، مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این قسمت، به روابط فازی بین جریان و ولتاژ و عکس‌العمل خازنی می‌پردازیم.

با توجه به شکل ۱ــ۱۶یک خازن را به یک منبع ولتاژ DC متغیر وصل کرده‌ایم : در شکل ۲ــ۱۶ منحنی تغییرات ولتاژ دو سر خازن نسبت به جریانی که خازن را شارژ می‌کند، رسم شده است. خط ممتد ولتاژ و خط مقطّع، جریان را نشان می‌دهد. جریان عبوری از خازن سبب شارژ خازن می‌شود و در جهت عکس، ولتاژ حاصل از شارژ خازن عمل می‌کند.



شکل ۱ــ۱۶ــ مدار خازنی با منبع DC متغییر

برای درک بهتر مطلب، عمل خازن را در مدار شکل ۱ــ۱۶ 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 مقطّع) در مدار جاری شود و خازن را شارژ کند. چون ولتاژ داده شده به صورت یک‌نواخت

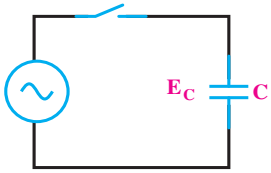


شکل ۲ــ۱۶ــ منحنی تغییرات ولتاژ و جریان خازن

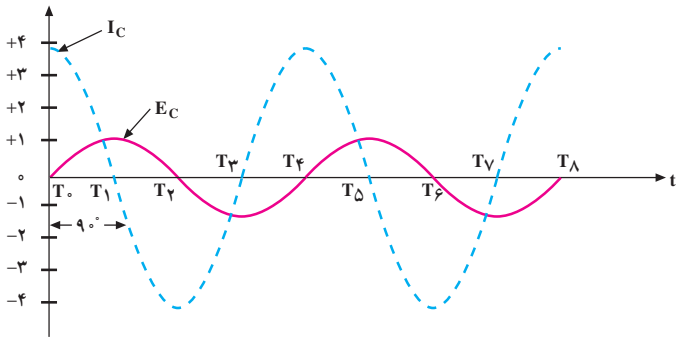
اضافه می‌شود، الکترون‌ها به تدریج صفحه‌ی B خازن را ترک می‌کنند و روی صفحه‌ی A جمع می‌شوند. این عمل به‌طور یک‌نواخت ادامه پیدا می‌کند تا ولتاژ Ec مخالف، تولید شود. ولتاژ Ec همان ولتاژ شارژ خازن است. وقتی ولتاژ داده شده در یک مقدار مثبت نگه‌داشته شود، جریانی جاری نمی‌شود؛ بنابراین، از T_2 تا T_3 ولتاژ خازن با ولتاژ داده شده برابر و جریان خازن صفر است.

اکنون اگر از T_3 تا T_5 ولتاژ داده شده را به‌طور 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 آمپرمتر عقربه‌ای و یک ولت‌متر عقربه‌ای را به مدار اضافه کنیم و با تغییر ولتاژ منبع به حرکت عقربه‌های ولت‌متر و آمپرمتر توجه داشته باشیم، متوجه می‌شویم که به مجرد وصل کلید و تغییر ولتاژ از صفر عقربه‌ی آمپرمتر 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 ۳ـ۱۶ به خازن وصل می‌کنیم. با بستن کلید، تغییرات لحظه‌ای ولتاژ و جریان را در مدار شکل ۴ـ۱۶ مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل ۳ـ۱۶ــ اتصال خازن به ولتاژ متناوب



شکل ۴ـ۱۶ــ منحنی تغییرات ولتاژ نسبت به جریان عبوری از خازن

جریان لحظه‌ای در T_0 حداکثر (+۴) و ولتاژ صفر است. از T_0 تا T_1 خازن شروع به شارژ شدن می‌کند و ولتاژ آن به مقدار ماکزیمم خود (+۱/۵) می‌رسد. در حالی که جریان با شارژ شدن تدریجی خازن از حداکثر به صفر می‌رسد. از این لحظه به بعد ــ یعنی T_1 تا T_2 که ولتاژ منبع کاهش می‌یابد ــ خازن شروع به دشارژ شدن در منبع می‌کند و ولتاژ آن به صفر می‌رسد. در حالی که جریان در جهت مخالف حالت اوّلیه 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_5 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_3 و T_1) جریان آن صفر است. هم‌چنین زمانی که ولتاژ روی خازن صفر می‌شود جریان حداکثر مقدار خود را دارد (T_4 و T_2).

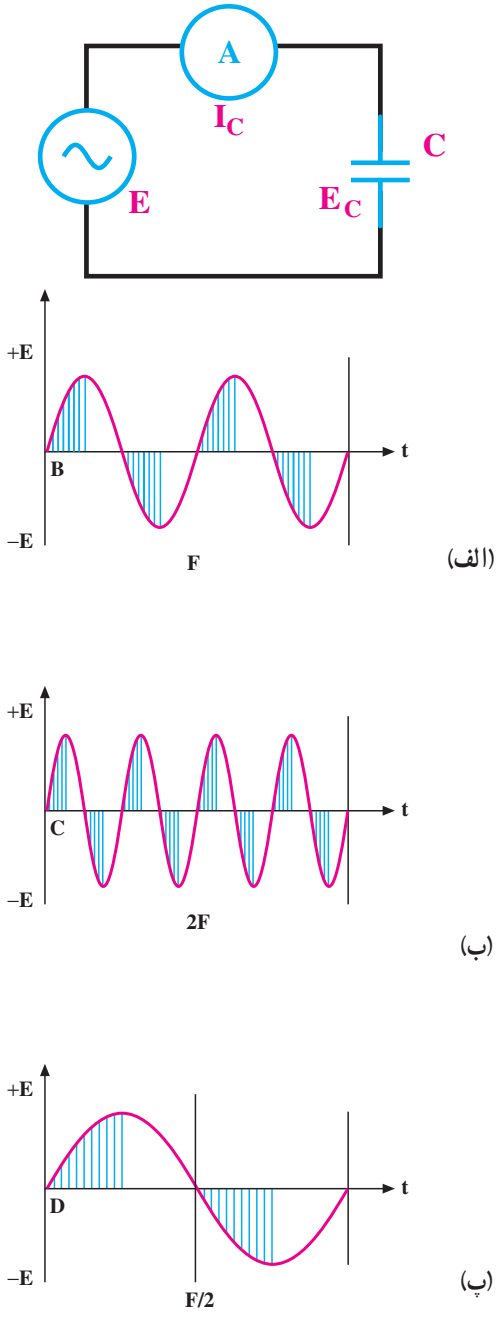
منحنی ولتاژ و جریان، هر دو به صورت سینوسی تغییر می‌کنند. به‌طوری که جریان از ولتاژ به اندازه‌ی ۹۰ درجه جلوتر است یا تقدم فاز دارد. با توجه دقیق به منحنی‌های ولتاژ و جریان، این نتیجه حاصل می‌شود که خازن در زمانی که ولتاژ زیاد می‌شود (چه در جهت مثبت، چه در جهت منفی) انرژی ذخیره می‌کند و در زمانی که ولتاژ 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 این‌که 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 وجریان را محدود می‌کند.

مخالفت خازن در مقابل جاری شدن جریان را **عکس‌العمل راکتانس خازنی** یا **مقاومت خازنی** می‌گویند و آن را با X_C نمایش می‌دهند.

۲ــ۱۶ــ عوامل مؤثر بر عکس‌العمل خازنی

عوامل مؤثر در عکس‌العمل (مقاومت) خازنی عبارت‌اند از : فرکانس و ظرفیت خازنی که در این‌جا به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

مدار شکل ۵ ــ ۱۶ رادر نظر می‌گیریم. دراین مدار، وقتی خازن C به مقدار ولتاژ E شارژ می‌شود، مقداری بار الکتریکی (Q) روی خود ذخیره می‌کند. بار ذخیره شده در خازن



شکل ۵ ــ۱۶ــ تأثیر فرکانس در زمان ذخیره شدن انرژی در خازن

از حاصل‌ضرب ولتاژ در ظرفیّت ــ یعنی $Q = CV$ ــ به‌دست 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 ۵ ــ۱۶ــ الف). زمان ذخیره شدن بار در خازن به فرکانس بستگی دارد ؛ یعنی :

$$f = \frac{۱}{T}$$

اگر فرکانس، مطابق شکل ۵ ــ۱۶ــ 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 (۵ ــ۱۶ــ 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 F و E)، جریان بیش‌تری از مدار می‌گذرد و اجازه‌ی شارژ بیش‌تری را می‌دهد. درنتیجه، عکس‌العمل خازنی کاهش می‌یابد و برعکس، با کم شدن ظرفیت خازن عکس‌العمل خازنی زیاد می‌شود.

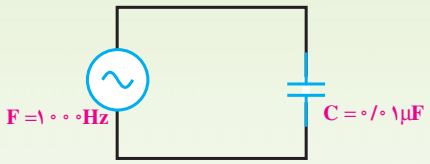
اکنون با مشخص شدن عوامل مؤثر در امپدانس یا عکس‌العمل خازنی، می‌توانیم رابطه‌ی بین آن‌ها را مشخص کنیم.

$$X_c = \frac{۱}{۲\pi FC}$$

X_c عکس‌العمل خازنی برحسب اهم، F فرکانس برحسب هرتز و C ظرفیت خازنی برحسب فاراد است.

عکس‌العمل خازنی (X_c) با نام‌های **راکتانس خازنی** و **کاپاسیتیو** نیز بیان می‌شود.

مثال ۱: فرکانس مولد موج سینوسی مدار شکل ۶ــ۱۶ ۱۰۰۰ هرتز و ظرفیت خازن آن ۰/۰۱μF است. عکس‌العمل خازنی را به‌دست آورید.



شکل ۶ــ۱۶

حل:

$$X_c = \frac{۱}{۲\pi FC} = \frac{۱}{۲\times ۳/۱۴\times ۱۰۰۰\times ۰/۰۱\times ۱۰^{-۶}}$$

$$X_c = \frac{۱۰^{۵}}{۶/۲۸} = ۱۵/۹۲\,k\Omega$$

۳ــ۱۶ــ نحوه محاسبه‌ی مقاومت خازنی معادل

الف ــ اتصال سری خازن‌ها: برای محاسبه‌ی مقاومت معادل چند خازن سری از شکل ۷ــ۱۶ و قانون دوم کیرشهف (KVL) استفاده می‌کنیم. ولتاژ کل داده شده به مدار با مجموع تک‌تک افت ولتاژهای ایجاد شده در مدار برابر است؛ یعنی :

$$E_t = E_۱ + E_۲ + E_۳$$

با استفاده از قانون اهم می‌دانیم که به‌طورکلی

ولتاژ = جریان × مقاومت $\Rightarrow E = IX_c$

با توجه به این که در مدار سری جریان یکسان است، پس :

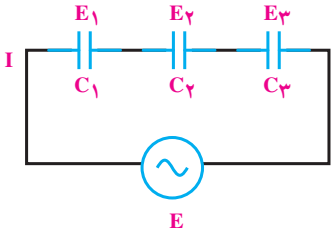
$$IX_{c_t} = IX_{c_۱} + IX_{c_۲} + IX_{c_۳}$$

با فاکتورگیری وحذف I از طرفین خواهیم داشت :

$$X_{c_t} = X_{c_۱} + X_{c_۲} + X_{c_۳}$$

که X_{c_t} مقاومت خازنی معادل است.

رابطه‌ی گفته شده عیناً شبیه رابطه‌ی محاسبه‌ی مقاومت معادل در مدارهای سری مقاومتی است.



شکل ۷ــ۱۶

ب ــ اتصال موازی خازن‌ها: مدار شکل ۸ــ۱۶ اتّصال 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 شدّت جریان کل از جمع شدّت جریان‌های شاخه‌های موازی به‌دست می‌آید، یعنی :

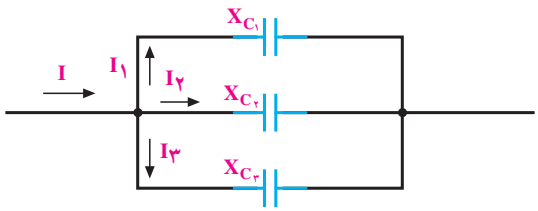
$$I = I_۱ + I_۲ + I_۳$$

به‌علاوه، طبق قانون اهم می‌دانیم که $I = \frac{E}{X_c}$. هم‌چنین می‌دانیم که در مدار موازی، ولتاژ برای همه‌ی شاخه‌ها یکسان است. پس خواهیم داشت :

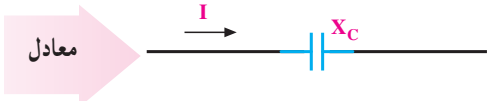
$$\frac{E}{X_{c_t}} = \frac{E}{X_{c_۱}} + \frac{E}{X_{c_۲}} + \frac{E}{X_{c_۳}}$$

با حذف E از طرفین داریم :

$$\frac{۱}{X_{c_t}} = \frac{۱}{X_{c_۱}} + \frac{۱}{X_{c_۲}} + \frac{۱}{X_{c_۳}}$$



ظرفیت معادل خازن‌های موازی برابر مجموع تک‌تک ظرفیت‌هاست.



راکتانس خازنی معادل را می‌توان با موازی فرض کردن تک‌تک راکتانس‌ها با یک‌دیگر به‌دست آورد.

شکل ۸ــ۱۶ــ اتّصال موازی خازن‌ها

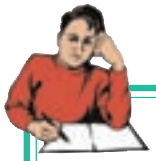
تذکر: در هر یک از اتصالات سری یا موازی خازن‌ها مقاومت خازنی را می‌توان از رابطه‌ی زیر به‌دست آورد.

$$X_{cT} = \frac{۱}{۲\pi f C_T} = \frac{۱}{\omega . C_T}$$

تحقیق کنید

در مورد نقش خازن در راه اندازی موتورهای الکتریکی تکفاز تحقیق کرده و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

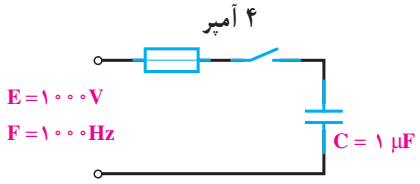
شکل ۹ ــ۱۶ــ موتور الکتریکی تک فاز



پرسش

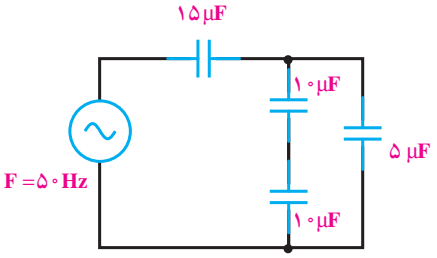
۱ــ چرا خازن از عبور جریان DC جلوگیری می‌کند؟
۲ــ رابطه‌ی بین جریان و ولتاژ دو سرخازن را با ولتاژ منبع بنویسید.
۳ــ فرکانس بر جریان خازن و امپدانس خازن چه تأثیری دارد؟
۴ــ رابطه‌ی X_c و واحد آن را بنویسید.

۱ــ در مدار شکل ۱۰ــ۱۶ با بستن کلید چه اتفاقی می‌افتد؟
(جواب : فیوز عمل می‌کند)



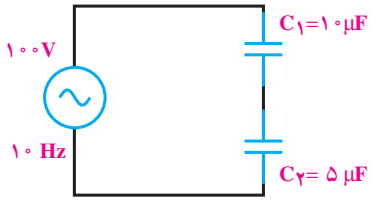
شکل ۱۰ــ۱۶

۲ــ در مدار شکل ۱۱ــ۱۶ مقدار X_C کل چه‌قدر است؟
(جواب : ۵۳۰Ω)



شکل ۱۱ــ۱۶

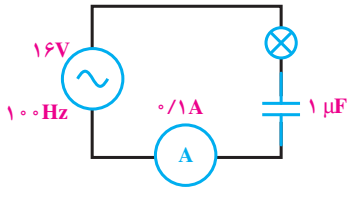
۳ ــ در مدار شکل ۱۲ــ۱۶ صفحات کدام خازن بالاترین مقدار بار را دارد؟ ولتاژ دو سر خازن چه‌قدر است؟
(جواب : هر دو خازن در یک لحظه دارای بار ذخیره‌ای برابرند.)
$\frac{۱۰۰}{۳}V$ و $\frac{۲۰۰}{۳}V$



شکل ۱۲ــ۱۶

۴ ــ افت ولتاژ دو سر یک خازن ۲۰μF در فرکانس ۱ kHz برابر ۵ ولت است. شدت جریان عبوری از خازن چه‌قدر است؟
(جواب : ۰/۶۲۹A)

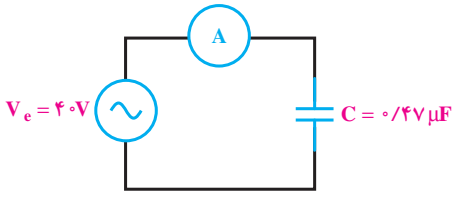
۵ ــ در مدار شکل ۱۳ــ۱۶ اگر ظرفیت خازن دو برابر شود، نور لامپ چگونه تغییر می‌کند (کم می‌شود ــ ثابت می‌ماند ــ زیاد می‌شود)؟
(جواب : زیاد می‌شود)



شکل ۱۳ــ۱۶

۶ــ در مدار شکل ۱۴ــ۱۶، آمپرمتر ۱۰۰ میلی‌آمپر مؤثر را نشان می‌دهد. فرکانس منبع چه‌قدر است؟

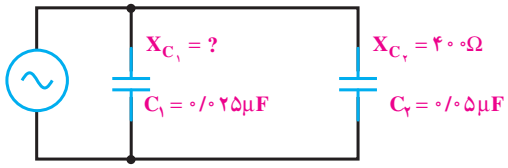
(جواب : $F \cong ۸۴۷\,Hz$)



شکل ۱۴ــ۱۶

۷ــ در مدار شکل ۱۵ــ۱۶، $X_{C_۱}$ معادل چند اهم است؟ اگر ظرفیت $C_۲$ دو برابر شود، $X_{C_۲}$ چه‌قدر می‌شود؟ چنان‌چه فرکانس مدار کم شود، $X_{C_۱}$ (افزایش ــ کاهش) می‌یابد.

(جواب : ۸۰۰Ω ، ۲۰۰Ω ، افزایش
راهنمایی : از تناسب استفاده کنید.)



شکل ۱۵ــ۱۶

منابع و مآخذ

۱ــ اصول الکترونیک، گروپ، ترجمه‌ی احمد ریاضی ــ سید محمود صموتی ومحمود همتایی، مجتمع آموزش و پژوهش تکنولوژی تهران.

۲ــ فلوید توماس،اصول و مبانی مدارهای الکتریکی، (مهرداد عابدی، مترجم)، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه امیرکبیر.

۳ــ تشریح اصول مهندسی الکترونیک، ــ (حسین چشمه قصابانی، مترجم)، انتشارات بخش فرهنگی دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی.

۴ــ اندرسن چارلز،دوره‌ی جامع برق و الکترونیک، (محمدرضا محمّدی‌فر، مترجم)، انتشارات سپهر.

۵ ــ ماشین‌های الکتریکی، احمد ریاضی و ...، انتشارات مرعشی، سال ۶۹.

۶ ــ دسور، چارلز، کوه، ارنست، نظریه‌ی اساسی مدارها و شبکه‌ها(جبّه‌دار. پرویز، مترجم)

۷ــ خدا دادی، شهرام. (۱۳۸۵). مبانی الکتریسیته. شرکت صنایع آموزشی (وابسته به وزارت آموزش و پرورش)

۸ ــ Introductory Analysis Circuits Robert Boylestad 11th Edition Printic Hall

۹ ــ Electricity made Simple

۱۰ــ Electricity One-Seven Harry Mileaf 3rd Edition Printic Hall

۱۱ــ Foundamental of Comunications

۱۲ــ How to read Electronic Circuit Diagrams

۱۳ــ Understanding Electricity and Electronics G. Randy Slone 4th Edition McGraw-Hill

۱۴ــ Transistor Foundamentals

۱۵ــ Principles of Electric Circuits Thomas Floyd 8th Edition Printic Hall