

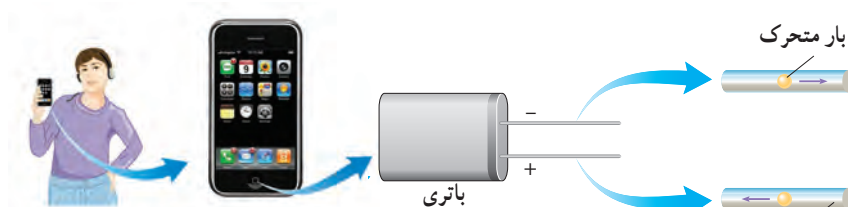
جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



پژوهش‌های زیادی دربارهٔ بهبود کیفیت باتری خودروهای الکتریکی و هیبریدی (که در آنها از موتورهای درون‌سوز بنزینی و الکتریکی با هم استفاده می‌شود) در حال انجام است. یک نوع از این باتری‌ها، باتری لیتیومی است که یکی از قطب‌های آن لیتیم و قطب دیگر آن کربن است. مسافتی که یک خودروی الکتریکی با هر بار شارژ شدن طی می‌کند، عامل مهمی است. برعکس خودروهای بنزینی که سوخت‌گیری آنها چند دقیقه‌ای بیشتر طول نمی‌کشد، شارژ کردن باتری این خودروها به چند ساعت زمان نیاز دارد. از همین رو دانشمندان در تلاش اند زمان شارژ این باتری‌ها را کاهش دهند. یکی از این راه‌ها استفاده از منابع‌های نیروی متمرکز است که از آب‌فازها استفاده می‌کند. با استفاده از این فناوری ممکن است بتوان خودروهای الکتریکی را در مدت کوتاهی شارژ کرد.

در فصل پیش با بار و میدان الکتریکی و همچنین اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در میدان الکتریکی آشنا شدیم و به بررسی برهم کنش بارهای الکتریکی در حالت سکون پرداختیم. در این فصل به بررسی و مطالعه جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم می‌پردازیم.

مثال‌های فراوانی می‌توان از کاربردهای جریان الکتریکی ارائه کرد؛ مثلاً انرژی مورد نیاز صفحه نمایشگر تلفن همراه توسط یک باتری تأمین می‌شود. انرژی الکتریکی از طریق مسیرهای رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند به نمایشگر تلفن همراه می‌رسد (شکل ۱-۲). همچنین مهندسان برق با دستگاه‌های الکتریکی زیادی از قبیل مولدهای برق و دستگاه‌های ذخیره اطلاعات سر و کار دارند و مهندسان مخابرات نگران اختلالات ناشی از فوران‌های خورشیدی (شکل ۲-۲) هستند. فیزیولوژیست‌ها و مهندسان پزشکی نیز با جریان‌های الکتریکی در رشته‌های عصبی سروکار دارند.

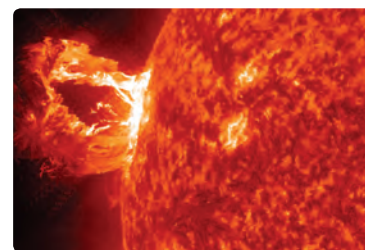


شکل ۱-۲ انرژی از باتری به صفحه نمایشگر تلفن، از طریق سیم‌های رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند، منتقل می‌شود.

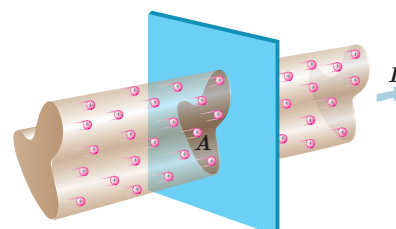
اکنون با این پرسش شروع می‌کنیم که چرا هر مجموعه‌ای از بارهای متحرک لزوماً جریان الکتریکی ایجاد نمی‌کنند؟ در واقع برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم، باید یک انتقال خالص بار از یک سطح مقطع معین رخ دهد (شکل ۲-۳) که به این منظور نیاز به ابزاری مانند باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را در جهت معینی به حرکت درآورد.

۱-۲ جریان الکتریکی

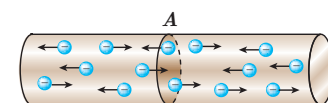
جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همه بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. برای داشتن جریان الکتریکی باید یک شارش خالص بار از یک سطح مقطع معین داشته باشیم. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. الکترون‌های آزاد در طول این سیم با تندی‌هایی از مرتبه 10^6 m/s در حرکت‌اند، ولی این حرکت به‌طور کاتوره‌ای در همه جهت‌هاست. بنابراین، هیچ شارش خالص باری از مقطعی معین نداریم (شکل ۲-۴). ولی اگر این سیم را در **مداری الکتریکی** مانند شکل ۲-۵ قرار دهیم، اختلاف پتانسیلی در دو سر سیم و میدانی الکتریکی درون آن ایجاد می‌شود و باعث حرکت الکترون‌های آزاد در سیم و ایجاد جریان می‌شود (شکل ۲-۶) به‌طوری که می‌تواند لامپ مدار ۲-۵ را روشن کند. در واقع وقتی میدان الکتریکی درون فلز ایجاد می‌شود، الکترون‌ها حرکت کاتوره‌ای خود را کمی تغییر می‌دهند و با سرعتی متوسط موسوم به **سرعت سوق**^۱ در خلاف جهت میدان به‌طور بسیار آهسته‌ای سوق پیدا می‌کنند که این موجب



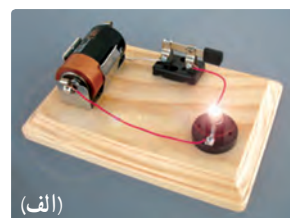
شکل ۲-۲ فوران عظیمی از الکترون‌ها و یون‌ها که از سطح خورشید پرتاب می‌شوند.



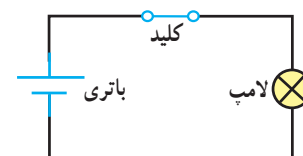
شکل ۲-۳ باریکه‌ای از بارهای مثبت از سطح مقطع A می‌گذرند و جریان I را ایجاد می‌کنند.



شکل ۲-۴ در نبود اختلاف پتانسیل، شارش بار خالصی از مقطع معین A سیم، نداریم.



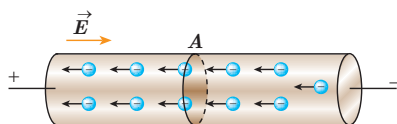
(الف)



(ب)

شکل ۲-۵ الف) یک مدار الکتریکی ساده که از لامپ، باتری، کلید و سیم‌های رابط تشکیل شده است. ب) معمولاً برای رسم مدار از نمادهای استاندارد شده‌ای برای نشان دادن اجزای مدار استفاده می‌شود.

^۱ - drift velocity



شکل ۲-۶ در حضور اختلاف پتانسیل، شارش بار خالص از مقطع A سیم، دیگر برابر صفر نیست.

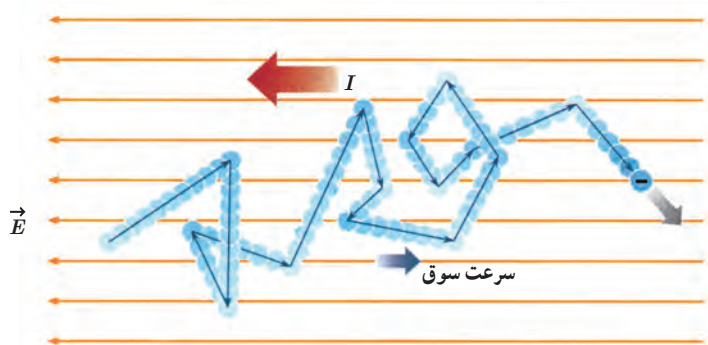


آندره ماری آمپر (۱۸۳۶-۱۷۷۵م)

آندره ماری آمپر در حومه شهر لیون فرانسه به دنیا آمد. در کودکی و نوجوانی عشق و علاقه فراوانی به ریاضیات داشت و پیوسته اطلاعاتش در زمینه علوم ریاضی را تکمیل می کرد. سرانجام به سبب نوشتن مقاله‌ای که در مورد سرگرمی‌های ریاضی که در آن مسئله‌ای را حل کرده بود و ذهن دانشمندان را مدت‌ها مشغول کرده بود، مورد توجه ریاضی‌دان‌ها و دانشمندان قرار گرفت. دو اخترشناس و ریاضی‌دان فرانسوی به نام‌های ژان دالامبر و ژوزف لالاند که تحت تأثیر نبوغ و استعداد آمپر قرار گرفته بودند به او پیشنهاد کردند که به عنوان معلم ریاضی و نجوم در مدرسه لیون تدریس کند. دو سال در مدرسه لیون تدریس کرد و در سال ۱۸۰۵ به پاریس سفر کرد تا در کالج پلی تکنیک مشغول به کار شود. در سال ۱۸۰۹ به سمت استاد ریاضی و مکانیک این کالج برگزیده شد. در سال ۱۸۱۹ دانشمند دانمارکی، یوهان ارستد کشف کرد که عقربه مغناطیسی در اثر عبور جریان از یک سیم رسانا منحرف می‌شود. آمپر با تکمیل آزمایش او، تأثیر دو سیم رسانای حامل جریان بر یکدیگر را بررسی کرد و نتیجه گرفت وقتی جهت جریان در رساناها یکسان باشد یکدیگر را جذب می‌کنند و چنان‌که جهت جریان‌ها برعکس باشد همدیگر را دفع می‌کنند. خلاصه‌ای از این تجربیات بعدها تحت عنوان کتابی به نام «مغناطیس و الکتریسیته» از آمپر به چاپ رسید.

آمپر از دانشمندانی بود که خدمات بزرگی به جهان علم کرد و به همین خاطر و قدردانی از زحمات او، دانشمندان یکای جریان را به نام آمپر نام‌گذاری کردند.

برقراری جریان الکتریکی در رسانا می‌شود (شکل ۲-۷). اندازه سرعت سوق در یک رسانای فلزی بسیار کم و مثلاً در سیم‌های مسی از مرتبه بزرگی 10^{-5} m/s یا 10^{-4} m/s است. توجه کنید که جهت قراردادی جریان الکتریکی I ، برخلاف جهت سوق الکترون‌هاست.



شکل ۲-۷ مسیر زیگزاگ یک الکترون آزاد در یک رسانای فلزی. در حضور میدان الکتریکی، این مسیر زیگزاگ در خلاف جهت میدان سوق یافته است.

فعالیت ۱-۲

سرعت سوق الکترون‌های آزاد در یک رسانا می‌تواند به کندی سرعت حرکت یک حلزون باشد. اگر سرعت سوق الکترون‌ها این قدر کم است، پس چرا وقتی کلید برق را می‌زنیم چراغ‌های خانه به سرعت روشن می‌شوند؟ (راهنمایی: شیلنگ شفاف‌ی را در نظر بگیرید. وقتی شیر را باز می‌کنید، هنگامی که شیلنگ پر از آب است، آب بلافاصله از سر دیگر شیلنگ جاری می‌شود؛ ولی اگر لکه‌ای رنگی را درون آب چکانده باشیم، می‌بینیم این لکه رنگی به آهستگی در آب حرکت می‌کند.)

اکنون می‌خواهیم تعریفی برای جریان الکتریکی در یک رسانا ارائه کنیم. فرض کنید بار خالص Δq در بازه زمانی Δt از مقطعی از رسانا می‌گذرد. نسبت $\Delta q / \Delta t$ را **جریان الکتریکی متوسط** می‌گویند. اگر این آهنگ ثابت باشد، جریان برابر است با

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (۱-۲)$$

در رابطه ۱-۲ بار الکتریکی (Δq) برحسب کولن (C)، مدت زمان (Δt) برحسب ثانیه (s) و جریان (I) برحسب آمپر (A) است. برخی از مقادیر تقریبی جریان‌های متداول عبارت‌اند از ۱A برای لامپ‌های جابجایی ۱۰۰W، ۲۰۰A برای استارت خودرو، ۱mA برای تأمین انرژی نمایشگر گوشی همراه، ۱nA برای جریان نوروهای مغزی، ۱۰kA در یک یورش آذرخش نوعی، و ۱GA در بادهای خورشیدی.^۱

در این فصل با جریان مستقیم^۲ سروکار داریم که در آن جهت جریان با زمان تغییر نمی‌کند و مقدار جریان ثابت می‌ماند.

۱- در واقع، هر بخش این مسیر زیگزاگ اندکی خمیده است که در شکل برای سادگی نشان داده نشده است.

۲- به خاطر سپردن این مقادیر ضرورتی ندارد.

مثال ۲-۱



ولتاژ باتری یک نوع ماشین حساب $3/0V$ است. وقتی ماشین حساب روشن است، این باتری باعث عبور جریان $17mA/0$ در آن می‌شود. اگر این ماشین حساب یک ساعت روشن باشد:

الف) در این مدت چه مقدار بار از مدار می‌گذرد؟ ب) باتری چقدر انرژی به مدار ماشین حساب می‌دهد؟

پاسخ: الف) باری که در یک ساعت از مدار می‌گذرد، با استفاده از رابطه $1-2$ برابر است با

$$\Delta q = I(\Delta t) = (0/17 \times 10^{-3} A)(3/6 \times 10^3 s) = 0/61 C$$

ب) بار Δq هنگام عبور از باتری انرژی پتانسیل الکتریکی به دست می‌آورد و هنگام عبور از مدار این انرژی را از دست می‌دهد. بنابراین

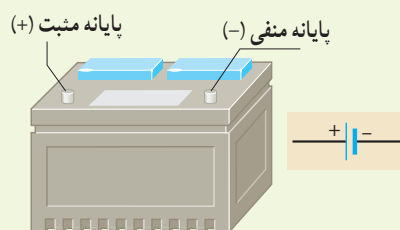
$$\Delta U = q \Delta V = (0/61 C)(3/0 V) = 1/8 J$$

تمرین ۲-۱

در رابطه $\Delta q = I(\Delta t)$ اگر I بر حسب آمپر و Δt بر حسب ساعت باشد، یکای Δq ، آمپر-ساعت می‌شود. باتری خودروها با آمپر-ساعت (Ah) و باتری گوشی‌های همراه با میلی‌آمپر-ساعت (mAh) مشخص می‌شود. هرچه آمپر-ساعت یک باتری بیشتر باشد حداکثر باری که باتری می‌تواند از مدار عبور دهد تا به طور ایمن تخلیه شود، بیشتر است.

الف) باتری استاندارد خودرویی، $50 Ah$ است. اگر این باتری جریان متوسط $5/0 A$ را فراهم سازد، چقدر طول می‌کشد تا خالی شود؟

ب) روی یک باتری قلمی مقدار $1000 mAh$ نوشته شده است. اگر این باتری جریان متوسط $100 \mu A$ را فراهم سازد، چه مدت طول می‌کشد تا خالی شود؟

خوب است بدانید: یون‌رانی^۱

برای درمان التهاب سه روش وجود دارد. روش نخست که بدون درد است، خوردن دارو است. در این روش مقدار کمی دارو، از مرتبه $1 \mu g$ ، به بافت آسیب‌دیده می‌رسد. روش دوم تزریق آمپول است. این روش دردناک است، ولی می‌تواند داروی زیادی، از مرتبه $10 mg$ را به بافت آسیب‌دیده برساند، یعنی 10000 برابر بیش از روش خوردن دارو. اما از دهه 90 میلادی روش سوم نیز مطرح شده است که بدون درد است، ولی می‌تواند مقدار دارویی از مرتبه $100 \mu g$ را به بافت آسیب‌دیده برساند. این روش که موسوم به یون‌رانی است، دارو را با استفاده از جریان‌های الکتریکی بسیار ضعیف به بافت آسیب‌دیده می‌رساند. یک وسیله یون‌رانی شامل یک باتری و دو الکترود است (و نیز برخی مدارهای الکترونیکی که پرستار را قادر می‌سازد که بزرگی جریان اعمال شده را کنترل کند). داروی ضد التهاب (معمولاً دگزامتازون^۲) را به محل التهاب مالیده و الکترود منفی را روی آن

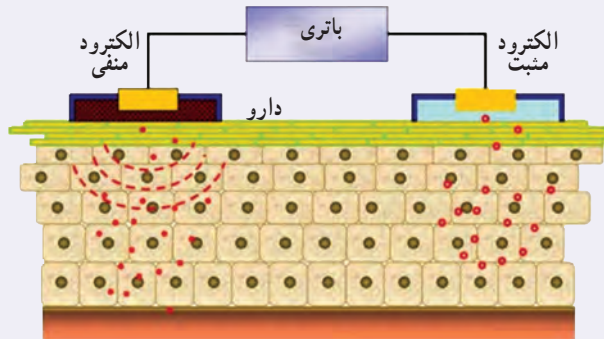
۱- Iontophoresis

۲- Dexamethasone

قرار می‌دهند. جریان از طریق پوست عبور می‌کند و دارو را به بافت آسیب‌دیده تا عمق حداکثر ۱/۷cm می‌رساند (شکل الف). اگر پرستاری بخواهد مثلاً ۸۰µg دارو را با جریان متداول ۱۴mA به پای آسیب‌دیده برساند (شکل ب)، محاسبه نشان می‌دهد که این عمل ۱۵ دقیقه به طول خواهد انجامید.



(ب)



(الف)

۲-۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم

همان‌طور که در بخش قبل دیدیم وقتی در مدار الکتریکی کلید را می‌بندیم، یک اختلاف پتانسیل در دو سر سیم ایجاد می‌شود و باعث حرکت الکترون‌های آزاد در سیم مدار می‌شود. این الکترون‌ها با اتم‌های رسانا که در حال نوسان‌اند برخورد می‌کنند و این موضوع باعث گرم شدن رسانا می‌شود. در واقع الکترون‌های آزاد هنگام حرکت در رسانا همیشه با نوعی مقاومت روبه‌رو هستند. اصطلاحاً می‌گوییم رسانا دارای **مقاومت الکتریکی**^۱ است. از اینجا می‌توان پیش‌بینی کرد که مقاومت الکتریکی به ابعاد هندسی رسانا، یعنی طول و سطح مقطع رسانا بستگی دارد. همچنین جنس ماده رسانا و دمای آن بر مقاومت الکتریکی اثر می‌گذارد.

تحت یک اختلاف پتانسیل یکسان، دو سیم با مقاومت الکتریکی متفاوت، جریان‌های مختلفی را از خود عبور می‌دهند؛ به‌طوری‌که سیم با مقاومت کمتر، جریان بیشتری از خود عبور می‌دهد و بالعکس. از اینجا می‌توان مقاومت الکتریکی بین دو نقطه از یک رسانا را به صورت زیر تعریف کرد:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2-2)$$

در این رابطه مقاومت الکتریکی (R) بر حسب ولت بر آمپر (V/A) می‌شود که به پاس خدمات علمی **جرج سیمون اهم** به نام **اهم** نام‌گذاری شده است و با نماد Ω نشان داده می‌شود. رسانایی را که دارای مقاومت الکتریکی است، اصطلاحاً **مقاومت**^۲ می‌نامند و آن را در مدارهای الکتریکی با نماد \sim نمایش می‌دهند.



جورج سیمون اهم (۱۸۵۴-۱۷۸۷م)

جورج سیمون اهم در شهر باواریا آلمان متولد شد. جورج در ۱۸ سالگی به‌عنوان معلم ریاضی در یکی از مدارس سوئیس مشغول به کار شد. اهم مطالعاتش را در رشته ریاضی دنبال کرد و در سال ۱۸۱۱ موفق به اخذ درجه دکترای ریاضی شد. در سی سالگی به کالجی در کلن رفت و به‌عنوان استاد ریاضی مشغول به کار شد. در سال ۱۸۲۸ او مقاله‌ای تحت عنوان «اندازه‌گیری‌های ریاضی جریان برق» را به چاپ رساند. او در این مقاله فرمول مشهور خود را ارائه کرد. در سال ۱۸۴۱ به دریافت بهترین نشان علمی انجمن سلطنتی انگلستان مفتخر گردید. در سال ۱۸۸۱، انجمن مهندسان برق جهان به اتفاق آرا یکای مقاومت الکتریکی را به نام «اهم» نام‌گذاری کردند.

۱- Resistance

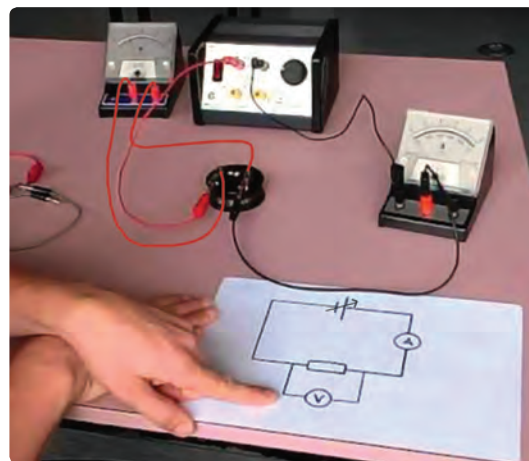
۲- Resistor

۲- از حروف الفبای یونانی که امگا خوانده می‌شود.

وسایله‌هایی که جریان الکتریکی را از خود عبور می‌دهند ممکن است با تغییر اختلاف پتانسیل اعمال شده و در نتیجه تغییر جریان عبوری، مقاومت ثابتی از خود بروز دهند و یا با تغییر اختلاف پتانسیل، مقاومت‌شان تغییر کند. برای تشخیص چنین وسایلی از هم، آزمایشی را تدارک می‌بینیم؛ به این ترتیب که وسیله را مانند شکل ۲-۸ به یک آمپرسنج، یک ولت‌سنج و یک منبع تغذیه با ولتاژ قابل تنظیم (دستگاهی که با آن می‌توان اختلاف پتانسیل را در دو سر مدار برقرار کرد و آن را تغییر داد) می‌بندیم. اختلاف پتانسیل دو سر وسیله را به کمک منبع تغذیه تغییر می‌دهیم و در هر نوبت جریان عبوری از وسیله و اختلاف پتانسیل دو سر آن را با آمپرسنج و ولت‌سنج مدار اندازه می‌گیریم و سپس با استفاده از رابطه ۲-۲ مقاومت الکتریکی را محاسبه و نتایج را در جدولی یادداشت می‌کنیم. اگر مقاومت الکتریکی در ولتاژهای مختلف (در دمای ثابت)، مقدار ثابتی باشد، اصطلاحاً گفته می‌شود آن وسیله از **قانون اهم** پیروی می‌کند و آن وسیله را مقاومت یا رسانای اهمی می‌نامند. به عبارتی جریان عبوری از یک مقاومت اهمی همواره با اختلاف پتانسیل اعمال شده به دو سر آن رابطه مستقیم دارد.

این قانون برای فلزات و بسیاری از رساناهای غیر فلزی در دمای ثابت برقرار است. جدول ۲-۱ مقادیر اندازه‌گیری شده برای جریان و اختلاف پتانسیل یک مقاومت را نشان می‌دهد که از قانون اهم پیروی می‌کند. همان‌طور که نمودار شکل ۲-۹ نشان می‌دهد جریان با ولتاژ برای این وسیله به‌طور خطی افزایش می‌یابد.

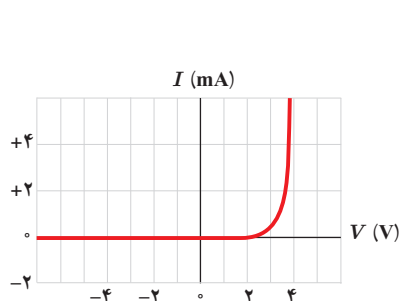
با این حال وسیله‌های زیادی نیز یافت می‌شود که از این قانون پیروی نمی‌کنند. یکی از این وسیله‌های غیر اهمی، دیود نورگسیل (LED) است که با آن بعداً آشنا می‌شویم. نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل چنین دیودی تقریباً شبیه شکل ۲-۱۰ است.



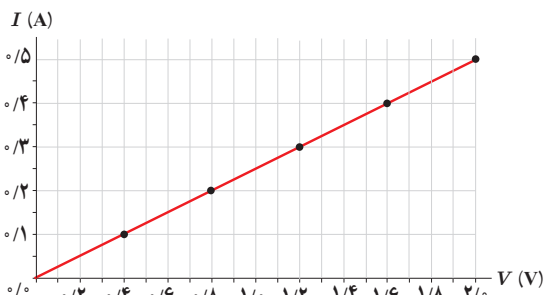
شکل ۲-۸ اسباب تحقیق قانون اهم. توجه کنید که آمپرسنج در مدار به‌صورت متوالی و ولت‌سنج به‌صورت موازی بسته شده است.

جدول ۲-۱ مقادیری نوعی برای یک رسانای اهمی

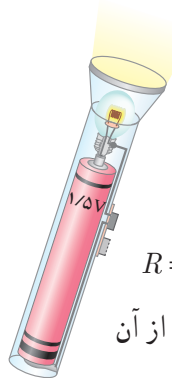
$R (\Omega)$ مقاومت	$I (A)$ جریان	$V (V)$ اختلاف پتانسیل
۴	۰/۱	۰/۴
۴	۰/۲	۰/۸
۴	۰/۳	۱/۲
۴	۰/۴	۱/۶
۴	۰/۵	۲/۰



شکل ۲-۱۰ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل برای یک دیود نورگسیل



شکل ۲-۹ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل نشان می‌دهد که برای این رسانای اهمی، جریان به‌طور مستقیم با ولتاژ افزایش می‌یابد.



یک لامپ چراغ قوه کوچک از یک باتری $1.5V$ ، جریانی برابر $30mA$ می کشد. با فرض آنکه رشته لامپ، یک رسانای اهمی باشد، الف) مقاومت آن چقدر است؟ ب) اگر باتری ضعیف شود و ولتاژ به $1.2V$ افت کند، جریان چقدر می شود؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۲-۲ برای مقاومت رشته لامپ داریم:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1.5V}{0.030A} = 50\Omega$$

ب) دوباره از رابطه ۲-۲ استفاده می کنیم. با توجه به اینکه اکنون مقاومت رشته لامپ را داریم، جریان عبوری از آن

چنین می شود:

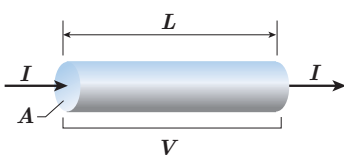
$$I = \frac{V}{R} = \frac{1.2V}{50\Omega} = 0.024A$$

۳-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

در بخش قبل پیش بینی کردیم که مقاومت الکتریکی به طول و سطح مقطع رسانا و نیز ترکیب و ساختار آن بستگی دارد.

آزمایش و محاسبات نظری نشان می دهد اگر سطح مقطع جسم در تمام طول آن یکسان باشد (شکل ۱۱-۲)، مقاومت آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3-2)$$



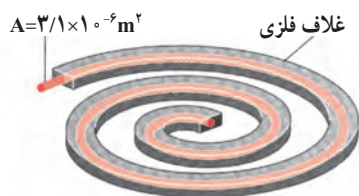
شکل ۱۱-۲ از سیمی به طول L و مقطع یکنواخت A ، تحت اختلاف پتانسیل V ، جریان I می گذرد.

که در آن طول رسانا (L) برحسب متر (m)، مساحت مقطع جسم (A) برحسب متر مربع (m^2)، و مقاومت جسم (R) برحسب اهم (Ω) است، و بنابراین، کمیت ρ که به آن **مقاومت ویژه** گفته می شود برحسب اهم-متر ($\Omega \cdot m$) می شود. این بستگی مقاومت به طول و مساحت مقطع جسم را می توان با شبیه سازی های ساده ای نیز درک کرد. هرچه جسم بلندتر شود الکترون ها هنگام عبور از آن برخوردهای بیشتری با اتم ها پیدا می کنند. بنابراین، مقاومت الکتریکی جسم بیشتر می شود. کوچک تر شدن سطح مقطع جسم را نیز می توان به کوچک تر شدن سطح مقطع لوله ای تشبیه کرد که در آن شارهای در جریان است. کوچک تر شدن مقطع سبب کاهش عبور شار می شود که به معنای افزایش مقاومت در برابر عبور شار است.

مقاومت ویژه یک ماده به ساختار اتمی و دمای آن بستگی دارد. رساناهای الکتریکی خوب مقاومت ویژه بسیار کم و عایق های خوب مقاومت ویژه بسیار زیادی دارند. جدول ۲-۲ مقاومت ویژه برخی مواد را در دمای $20^\circ C$ نشان می دهد. همان طور که این جدول نشان می دهد دسته ای از مواد مانند ژرمانیم و سیلیسیم نیز وجود دارند که مقاومت ویژه آنها بین مقاومت ویژه رساناها و نارساناهاست. به این دسته از مواد، **نیم رسانا** می گویند.

مقاومت ویژه رساناهای فلزی با افزایش دما زیاد می شود در حالی که مقاومت ویژه رساناها با افزایش دما کاهش می یابد. در برخی مواد، مانند جیوه و قلع با کاهش دما، مقاومت ویژه در دمای خاصی به صورت ناگهانی به صفر افت می کند و در دماهای پایین تر، همچنان صفر می ماند. این پدیده را **ابررسانایی** می گویند.

مثال ۲-۲



یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

شکل روبه‌رو، المنت یک اجاق برقی را نشان می‌دهد. این المنت شامل سیمی به طول $1/1\text{m}$ و سطح مقطع $3/1 \times 10^{-6}\text{m}^2$ است که داخل ماده‌ای عایقی قرار گرفته است که خود، درون یک غلاف فلزی است. با عبور جریان، المنت داغ می‌شود. مقاومت ویژه ماده سازنده سیم در دمای $T_s = 32^\circ\text{C}$ برابر با $\rho_s = 6/8 \times 10^{-5}\Omega\cdot\text{m}$ است. با افزایش دمای سیم مقاومت ویژه آن افزایش می‌یابد و در دمای 42°C به $8/2 \times 10^{-5}\Omega\cdot\text{m}$ می‌رسد. مقاومت سیم در دماهای 32°C و 42°C چقدر است؟

پاسخ:

با استفاده از رابطه ۲-۳ مقاومت سیم در دمای 32°C برابر است با^۱

$$R = \rho \frac{L}{A} = (6/8 \times 10^{-5}\Omega\cdot\text{m}) \frac{(1/1\text{m})}{(3/1 \times 10^{-6}\text{m}^2)} = 24\Omega$$

و در دمای 42°C برابر است با

$$R = \rho \frac{L}{A} = (8/2 \times 10^{-5}\Omega\cdot\text{m}) \frac{(1/1\text{m})}{(3/1 \times 10^{-6}\text{m}^2)} = 29\Omega$$

تمرین ۲-۲

سیم کشی خانه‌ها معمولاً با سیم‌های مسی‌ای صورت می‌گیرد که قطری برابر با $2/32\text{mm}$ دارد. مقاومت 100m از این سیم‌ها در دمای اتاق چقدر است؟

جدول ۲-۲. مقاومت ویژه در دمای 20°C برخی از رساناها و نیم‌رساناها

ماده	مقاومت ویژه ρ ($\Omega\cdot\text{m}$)
رسانای فلزی	
نقره	$1/6 \times 10^{-8}$
مس	$1/7 \times 10^{-8}$
طلا	$2/4 \times 10^{-8}$
آلومینیم	$2/8 \times 10^{-8}$
تنگستن	$5/5 \times 10^{-8}$
آهن	$9/7 \times 10^{-8}$
پلاتین	10×10^{-8}
سرب	22×10^{-8}
کُنستانتان ^۱	44×10^{-8}
نیکروم ^۲	100×10^{-8}
نیم‌رسانا	
گرافیت	$3/5 \times 10^{-5}$
ژرمانیم	$0/46$
سیلیسیم خالص	$2/5 \times 10^3$
عایق	
انواع شیشه	$10^{10} - 10^{14}$
لاستیک سخت	10^{13}
کوارتز (ذوب شده)	10^{16}

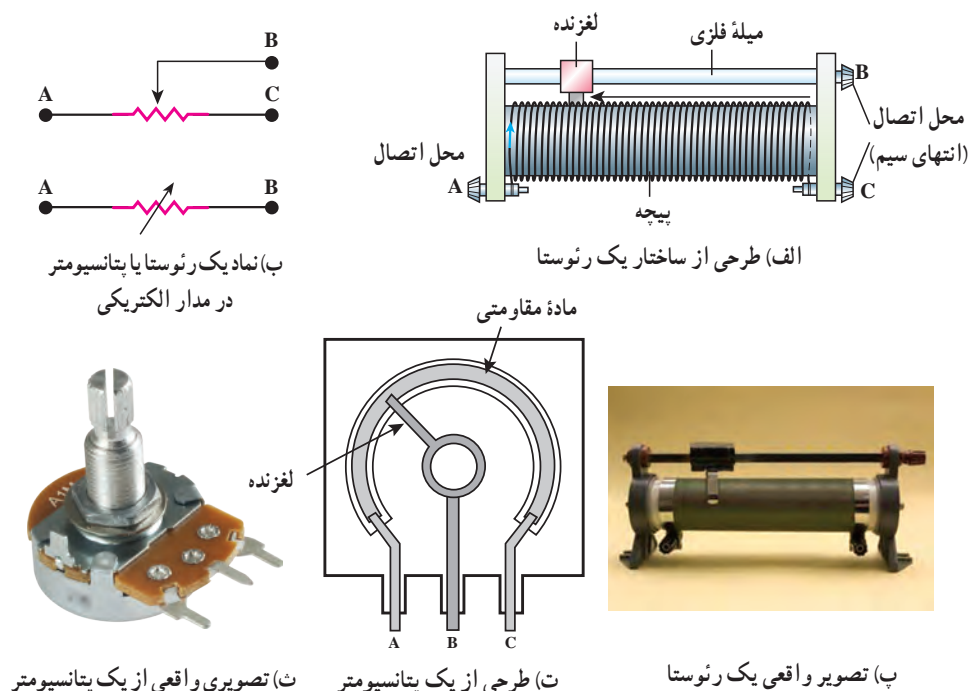
۱- 60°C درصد مس، 40°C درصد نیکل۲- 59°C درصد نیکل، 23°C درصد مس، 16°C درصد کرم و ...

رئوستا: رئوستا^۲ نوعی مقاومت متغیر است که از سیمی با مقاومت ویژه نسبتاً زیاد ساخته شده است. این سیم روی استوانه‌ای نارسانا پیچیده شده و با استفاده از دکمه‌ای لغزنده که روی ریلی در بالای استوانه قرار دارد و انتهای آن با سیم در تماس است می‌تواند قسمت دلخواهی از سیم را در مسیر جریان قرار دهد، و بنابراین مقدار مقاومت را تغییر دهد (شکل ۲-۱۲). در مدارهای الکترونیکی وسیله‌ای به نام پتانسیومتر^۳ نقش رئوستا را دارد.

۱- از افزایش طول و مساحت سیم بر اثر افزایش دما چشم‌پوشی می‌شود.

۲- Rheostat

۳- Potentiometer

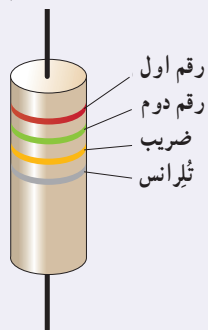


شکل ۲-۱۳

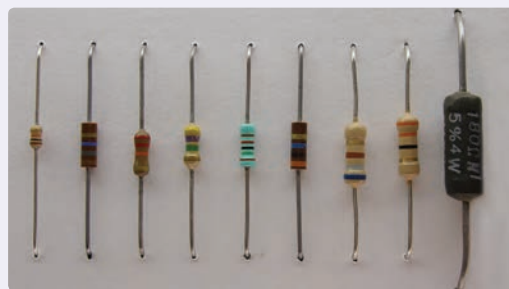
خوب است بدانید

مقاومت‌های ترکیبی

مقاومت‌ها با فناوری‌های مختلفی ساخته می‌شوند. نوعی از مقاومت‌ها، مقاومت‌های ترکیبی^۱ هستند. این مقاومت‌ها معمولاً از کربن، برخی نیم‌رساناها، و یا لایه‌های نازک فلزی ساخته شده‌اند. مقاومت‌های ترکیبی را در اندازه‌های خاص استاندارد تولید می‌کنند. مقدار این مقاومت‌ها یا روی آنها نوشته می‌شود، یا عمدتاً به صورت کدی رنگی نشان داده می‌شود که با ۳ یا ۴ حلقه رنگی روی آنها مشخص شده است (شکل الف). هر رنگ، معرّف عددی است که در جدول داده شده است. دو حلقه اول (از آن طرفی که به یک سر مقاومت نزدیک‌تر است) به ترتیب، رقم اول و رقم دوم مقاومت را نشان می‌دهند. رقم حلقه سوم ضریبی



(ب) مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل ۲۵kΩ با تولرانس ۱۰ درصد است.



(الف) تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی

جدول کد رنگی مقاومت‌ها			
رنگ	عدد	ضریب	تولرانس
سیاه	۰	۱	
قهوه‌ای	۱	۱۰ ^۱	
قرمز	۲	۱۰ ^۲	
نارنجی	۳	۱۰ ^۳	
زرد	۴	۱۰ ^۴	
سبز	۵	۱۰ ^۵	
آبی	۶	۱۰ ^۶	
بنفش	۷	۱۰ ^۷	
خاکستری	۸	۱۰ ^۸	
سفید	۹	۱۰ ^۹	
طلایی		۱۰ ^{-۱}	۵٪
نقره‌ای		۱۰ ^{-۲}	۱۰٪
بی‌رنگ			۲۰٪

^۱ composition resistors

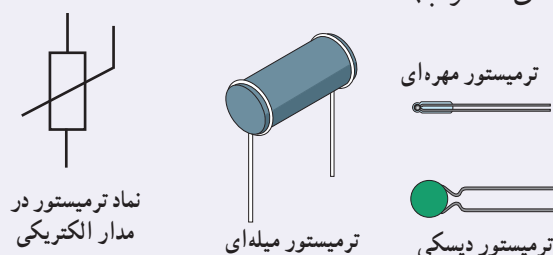
است به صورت 10^n که در ستون سوم جدول مشخص شده است. حلقه چهارم یک حلقه طلایی یا نقره‌ای رنگ است که **تولرانس**^۱ نامیده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت را برحسب درصد مشخص می‌کند (شکل ب). نبود نوار چهارم به معنای آن است که تولرانس 20° درصد است. برای خواندن حلقه‌های رنگی، مقاومت را طوری به دست می‌گیریم که حلقه تولرانس در سمت راست قرار گیرد و بقیه حلقه‌ها را از سمت چپ به راست می‌خوانیم.

مقاومت‌های خاص و دیودها

۱- **ترمیس‌تور**^۲: ترمیس‌تور نوعی از مقاومت است که بستگی مقاومت الکتریکی آن به دما با مقاومت‌های الکتریکی معمولی تفاوت دارد. اغلب از ترمیس‌تورها به عنوان حسگر دما در مدارهای حساس به دما مانند زنگ خطر آتش و دماپاها و نیز در دماسنج‌ها استفاده می‌شود. ترمیس‌تورها در ابعاد کوچکی ساخته می‌شوند و شکل‌های متفاوتی دارند که رایج‌ترین آنها دیسکی، مهره‌ای، و میله‌ای است (شکل‌های الف و ب).

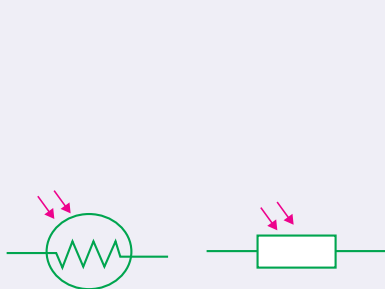


(ب) تصویری از چند ترمیس‌تور دیسکی واقعی



(الف) طرحی از چند ترمیس‌تور و نماد آن در مدارهای الکتریکی

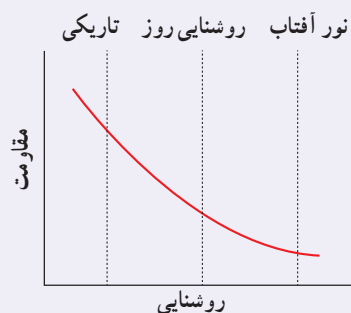
۲- **مقاومت‌های نوری**^۳ (LDR): مقاومت نوری، نوعی مقاومت است که مقاومت الکتریکی آن به نور تابیده شده به آن بستگی دارد، به طوری که با افزایش شدت نور، از مقاومت آن کاسته می‌شود. مثلاً یک LDR نوعی در تاریکی مقاومتی چند مگا اهمی دارد، در حالی که در یک نور مناسب، مقاومت آن به چند صد اهم می‌رسد. نوعی از این مقاومت‌ها از جنس نیم‌رسانای خالص، مانند سیلیسیم هستند که با افزایش شدت نور تابیده شده از مقاومت آنها کاسته می‌شود. مثلاً شکل پ مقاومت الکتریکی چنین LDRهایی را بر حسب روشنایی^۵ (که با یکای LUX سنجیده می‌شود) نشان می‌دهد. شکل ت تصویری از چند LDR و شکل ث دو نماد این مقاومت‌ها در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد.



(ث) نماد LDR در دو استاندارد متفاوت



(ت) تصویری از چند LDR



(پ) مقاومت بر حسب روشنایی برای یک LDR نوعی

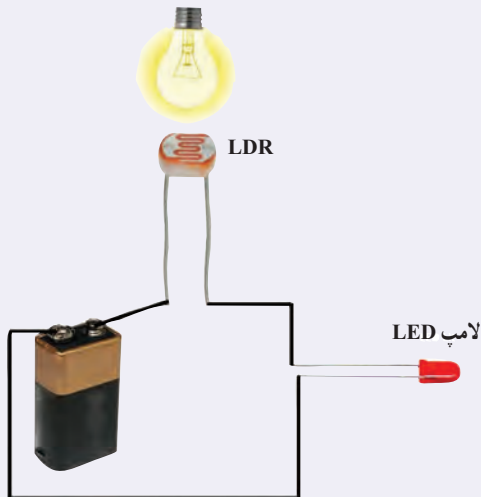
۱- Tolerance

۲- Thermistor، برگرفته از عبارت Thermal Sensitive Resistor به معنای مقاومت حساس به دما.

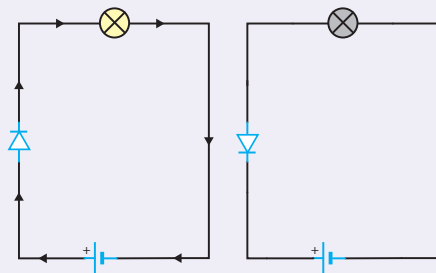
۳- Photoresistor

۴- Light Dependent Resistor

۵- Illumination



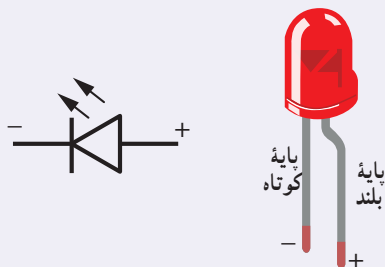
۵) یک مدار ساده متشکل از یک LDR، یک باتری، و یک لامپ LED. با روشن شدن چراغ روشنایی لامپ LED روشن می‌شود.



۵) دیود در یک جهت جریان را عبور می‌دهد و در جهت مخالف مانع عبور جریان می‌شود.



۵) تصویری از چند دیود نورگسیل



۵) تصویری از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی

برای اینکه به درکی از ساز و کار این مقاومت‌ها برسید، شکل ج را در نظر بگیرید که در آن یک LDR در مداری ساده به یک لامپ LED متصل شده است. تا هنگامی که لامپ روشنایی شکل خاموش باشد، LDR مقاومت بالایی دارد و مانع از روشن شدن لامپ LED می‌شود. با روشن شدن لامپ روشنایی از مقاومت LDR کاسته می‌شود و لامپ LED روشن می‌گردد. با تنظیم لامپ روشنایی به تریبی که LDR در معرض نور بیشتری قرارگیرد، شدت نور لامپ LED بیشتر می‌شود.

از این ویژگی LDRها در تجهیزات گوناگونی از جمله چشم‌های الکترونیکی، دزدگیرها، کنترل‌کننده‌های خودکار، و چراغ‌های روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شود.

۳- دیودها^۱: دیود قطعه‌ای است که هرگاه در مداری قرار گیرد، جریان را تنها از یک سو عبور می‌دهد و مقاومت آن در برابر عبور جریان در این سو ناچیز است. به همین دلیل، دیود را اغلب به عنوان یک سوکننده جریان در نظر می‌گیرند و آن را با نماد $\rightarrow|$ در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهند. پیکان در این نماد جهتی را نشان می‌دهد که جریان می‌تواند از دیود عبور کند. مثلاً مدارهای ساده شکل چ نشان می‌دهد که با تعویض جهت دیود، جریان از مدار عبور نمی‌کند و لامپ خاموش می‌شود. همچنین از دیود در مدارهای یک سوکننده برای تبدیل جریان‌های متناوب به جریان‌های مستقیم استفاده می‌شود.

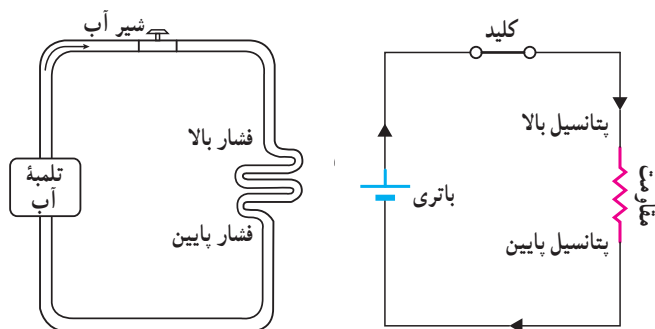
دیودها انواع متفاوتی دارند که یکی از معروف‌ترین آنها دیودهای نورگسیل یا LED^۲ است (شکل ح). شکل خ تصویری واضح از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد. در این دیودها از نیم‌رساناهایی استفاده می‌شود که با عبور جریان از آنها LED از خود نورگسیل می‌کند و بنابراین، مقداری از انرژی الکتریکی به نور تبدیل می‌شود. بسته به نوع نیم‌رسانای به کاررفته، رنگ نورگسیل شده از LED می‌تواند از فروسرخ تا فرابنفش باشد.

۲-۴ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

برای بالا بردن آب از سطح زمین به یک تلمبه آب نیاز است تا آب را به ارتفاع معینی برساند. بدین ترتیب، آب انرژی پتانسیل گرانشی لازم برای جریان یافتن و انجام کار معینی را کسب می‌کند (شکل ۲-۱۳). برای اینکه بارهای الکتریکی را نیز از یک مقاومت الکتریکی عبور دهیم تا جریان ثابتی برقرار شود، لازم است بین دو سر مقاومت اختلاف پتانسیلی برقرار کنیم. این کار می‌تواند توسط وسیله‌هایی مانند باتری انجام شود. به چنین وسیله‌هایی که با انجام کار روی بار الکتریکی، جریان ثابتی از بارهای الکتریکی در یک مدار ایجاد می‌کند، منبع نیروی محرکه الکتریکی گفته می‌شود. منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی (مانند باتری‌ها) با افزایش انرژی پتانسیل بارهای الکتریکی هنگام عبور از منبع، جریان ثابتی را در مدار برقرار می‌کنند (شکل ۲-۱۴).



شکل ۲-۱۳ یک سرسره آبی. در واقع یک تلمبه، آب را مدام به بالای سرسره پمپ می‌کند و موجب جریان یافتن آب و سر خوردن شخص بر روی سرسره می‌شود.



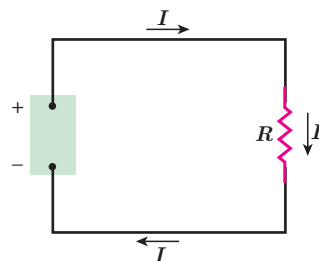
شکل ۲-۱۴ همان‌طور که تلمبه آب انرژی لازم برای شارش آب را فراهم می‌کند، باتری نیز انرژی لازم برای برقراری یک جریان را مهیا می‌سازد.

انرژی لازم برای ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی در یک منبع نیروی محرکه الکتریکی با سازوکارهای مختلفی به دست می‌آید. مثلاً باتری‌ها که در علوم هشتم با آنها آشنا شدید این انرژی را از طریق واکنش‌های شیمیایی که در آنها رخ می‌دهد مهیا می‌سازند. پیل‌های سوختی، سلول‌های خورشیدی و مولدهای الکتریکی نمونه‌های دیگری از منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی‌اند.

مدار ساده الکتریکی شکل ۲-۱۵ را در نظر بگیرید. منبع نیروی محرکه هنگام عبور بار q از منبع کاری به اندازه ΔW روی آن انجام می‌دهد تا آن را در مدار به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی محرکه الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا آن را از پایانه با پتانسیل کمتر به پایانه با پتانسیل بیشتر ببرد، اصطلاحاً نیروی محرکه الکتریکی^۱ (emf) نامیده و با رابطه زیر تعریف می‌شود^۲:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta W}{\Delta q} \quad (2-4)$$

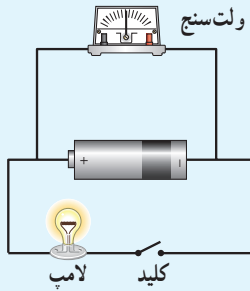
یکای کمیت نیروی محرکه الکتریکی همان یکای اختلاف پتانسیل الکتریکی، یعنی ولت (V) است ($1V = 1J/C$). پس اگر نیروی محرکه یک باتری مثلاً $1.5V$ باشد، به این معناست که باتری روی هر کولن باری که از آن می‌گذرد $1.5J$ کار انجام می‌دهد و به این ترتیب انرژی پتانسیل الکتریکی آن را $1.5J$ افزایش می‌دهد.



شکل ۲-۱۵ یک مدار ساده الکتریکی شامل مقاومت R ، منبع نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} و سیم‌های رابط

^۱ Electromotive Force

^۲ توجه کنید که نیروی محرکه الکتریکی واژه نامناسبی است؛ زیرا emf نیرو نیست؛ بلکه مانند پتانسیل یک کمیت انرژی به ازای واحد بار است. نماد نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} است که فونت خاصی از حرف E یونانی می‌باشد.



به کمک یک باتری، سیم‌های رابط، لامپ کوچک، ولت‌سنج و کلید، مداری همانند شکل روبه‌رو درست کنید. قبل از بستن کلید عددی را که ولت‌سنج نشان می‌دهد بخوانید. سپس کلید را ببندید و دوباره عددی را که ولت‌سنج نشان می‌دهد بخوانید. در کدام حالت ولت‌سنج عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد؟ چرا؟ در ادامه با علت تفاوت این دو عدد آشنا خواهید شد.

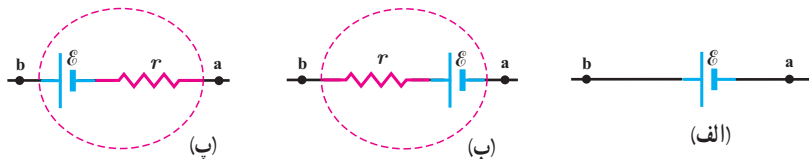
منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی، یا آرمانی هستند و یا واقعی. اختلاف پتانسیل پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع آرمانی برابر با نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} آن است:

$$\Delta V = \mathcal{E} \quad (۵-۲)$$

معمولاً اختلاف پتانسیل پایانه‌های منبع نیروی محرکه (آرمانی یا واقعی) را به منظور ساده‌سازی به جای ΔV با V نشان می‌دهند.

منبع آرمانی در واقعیت وجود ندارد و منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی همواره دارای مقاومتی داخلی (r) هستند؛ یعنی درون آنها مقاومتی در برابر حرکت بارها وجود دارد. بنابراین، وقتی جریان از این منابع بگذرد، اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های آنها برخلاف منابع آرمانی، متفاوت از نیروی محرکه الکتریکی خواهد شد. شکل ۱۶-۲ نماد منبع نیروی محرکه را در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهد.

شکل ۱۶-۲ در مدارهای الکتریکی، منبع نیروی محرکه الکتریکی آرمانی را به صورت (الف) و منبع‌های واقعی را به صورت (ب) یا (ب) نمایش می‌دهند.



در یک مدار الکتریکی ساده که از یک منبع نیروی محرکه واقعی با نیروی محرکه \mathcal{E} و مقاومت داخلی r و یک مقاومت R ساخته شده است (شکل ۱۷-۲) اختلاف پتانسیل پایانه‌های منبع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V = \mathcal{E} - Ir \quad (۶-۲)$$

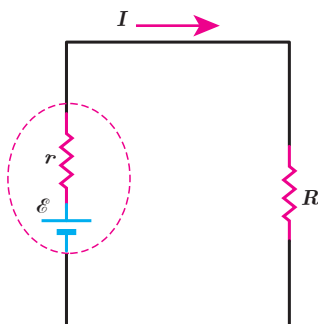
که در آن I جریان گذرنده از منبع است.

در مدار شکل ۱۷-۲ دو سر باتری به دو سر مقاومت R وصل شده است. بنابراین اختلاف پتانسیل دو سر باتری $(V = \mathcal{E} - Ir)$ با اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت $(V = IR)$ برابر است. در نتیجه داریم:

$$\mathcal{E} - Ir = IR$$

و بنابراین:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad (۷-۲)$$



شکل ۱۷-۲ مداری ساده شامل یک باتری واقعی و مقاومت R

خوب است بدانید: ماهی الکتریکی



ماهی‌های عظیم‌الجثه الکتریکی مانند تورپدو در اقیانوس اطلس شمالی و ماهی الکتروفوروس در آمازون می‌توانند جریانی کافی برای کشتن یا بی‌حس کردن طعمه، یا حتی بی‌حس کردن یک انسان تولید کنند. مثلاً ماهی تورپدو این کار را با یک تپ (پالس) ۵۰ آمپر و حدوداً ۶۰ ولت انجام می‌دهد. در زمان‌های دور، گاهی از ماهی‌های الکتریکی برای مقاصد درمانی استفاده می‌شد که این نخستین نوع شوک درمانی بود. ولتاژ این شوک ناشی از سلول‌های زیستی پولکی شکلی موسوم به الکتروپلاک است که در واقع مانند یک باتری عمل می‌کنند. شکل، تصویر ماهی الکتریکی تورپدو را نشان می‌دهد. در زیر بالچه‌های این ماهی، انبوهی از الکتروپلاک‌ها کنار هم قرار گرفته‌اند.

خوب است بدانید: آثار تخریبی الکتریسته بر بدن انسان

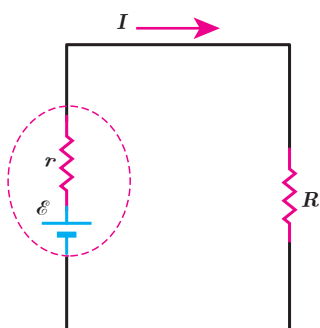
اثر جریان‌های الکتریکی بر بدن	
جریان	اثر
کمتر از ۰/۰۰۰۱A	جریان حس نمی‌شود.
۰/۰۰۰۱A	احساس سوزش یا گرما
۰/۰۰۱A تا ۰/۰۱A	انقباض غیرعادی عضله‌ها، احساس درد
۰/۰۱۵A	از دست رفتن کنترل عضله‌ها
۰/۰۷A	اگر از قلب بگذرد، سبب اختلال جدی می‌شود.
۰/۱۰A تا ۰/۵۰A	پرش عضله بطنی قلب
۰/۵۰A تا چند آمپر	ایست قلبی، اگر جریان سریع قطع شود، قلب مجدداً به کار می‌افتد.
بیشتر از چند آمپر	ایست قلبی، قطع تنفس، سوختگی.

اگر بین دو نقطه از بدن ما اختلاف پتانسیلی برقرار شود، جریان الکتریکی از بدن می‌گذرد. مقدار این جریان به مقاومت الکتریکی بدن بستگی دارد که عمدتاً ناشی از پوست است. هرچه پوست خشک‌تر باشد، مقاومت بیشتری دارد، ولی اگر پوست خیس یا مرطوب باشد، زخمی سر باز داشته باشد، و یا با گرمی پوشیده شده باشد، مقاومت کمتر می‌شود و مقدار خطرناکی از جریان می‌تواند از بدن شخص عبور کند. به همین ترتیب، اگر شخصی بر زمین خیس، یا در آب ایستاده باشد و بین نقطه‌ای از بدن او با منبع ولتاژ تماس خوبی برقرار شود، جریان نسبتاً زیادی از بدن وی عبور خواهد کرد. در این صورت، حتی اگر ولتاژ کم هم باشد، جریان می‌تواند آن قدر زیاد باشد که موجب مرگ شود. از سوی دیگر اگر مقاومت الکتریکی منطقه تماس زیاد باشد و مثلاً شخص بر پایه‌های عایق ایستاده باشد، این خطر بسیار کم می‌شود.

دستگاه مرکزی اعصاب انسان در مقابل شوک‌های الکتریکی

بسیار آسیب‌پذیر است. اگر جریانی که در یک شوک الکتریکی از مغز می‌گذرد بزرگ باشد، ممکن است به بیهوشی کامل بینجامد و حتی در برخی موارد، موجب فراموشی شود. به طوری که بیمار زمان‌های قبل از وقوع حادثه را نیز به یاد نمی‌آورد. معمولاً مرگ در اثر شوک الکتریکی به سبب ایست قلبی یا تنفسی روی می‌دهد. جدول بالا اثر برخی از جریان‌های الکتریکی بر بدن را نشان می‌دهد.

مثال ۲-۴



در مدار شکل روبه‌رو فرض کنید $\mathcal{E} = 12\text{V}$ ، $r = 2/\Omega$ و $R = 4/\Omega$ باشد.
الف) جریان عبوری از مدار چقدر است؟ ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری را محاسبه کنید.

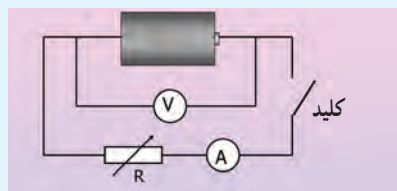
پاسخ: الف) بنا به رابطه ۷-۲ داریم:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{12\text{V}}{4/\Omega + 2/\Omega} = 2/\text{A}$$

ب) با استفاده از رابطه ۶-۲ اختلاف پتانسیل دوسر باتری برابر است با

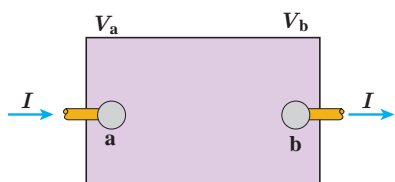
$$V = \mathcal{E} - Ir = 12\text{V} - (2/\text{A})(2/\Omega) = 8\text{V}$$

فعالیت ۲-۳ (کار در کلاس)



تفاوت یک باتری نو و فرسوده عمدتاً در مقدار مقاومت داخلی آن است که می‌تواند کمتر از یک اهم برای باتری نو تا چند هزار اهم برای باتری فرسوده باشد. برای اندازه‌گیری مقاومت داخلی یک باتری مدار ساده‌ای متشکل از یک باتری، یک کلید قطع و وصل و یک مقاومت یا لامپ کوچک را سوار کنید. نخست درحالی که کلید قطع است، ولتاژ دو سر باتری را با یک ولت‌سنج اندازه بگیرید و آن‌گاه پس از بستن کلید، دوباره ولتاژ دو سر باتری را اندازه بگیرید. همچنین در این حالت، جریان عبوری از مدار را نیز باید به کمک یک آمپرسنج اندازه بگیرید. اکنون با استفاده از رابطه ۶-۲ مقاومت داخلی باتری را محاسبه کنید (البته در یک اندازه‌گیری دقیق‌تر معمولاً از یک مقاومت متغیر استفاده می‌شود و مقاومت داخلی پس از چندین اندازه‌گیری محاسبه می‌شود). آزمایش را یک بار برای باتری نو و یک بار برای باتری فرسوده انجام دهید.

۵-۲ توان در مدارهای الکتریکی



شکل ۱۸-۲ یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی بین دوسر آن برقرار است.

اکنون می‌خواهیم رابطه‌هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به‌دست آوریم. جعبه شکل ۱۸-۲ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که می‌تواند شامل باتری، مقاومت و یا هرچیز دیگری باشد که اختلاف پتانسیلی بین پایانه‌های آن برقرار است. فرض کنید بار q در مدت زمان t تحت اختلاف پتانسیل ΔV از پایانه a به پایانه b برود. در فصل پیش دیدیم تغییر انرژی پتانسیل بار q در این انتقال برابر با $\Delta U = q\Delta V$ است. از طرفی توان الکتریکی، آهنگ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار q هنگام عبور از این بخش از مدار است:

$$P = \frac{\Delta U}{t} = \frac{q\Delta V}{t} = \left(\frac{q}{t}\right)\Delta V = I\Delta V$$

معمولاً اختلاف پتانسیل پایانه‌های a و b را به منظور ساده‌سازی به جای ΔV با V نشان می‌دهند.

بنابراین داریم:

$$P = IV$$

(۸-۲)

در این رابطه، توان (P) برحسب وات (W)، جریان (I) برحسب آمپر (A) و اختلاف پتانسیل (V) برحسب ولت (V) است. این رابطه را می‌توان برای منبع نیروی محرکه (مثلاً باتری)، یا برای وسیله مصرف‌کننده (مثلاً مقاومت یک دستگاه الکتریکی) و یا ... استفاده کرد.

توان الکتریکی مصرفی در یک مقاومت: همان‌طور که گفتیم رابطه ۲-۸ برای مقاومت‌های الکتریکی نیز برقرار است. برای محاسبه توان مصرفی مقاومت، کافی است در این رابطه به جای V از رابطه تعریف مقاومت ($R = V/I$) استفاده کنیم:

$$P_{\text{مصرفی}} = IV = I(RI) = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

در نتیجه:

$$P_{\text{مصرفی}} = IV = RI^2 = \frac{V^2}{R} \quad (۹-۲)$$

مثال ۲-۵

وقتی دو سربیک بخاری برقی را به اختلاف پتانسیل $220V$ وصل کنیم، جریان $10A$ از آن می‌گذرد. الف) توان این بخاری چقدر است؟ ب) اگر این بخاری به مدت $300h$ در روز کار کند و قیمت برق مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت 50 تومان باشد، هزینه یک ماه مصرف این بخاری چقدر می‌شود؟

پاسخ: الف) بنا به رابطه ۲-۸ توان مورد نیاز بخاری چنین می‌شود:

$$P = IV = (10A)(220V) = 2200W = 2.2kW$$

ب) انرژی مصرفی بخاری برابر Pt می‌شود که بر حسب یکاهای SI، P بر حسب وات (W)، t بر حسب ثانیه (s) است و انرژی مصرفی بر حسب ژول (J) می‌شود. اما برای محاسبه مصرف برق، P را بر حسب کیلووات (kW) و t را بر حسب ساعت (h) می‌گیرند. بنابراین، انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت (kWh) می‌شود $(3600s)(2200W) = 7.92 \times 10^6 J = 2.2kWh$. پس انرژی مصرفی بخاری در یک ماه، برابر است با

$$U = Pt = (2.2kW)(30 \times 240h) = 1584kWh$$

در نتیجه بهای برق مصرفی این بخاری در یک ماه چنین می‌شود:

$$\text{تومان} = (1584kWh) \left(\frac{50 \text{ تومان}}{kWh} \right) = 79200 \text{ تومان}$$

فعالیت ۲-۴



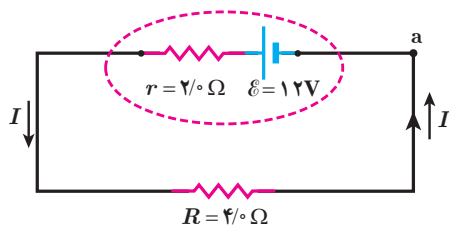
قانون ژول بیان می‌دارد گرمای تولید شده توسط جریان I عبوری از یک مقاومت R در مدت زمان t برابر با RI^2t است. این قانون را می‌توان به روش گرماسنجی با یک گرماسنج که در فیزیک دهم با آن آشنا شدید تحقیق کرد. اسباب این آزمایش در شکل نشان داده شده است. درباره چگونگی این آزمایش تحقیق کنید.

فعالیت ۲-۵



همانند شکل با یک اهم متر، مقاومت رشته سیم داخل لامپ ۱۰۰Ω را اندازه گیری کنید. سپس با استفاده از رابطه $V^2/R = P_{\text{مصرفی}}$ ، و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. چرا مقدار اندازه گیری شده با مقدار محاسبه شده متفاوت است؟ نتیجه را پس از گفت و گوی گروهی، گزارش دهید.

مثال ۲-۶



برای مدار نشان داده شده در شکل، الف) توان مصرفی در مقاومت و ب) توان خروجی باتری را محاسبه کنید.

پاسخ: الف) نخست، جریان را با استفاده از رابطه $۲-۷$ به دست می آوریم:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{12/\text{V}}{4/\Omega + 2/\Omega} = 2/\text{A}$$

اکنون توان مصرفی مقاومت R چنین می شود:

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (4/\Omega)(2/\text{A})^2 = 16\text{W}$$

ب) با استفاده از پایداری انرژی بدیهی است که توان الکتریکی خروجی باتری برابر با توان مصرفی مقاومت 4 اهمی ، یعنی 16W می شود. با این حال، این را می توانیم به طور مستقیم نیز نشان دهیم:

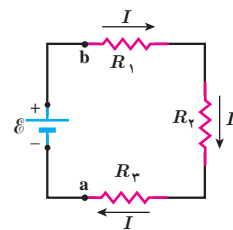
$$V_{\text{باتری}} = \mathcal{E} - Ir = 12/\text{V} - (2/\text{A})(2/\Omega) = 8/\text{V}$$

$$P_{\text{خروجی باتری}} = IV_{\text{باتری}} = (2/\text{A})(8/\text{V}) = 16\text{W}$$

۲-۶ ترکیب مقاومت ها

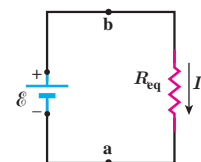
مقاومت ها در انواع وسایل الکتریکی دیده می شوند، از ساده ترین وسیله ها مانند بخاری های برقی و موخشک کن ها گرفته تا وسایل الکتریکی پیچیده تری مانند تلویزیون و رایانه ها. مدارهای این وسیله ها اغلب چندین مقاومت دارند؛ در نتیجه لازم است که ترکیبی از مقاومت ها را در نظر بگیریم. رشته ای از لامپ ها که در چراغانی ها به کار می رود، نمونه ساده ای از ترکیب مقاومت هاست که در آن هر لامپ به عنوان یک مقاومت عمل می کند و رشته لامپ ها از دیدگاه تحلیل مدار، ترکیبی است از مقاومت ها. ترکیب مقاومت ها ممکن است بسیار پیچیده باشد، اما کار کردن با دو نوع از این ترکیب ها بسیار ساده است: مقاومت های متوالی و مقاومت های موازی. وقتی مقاومت ها به طور متوالی، یا موازی یا ترکیبی از هر دو بسته شده باشند، آنها را می توانیم با یک مقاومت معادل

جایگزین کنیم. در این بخش به این موضوع می پردازیم و اینکه چگونه می توان مقاومت معادل ترکیبی از مقاومت ها را تعیین کرد.



شکل ۲-۱۹ سه مقاومت که به طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده اند.

به هم بستن متوالی مقاومت ها: شکل ۲-۱۹ سه مقاومت را نشان می دهد که به طور متوالی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} بسته شده اند. توجه کنید واژه «متوالی» ربط چندانی به چگونگی رسم مقاومت ها ندارد. «متوالی» به معنای بسته شدن مقاومت ها یکی پس از دیگری است، به طوری که هیچ انشعابی بین آنها وجود نداشته باشد و اختلاف پتانسیل V به دوسر این مجموعه از مقاومت ها اعمال شده باشد. در بستن متوالی مقاومت ها از همه مقاومت ها جریان یکسان I عبور می کند. به عبارتی اگر آمپرسنج هایی را در نقطه های مختلفی از این مدار قرار دهیم، همگی جریان یکسانی را نشان می دهند. مقاومت هایی را که به طور متوالی بسته شده اند می توان با یک مقاومت معادل R_{eq} جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دوسر مجموعه مقاومت ها و همان جریان I است.



شکل ۲-۲۰ مدار معادل شکل ۲-۱۹ جریان آنها داریم: که در آن سه مقاومت با مقاومت R_{eq} جایگزین شده است.

اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دوسر مجموعه مقاومت ها، برابر با جمع اختلاف پتانسیل های دوسر مقاومت هاست: $V = \mathcal{E} = V_1 + V_V + V_P$. اکنون به سراغ محاسبه جریان I می رویم. با به کارگیری تعریف مقاومت الکتریکی ($R = V/I$) برای هر یک از مقاومت ها و با توجه به برابر بودن

$$V = \mathcal{E} = IR_1 + IR_V + IR_P$$

و در نتیجه

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_V + R_P}$$

با تعریف مقاومت معادل، به صورت

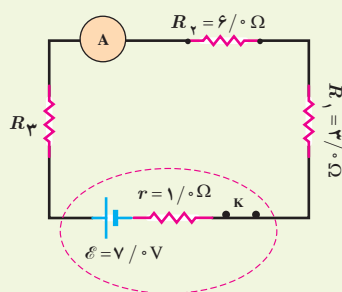
$$R_{eq} = R_1 + R_V + R_P$$

مدار شکل ۲-۱۹ را می توان با مدار معادل شکل ۲-۲۰ جایگزین کرد. بدیهی است که اگر به جای سه مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آنها از رابطه زیر به دست می آید:

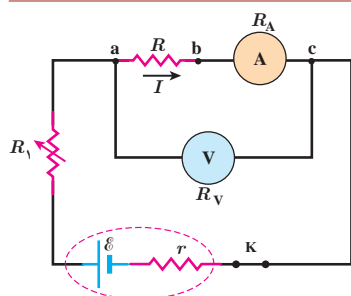
$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2-10)$$

توجه کنید وقتی مقاومت ها به طور متوالی بسته شده اند، مقاومت معادل آنها بزرگ تر از مقاومت هریک از آنهاست.

تمرین ۲-۳



در شکل روبه رو، سه مقاومت به همراه یک آمپرسنج به صورت متوالی به یک باتری وصل شده اند و مقاومت آمپرسنج صفر است (آمپرسنج آرمانی). اگر مقاومت معادل مقاومت های R_1 ، R_2 و R_3 برابر با $13/4 \Omega$ باشد: الف) مقاومت R_3 چقدر است؟ ب) جریانی را که آمپرسنج نشان می دهد به دست آورید. پ) توان خروجی باتری چقدر است؟

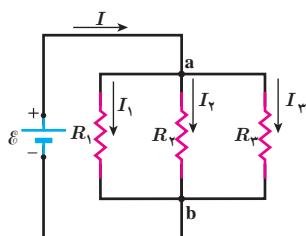


شکل روبه‌رو مداری را برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول R نشان می‌دهد. فرض کنید در این مدار ولت‌سنج V با $24/0$ و آمپرسنج A با $20/0$ را نشان دهد. مقاومت ولت‌سنج $R_V = 1000 \times 10^4 \Omega$ و مقاومت آمپرسنج $R_A = 1/0 \Omega$ است. مقاومت R را به‌دست آورید. **پاسخ:** مقاومت‌های R و R_A به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند و اختلاف پتانسیل دوسر آنها برابر با V با $24/0$ است. با توجه به اینکه آمپرسنج جریان A با $20/0$ را نشان می‌دهد و به‌طور متوالی به مقاومت R بسته شده است، جریان عبوری از این دو مقاومت نیز برابر با A با $20/0$ است:

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{24/0 V}{20/0 A} = 120 \Omega$$

با توجه به اینکه $R_{eq} = R + R_A$ و $R_A = 1/0 \Omega$ است مقاومت مجهول برابر با $R = 119 \Omega$ می‌شود.

مقاومت یک ولت‌سنج باید خیلی بزرگ باشد تا قرار گرفتن آن در مدار، ولتاژ اجزای مدار را به‌طور محسوسی تغییر ندهد. همچنین مقاومت یک آمپرسنج باید خیلی ناچیز باشد تا قرار گرفتن آن در مدار به‌طور محسوسی جریان اجزای مدار را تغییر ندهد. همان‌طور که در مثال بالا ملاحظه شد، مقاومت‌های آمپرسنج و ولت‌سنج این ویژگی‌ها را دارند.



بستن مقاومت‌ها به‌صورت موازی: شکل ۲-۲۱ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که سه مقاومت به‌صورت موازی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} بسته شده‌اند. توجه کنید واژه «موازی» ارتباط چندانی به چگونگی رسم مقاومت‌ها ندارد؛ بلکه «به‌صورت موازی» به معنای آن است که یک سر مقاومت‌ها مستقیماً به یکدیگر و سر دیگر آنها نیز مستقیماً به هم وصل شده است و اختلاف پتانسیل یکسان V به دوسر این مقاومت‌ها اعمال شده است. بنابراین، هریک از مقاومت‌ها اختلاف پتانسیل یکسان V در دوسر خود دارد؛ یعنی:

$$V = \mathcal{E} = V_1 = V_2 = V_3$$

مجموعه مقاومت‌هایی که به این روش متصل شده‌اند را می‌توان با یک مقاومت معادل R_{eq} جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل V و جریان کلی است که از مقاومت‌ها می‌گذرد. برای یافتن عبارتی برای R_{eq} ، نخست رابطه بین جریان‌های I ، I_1 ، I_2 ، و I_3 را بررسی می‌کنیم. با توجه به پایستگی بار الکتریکی و اینکه هیچ باری نمی‌تواند در یک نقطه مدار جمع گردد، بار ورودی به نقطه a در واحد زمان با مجموع بارهای خروجی از نقطه a در واحد زمان برابر است. همان‌طور که می‌دانیم بار عبوری در واحد زمان همان جریان است. بنابراین داریم:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

از طرفی، از تعریف مقاومت می‌توانیم جریان‌های عبوری از هریک از مقاومت‌ها را به‌دست آوریم:

$$I_1 = \frac{V}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V}{R_2}, \quad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

با قرار دادن این جریان‌ها در معادله قبلی خواهیم داشت:

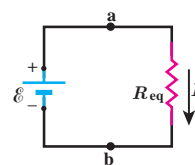
$$I = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

اگر ترکیب موازی مقاومت‌ها را با مقاومت R_{eq} جایگزین کنیم $I = \frac{V}{R_{eq}}$ می‌شود و از آنجا خواهیم داشت:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

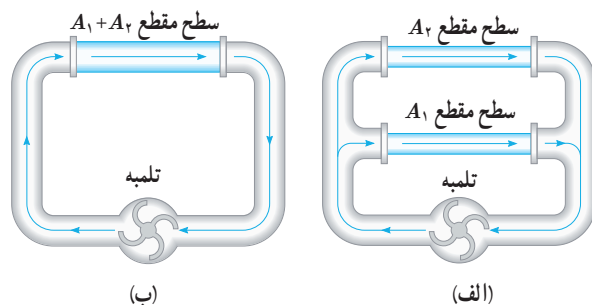
در حالت کلی برای n مقاومت موازی به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (۲-۱۱)$$



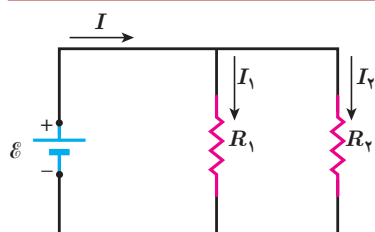
شکل ۲-۲۲ مدار معادل شکل ۲-۲۱ که در آن مقاومت معادل، R_{eq} جایگزین مقاومت‌های R_1, R_2, R_3 شده است.

مدار شکل ۲-۲۱ به مدار معادل شکل ۲-۲۲ تبدیل می‌شود. توجه کنید هرگاه چند مقاومت به صورت موازی به هم بسته شوند، مقاومت معادل آنها کوچک‌تر از هر یک از مقاومت‌های موجود در آن ترکیب است. برای اینکه به درکی از این نتیجه برسیم، مشابهت‌سازی با لوله‌های آب می‌تواند راه‌گشا باشد. شکل ۲-۲۳ الف دو لوله هم‌طول با سطح مقطع‌های A_1 و A_2 را نشان می‌دهد که به طور موازی به یک تلمبه آب متصل شده‌اند. در شکل ۲-۲۳ ب این دو لوله با یک تک لوله به همان طول آنها، ولی با سطح مقطعی برابر با مجموع سطح مقطع‌های آن دو لوله جایگزین شده است. اکنون تلمبه، آب بیشتری از لوله عریض‌تر در مقایسه با هر یک از لوله‌ها عبور می‌دهد. به عبارتی، لوله عریض‌تر مقاومت کمتری نسبت به شارش آب در مقایسه با هر یک از دو لوله باریک‌تر دارد.



شکل ۲-۲۳ الف) دو لوله هم‌طول با سطح مقطع‌های A_1 و A_2 به طور موازی به تلمبه‌ای متصل شده‌اند. ب) دو لوله بخش الف معادل با تک لوله‌ای با همان طول و سطح مقطع مجموع آنهاست.

مثال ۲-۸



در شکل روبه‌رو، یک باتری آرمانی اختلاف پتانسیل $\mathcal{E} = 12\text{V}$ را به دو سر مقاومت‌های $R_1 = 4/\Omega$ و $R_2 = 6/\Omega$ اعمال می‌کند. الف) جریان عبوری از هر مقاومت و ب) جریانی که از باتری می‌گذرد چقدر است؟

پاسخ: مطابق شکل جریان عبوری از باتری، مقاومت R_1 ، و مقاومت R_2 را به ترتیب با I ، I_1 و I_2 نشان داده‌ایم.

الف) بدیهی است که اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت‌های R_1 و R_2 برابر با اختلاف پتانسیل باتری است. بنابراین داریم:

$$V_1 = \mathcal{E} = I_1 R_1 \Rightarrow I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1} = \frac{12\text{V}}{4/\Omega} = 3/\text{A}$$

$$V_2 = \mathcal{E} = I_2 R_2 \Rightarrow I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} = \frac{12\text{V}}{6/\Omega} = 2/\text{A}$$

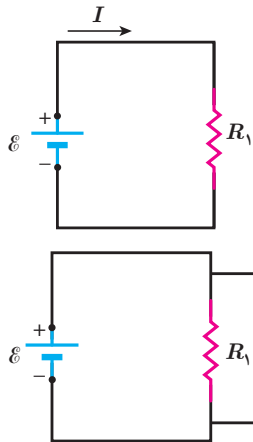
ب) و برای جریان عبوری از باتری داریم:

$$I = I_1 + I_2 = 3/\text{A} + 2/\text{A} = 5/\text{A}$$

فعالیت ۲-۶

مداری مانند مدار مثال ۲-۸ ببینید و در هر شاخه آن، یک آمپرسنج قرار دهید. با خواندن آمپرسنج‌ها، رابطه بین جریان‌ها را بررسی کنید.

مثال ۹-۲



مدار ساده شکل روبه‌رو را که شامل یک منبع نیروی محرکه الکتریکی آرمانی با $\mathcal{E} = 150\text{ V}$ و یک مقاومت با $R_1 = 100\text{ k}\Omega$ است، در نظر بگیرید.

الف) جریان عبوری از منبع را به دست آورید.

ب) اگر مقاومت $R_2 = 100\text{ M}\Omega$ به طور موازی به دو سر مقاومت R_1 متصل شود، مقاومت معادل

مدار چقدر می‌شود و چه جریانی از منبع می‌گذرد؟

پاسخ: الف) با استفاده از تعریف مقاومت داریم:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1} = \frac{150\text{ V}}{100 \times 10^3 \Omega} = 1.5 \times 10^{-3}\text{ A} = 1.5\text{ mA}$$

ب) با استفاده از رابطه ۱۱-۲ داریم:

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

در نتیجه

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(100 \times 10^3 \Omega)(100 \times 10^6 \Omega)}{100 \times 10^3 \Omega + 100 \times 10^6 \Omega} = 99.9\text{ k}\Omega$$

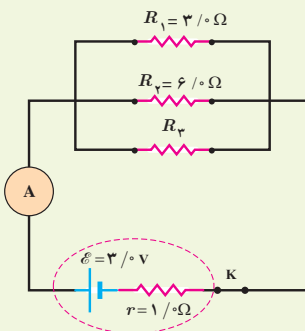
و بنابراین، جریان عبوری از منبع برابر است با

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{eq}}} = \frac{150\text{ V}}{9.99 \times 10^4 \Omega} = 1.5 \times 10^{-3}\text{ A} = 1.5\text{ mA}$$

همان‌طور که می‌بینید، مقاومت معادل در این حالت که یکی از مقاومت‌ها خیلی بزرگ‌تر از مقاومت دیگر است ($R_2 \gg R_1$)

تقریباً برابر با مقاومت کوچک‌تر (R_1) است.

تمرین ۴-۲



در شکل روبه‌رو سه مقاومت موازی به همراه یک آمپرسنج آرمانی به دو سر یک باتری وصل شده‌اند. اگر مقاومت معادل این ترکیب $1/6\Omega$ باشد، الف) مقاومت R_3 چقدر است؟ ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد را به دست آورید. پ) توان خروجی باتری چقدر است؟

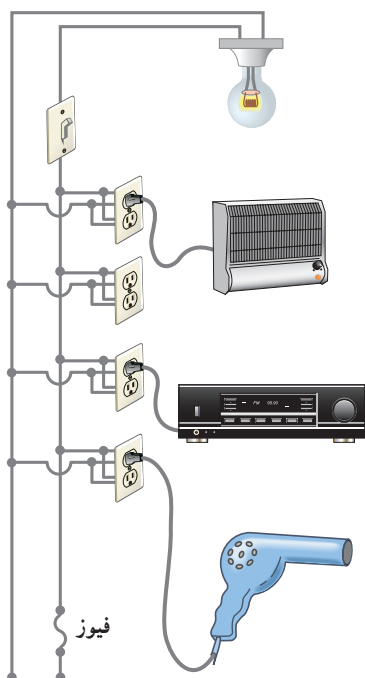
مثال ۱۰-۲

یک لامپ رشته‌ای 100 W ، یک بخاری برقی 2000 W ، یک دستگاه پخش صوت 200 W ، و یک سشوار (موخشک‌کن)

2200 W مطابق شکل به پریزهای یک مدار سیم‌کشی خانگی 220 V وصل شده است.

الف) اگر فیوز شکل 15 A باشد، یعنی حداکثر بتواند جریان 15 A را تحمل کند، آیا فیوز خواهد پرید؟

ب) نشان دهید توان الکتریکی مصرفی مقاومت معادل برابر با مجموع توان‌های الکتریکی مصرفی در هریک از آنهاست.



پاسخ: الف) همان طور که در شکل می بینیم در سیم کشی منازل همه مصرف کننده ها به طور موازی متصل می شوند. بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر با مجموع جریان های عبوری از هریک از مصرف کننده ها است. با استفاده از رابطه $I = P/V$ به جریان عبوری از هریک از این چهار مصرف کننده را به دست می آوریم. بنابراین، به ترتیب داریم:

$$I_{\text{لامپ}} = \frac{P_{\text{لامپ}}}{V} = \frac{100 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 0.455 \text{ A}$$

$$I_{\text{بخاری}} = \frac{P_{\text{بخاری}}}{V} = \frac{2000 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 9.09 \text{ A}$$

$$I_{\text{پخش}} = \frac{P_{\text{پخش}}}{V} = \frac{200 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 0.909 \text{ A}$$

$$I_{\text{سشوار}} = \frac{P_{\text{سشوار}}}{V} = \frac{2200 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 10.0 \text{ A}$$

بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر است با

$$I_{\text{فیوز}} = I_{\text{کل}} = I_{\text{لامپ}} + I_{\text{بخاری}} + I_{\text{پخش}} + I_{\text{سشوار}} \\ = 0.455 \text{ A} + 9.09 \text{ A} + 0.909 \text{ A} + 10.0 \text{ A} = 20.45 \text{ A}$$

چون فیوز ۱۵A است. بنابراین، فیوز خواهد پرید. در اغلب منازل چند مدار سیم کشی جداگانه داریم که هریک فیوز مربوط به خود را دارد. برای اینکه بتوانیم به طور هم زمان از چند وسیله برقی استفاده کنیم، باید وسایل برقی را به طور هم زمان به یک مدار وصل نکنیم و مدارهای دیگر را نیز به کار گیریم.

ب) دیدیم که همه مصرف کننده ها به طور موازی متصل می شوند. بنابراین، مقاومت معادل مصرف کننده های شکل از رابطه ۱۱-۲ به دست می آید. بنابراین، برای محاسبه مقاومت لازم است مقاومت هریک از وسیله ها را به طور جداگانه محاسبه کنیم. مقاومت

هر مصرف کننده با استفاده از رابطه $P = \frac{V^2}{R}$ به دست می آید. بنابراین، به ترتیب داریم:

$$R_{\text{بخاری}} = \frac{V^2}{P_{\text{بخاری}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{2000 \text{ W}} = 24.2 \Omega$$

$$R_{\text{لامپ}} = \frac{V^2}{P_{\text{لامپ}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{100 \text{ W}} = 484 \Omega$$

$$R_{\text{سشوار}} = \frac{V^2}{P_{\text{سشوار}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{2200 \text{ W}} = 22.0 \Omega$$

$$R_{\text{پخش}} = \frac{V^2}{P_{\text{پخش}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{200 \text{ W}} = 242 \Omega$$

پس مقاومت معادل چنین محاسبه می شود:

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_{\text{لامپ}}} + \frac{1}{R_{\text{بخاری}}} + \frac{1}{R_{\text{پخش}}} + \frac{1}{R_{\text{سشوار}}} \\ = \frac{1}{484 \Omega} + \frac{1}{24.2 \Omega} + \frac{1}{242 \Omega} + \frac{1}{22.0 \Omega} = 0.0930 \Omega^{-1}$$

و در نتیجه $R_{\text{eq}} = 10.75 \Omega \approx 10.8 \Omega$. بنابراین، توان مصرفی مقاومت معادل چنین می شود:

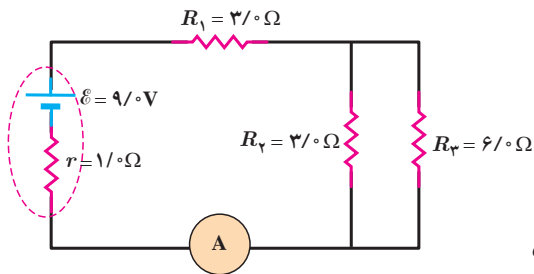
$$P_{R_{\text{eq}}} = \frac{V^2}{R_{\text{eq}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{10.75 \Omega} = 4.5 \text{ kW}$$

اکنون می‌خواهیم این نتیجه را با مجموع توان‌های هریک از مصرف‌کننده‌ها مقایسه کنیم.
مجموع توان مصرف‌کننده‌ها برابر است با

$$P_{\text{کل}} = P_{\text{لامپ}} + P_{\text{بخاری}} + P_{\text{پخش}} + P_{\text{سشوار}} = 100\text{W} + 2000\text{W} + 200\text{W} + 2200\text{W} = 4500\text{W}$$

که همان توان مصرفی مقاومت معادل است.

مثال ۲-۱۱



در مدار شکل روبه‌رو

(الف) مقاومت معادل،

(ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد، و

(پ) جریان گذرنده از مقاومت‌های R_1 و R_2 را محاسبه کنید.

پاسخ: (الف) مقاومت‌های R_2 و R_3 موازی با هم وصل شده‌اند، مقاومت

معادل آنها را R_{23} می‌نامیم.

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(3\Omega)(6\Omega)}{3\Omega + 6\Omega} = 2\Omega$$

مقاومت معادل R_{23} و مقاومت R_1 متوالی با هم وصل شده‌اند. مقاومت معادل آنها را با R_{eq} نشان می‌دهیم:

$$R_{eq} = R_1 + R_{23} = 3\Omega + 2\Omega = 5\Omega$$

(ب) با استفاده از رابطه ۲-۷ برای شکل روبه‌رو داریم:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{eq} + r} = \frac{9\text{V}}{5\Omega + 1\Omega} = 1.5\text{A}$$

جریان گذرنده از باتری، مقاومت معادل R_{eq} و آمپرسنج یکسان است. بنابراین

آمپرسنج جریان ۱.۵A را نشان می‌دهد.

(پ) می‌دانیم جریان گذرنده از مقاومت‌های متوالی با جریان مقاومت معادل آنها برابر

است. پس،

$$I_1 = I_{23} = I \Rightarrow I_1 = I_{23} = 1.5\text{A}$$

برای به‌دست آوردن I_2 ، نخست V_2 را به دست می‌آوریم. می‌دانیم در مقاومت‌های موازی، ولتاژ هر مقاومت با ولتاژ مقاومت

معادل برابر است. پس $V_2 = V_{23}$ ، و بنابراین کافی است V_{23} را بیابیم:

$$V_{23} = R_{23} I_{23} = (2\Omega)(1.5\text{A}) = 3\text{V}$$

در نتیجه برای جریان I_2 داریم:

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{V_{23}}{R_2} = \frac{3\text{V}}{3\Omega} = 1\text{A}$$

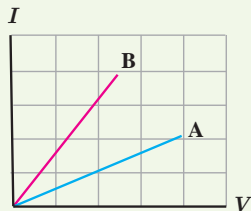
با استفاده از این اطلاعات الف) مقدار بار کل منتقل شده بین ابر و زمین، ب) جریان متوسط در یک یورش آذرخش و پ) توان الکتریکی آزادشده در 0.2 s را به دست آورید.

۵ در آزمایش تحقیق قانون اهم، نتایج جدول زیر به دست آمده است.

شماره آزمایش	عدد ولت‌سنج (V)	عدد آمپر‌سنج (A)
۱	صفر	صفر
۲	۱/۶	۰/۱۶
۳	۴/۴	۰/۴۳
۴	۷/۰	۰/۶۸
۵	۹/۰	۰/۷۲
۶	۱۰/۰	۰/۷۵

نمودار ولتاژ بر حسب جریان را رسم کنید و با فرض ثابت ماندن دما تعیین کنید در چه محدوده‌ای رفتار این مقاومت از قانون اهم پیروی می‌کند.

۶ شکل زیر نمودار $I-V$ را برای دو رسانای A و B نشان می‌دهد. مقاومت کدام یک بیشتر است؟ چرا؟



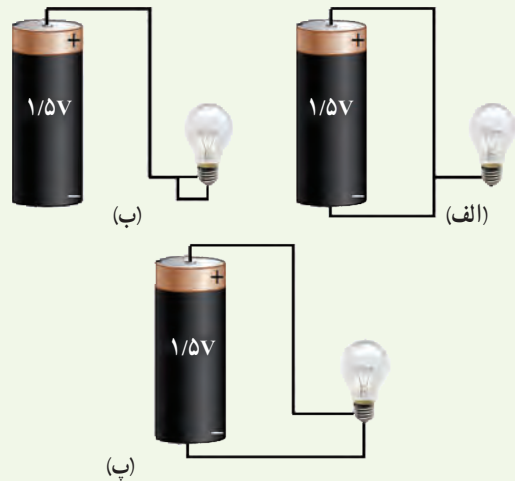
۲-۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

۷ دو رسانای فلزی از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توپری به قطر 1.0 mm است. رسانای B لوله‌ای توخالی به شعاع خارجی 2.0 mm و شعاع داخلی 1.0 mm است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟

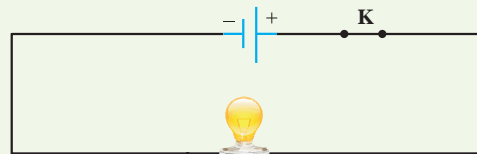
۸ در ماشین‌های چمن‌زنی برقی برای مسافت‌های حداکثر تا 35 m از سیم‌های مسی نمره ۲۰ (قطر 0.8 cm) و برای مسافت‌های طولانی‌تر از سیم‌های ضخیم‌تر نمره ۱۶ (قطر 1.3 cm) استفاده می‌کنند تا بدین ترتیب مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. الف) مقاومت یک

۱-۲ و ۲-۲ جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی و قانون اهم

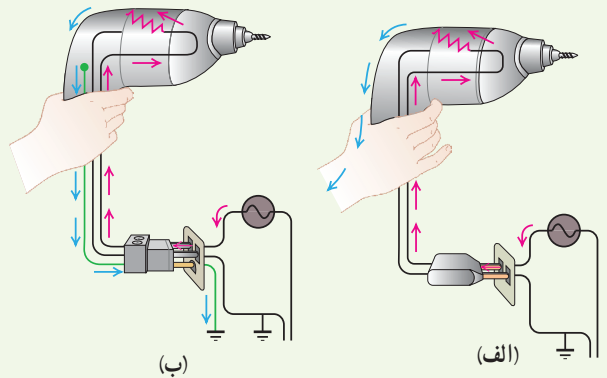
۱ در کدام یک از شکل‌های زیر، لامپ روشن می‌شود؟



۲ در مدار شکل زیر اختلاف پتانسیل دو سر لامپ 4.0 V و مقاومت آن $5.0\ \Omega$ است. در مدت ۵ دقیقه چه تعداد الکترون از لامپ می‌گذرد؟



۳ بررسی کنید اگر مت‌برقی (دریل) معیوب شکل‌های زیر را با دوشاخه (شکل الف) یا سه‌شاخه (شکل ب) به پریز وصل کنیم، چه رخ می‌دهد؟



۴ آذرخش مثالی جالب از جریان الکتریکی در پدیده‌های طبیعی است. در یک آذرخش نوعی $1.0 \times 10^9\text{ J}$ انرژی تحت اختلاف پتانسیل $5.0 \times 10^7\text{ V}$ در بازه زمانی 0.2 s آزاد می‌شود.

۲-۵ توان در مدارهای الکتریکی

۱۲ دو لامپ رشته‌ای در اختیار داریم که جنس و طول رشته آنها یکسان است، ولی رشته لامپ B ضخیم‌تر از رشته لامپ A است. وقتی لامپ‌ها به ولتاژ یکسانی وصل شوند، کدام لامپ پر نورتر خواهد بود و چرا؟

۱۳ بر روی وسیله‌های الکتریکی، اعداد مربوط به ولتاژ و توان نوشته می‌شود. برای دو وسیله زیر،

الف) سیم‌های اتصال به برق آنها باید بتواند حداقل چه جریانی را از خود عبور دهد؟

ب) مقاومت الکتریکی هر وسیله در حالت روشن چقدر است؟



کتری برقی، ۲۴۰۰W، ۲۲۰V

اتوی برقی، ۸۵۰W، ۲۲۰V

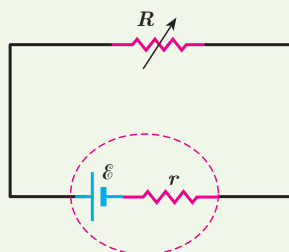
۱۴ تلویزیون و یکی از لامپ‌های خانه خود را در نظر بگیرید و فرض کنید که هرکدام روزی ۸ ساعت با اختلاف پتانسیل ۲۲۰ ولت روشن باشد.

الف) انرژی الکتریکی مصرفی هرکدام در یک دوره یک ماهه (۳۰ روز) چند kWh است؟ (توان مصرفی هر وسیله را از روی آن بخوانید.)

ب) بهای برق مصرفی هر کدام از قرار هر کیلووات ساعت ۵۰ تومان در یک دوره یک ماهه چقدر می‌شود؟

پ) اگر در شهر شما هر خانه یک لامپ ۱۰۰ وات اضافی را به مدت ۳ ساعت در شب روشن کند، در طول یک ماه تقریباً چند کیلووات ساعت انرژی الکتریکی اضافی مصرف می‌شود؟

۱۵ در شکل زیر، الف) نیروی محرکه الکتریکی و مقاومت

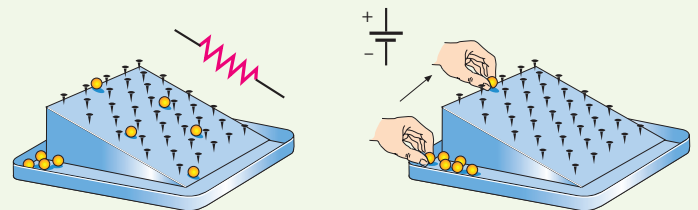


سیم ۳۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ ب) مقاومت یک سیم ۷۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ (دمای سیم‌ها را 20°C در نظر بگیرید.)



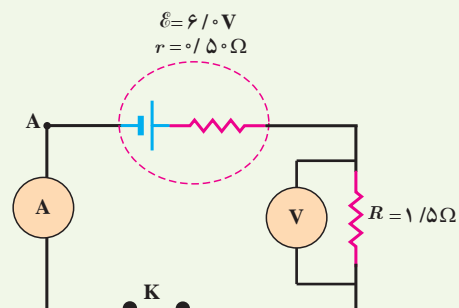
۲-۴ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

۹ شکل زیر یک مشابَه‌سازی مکانیکی برای درک مقاومت و نیروی محرکه الکتریکی را نشان می‌دهد که در آن بر سطح شیب‌داری میخ‌هایی تعبیه شده و تیل‌ها از ارتفاع بالای سطح شیب‌دار رها می‌شوند و سپس دوباره به بالای سطح شیب‌دار بازگردانده می‌شوند. این مشابَه‌سازی مکانیکی را توجیه کنید.



۱۰ یک باتری را در نظر بگیرید که وقتی به مدار بسته نیست پتانسیل دو سرش برابر 1.2V است. وقتی یک مقاومت 10Ω به این باتری بسته شود، اختلاف پتانسیل دو سر باتری به 0.9V کاهش می‌یابد. مقاومت داخلی باتری چقدر است؟

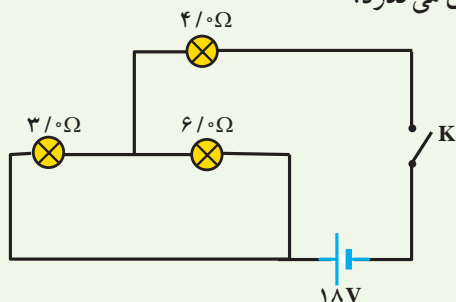
۱۱ در شکل زیر آمپرسنج و ولت‌سنج چه عددی را نشان می‌دهند؟



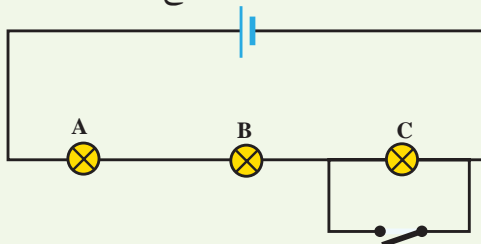
۲۱ سه مقاومت مشابه $12\ \Omega$ اهمی را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می بندیم و به اختلاف پتانسیل $12\ \text{V}$ وصل می کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می گذرد؟

۲۲ دو مقاومت موازی $6\ \Omega$ اهمی و $12\ \Omega$ اهمی به طور متوالی به یک مقاومت $2\ \Omega$ اهمی وصل شده است. اکنون، مجموعه مقاومت ها را به دو سریک باتری آرمانی $36\ \text{V}$ ولتی می بندیم. توان مصرفی در مقاومت $6\ \Omega$ اهمی را محاسبه کنید.

۲۳ در شکل زیر، وقتی کلید بسته شود چه جریانی از هر لامپ رشته ای می گذرد؟



۲۴ لامپ های A، B و C در شکل زیر همگی یکسان اند. با بستن کلید، کدام یک از تغییرات زیر در اختلاف پتانسیل رخ می دهد؟ (ممکن است بیش از یک پاسخ درست باشد).



(الف) اختلاف پتانسیل دو سر A و B تغییر نمی کند.

(ب) اختلاف پتانسیل دو سر C به اندازه 50% کاهش می یابد.

(پ) هریک از اختلاف پتانسیل های دو سر A و B به اندازه 50% افزایش می یابد.

(ت) اختلاف پتانسیل دو سر C به صفر کاهش می یابد.

۲۵ درسیم کشی منازل، همه مصرف کننده ها به طور موازی متصل می شوند. یک اتوی $1100\ \text{W}$ ، یک نان برشته کن (توستر) $1800\ \text{W}$ ، پنج لامپ رشته ای $100\ \text{W}$ و یک بخاری $1100\ \text{W}$ به پریزهای یک مدار سیم کشی خانگی $220\ \text{V}$ که حداکثر می تواند جریان $15\ \text{A}$ را تحمل کند وصل شده اند. آیا این ترکیب مصرف کننده ها باعث پریدن فیوز می شود یا خیر؟

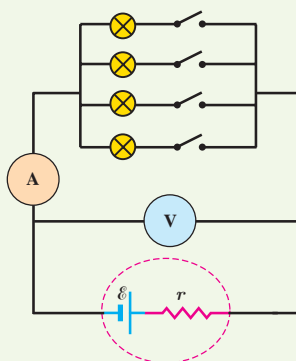
داخلی منبع را که توان خروجی آن به ازای $I_1 = 5.0\ \text{A}$ برابر $9.50\ \text{W}$ و به ازای $I_2 = 7.0\ \text{A}$ برابر $12.6\ \text{W}$ است، محاسبه کنید.

(ب) نمودار اختلاف پتانسیل دو سر باتری بر حسب جریان گذرنده از آن را رسم کنید.

۲-۶ ترکیب مقاومت ها

۱۶ لامپ های یک درخت زینتی، به طور متوالی متصل شده اند. اگر یکی از لامپ ها بسوزد، چه اتفاقی می افتد؟ به نظر شما چرا همه چراغ های خودرو (چراغ های جلو، عقب و ...) به طور موازی بسته می شوند؟

۱۷ مقاومت یک آمپر سنج برای اندازه گیری جریان در یک مدار باید چگونه باشد تا جریان اندازه گیری شده توسط آمپر سنج با جریان قبل از قرار دادن آمپر سنج، نزدیک به هم باشد؟



۱۸ در شکل مقابل، تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، عددی که آمپر سنج و ولت سنج نشان می دهند، چه تغییری می کند؟

۱۹ دو لامپ با مقاومت مساوی R را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می بندیم و آنها را هر بار به ولتاژ V وصل می کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متوالی چقدر است؟

۲۰ در شکل های زیر، آیا مقاومت ها به طور متوالی بسته شده اند یا موازی و یا هیچ کدام؟

