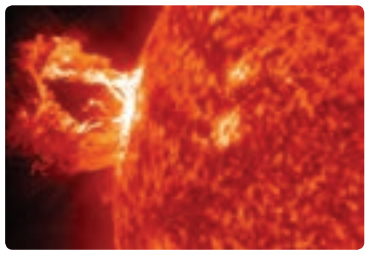
۲
جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

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 لیتیمی 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. برخلاف 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 تلاش‌اند زمان شارژ این باتری‌ها را کاهش دهند. یکی از این راه‌ها استفاده از منبع‌های نیروی محرکه است که از اَبَر خازن‌ها استفاده می‌کند. با استفاده از این فنّاوری ممکن است بتوان خودروهای الکتریکی را در مدت کوتاهی شارژ کرد.

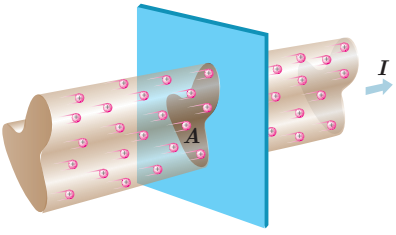
در فصل پیش با بار و میدان الکتریکی و همچنین اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در میدان الکتریکی آشنا شدیم و به بررسی بر هم‌کنش بارهای الکتریکی در حالت سکون پرداختیم. در این فصل به بررسی و مطالعهٔ جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم می‌پردازیم.

مثال‌های فراوانی می‌توان از کاربردهای جریان الکتریکی ارائه کرد؛ مثلاً انرژی موردنیاز صفحهٔ 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 ۲ــ۱). همچنین مهندسان برق با دستگاه‌های الکتریکی زیادی از قبیل مولدهای برق و دستگاه‌های ذخیرهٔ اطلاعات سر و کار دارند و مهندسان مخابرات نگران اختلالات ناشی از فوران‌های خورشیدی (شکل ۲ــ ۲) هستند. فیزیولوژیست‌ها و مهندسان پزشکی نیز با جریان‌های الکتریکی در رشته‌های عصبی سروکار دارند.

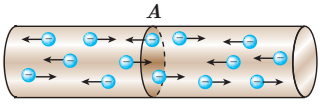


شکل ۲ــ۲ فوران عظیمی از الکترون‌ها و یون‌ها که از سطح خورشید پرتاب می‌شوند.

شکل ۲ــ۱ انرژی از باتری به صفحهٔ نمایشگر تلفن، از طریق سیم‌های رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند، منتقل می‌شود.



شکل ۲ــ۳ باریکه‌ای از بارهای مثبت از سطح مقطع A می‌گذرند و جریان I را ایجاد می‌کنند.

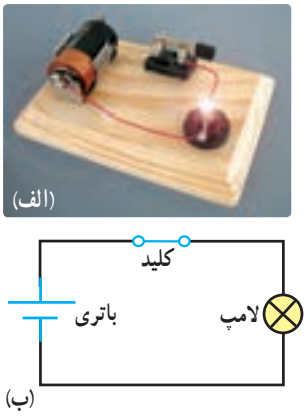


شکل ۲ــ۴ در نبود اختلاف پتانسیل، شارش بار خالصی از مقطع معیّن A سیم، نداریم.

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 معیّن رخ دهد (شکل ۲ــ۳) که به این منظور نیاز به ابزاری مانند باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را در جهت معینی به حرکت درآورد.

۲ــ۱ جریان الکتریکی

جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همهٔ بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. برای داشتن جریان الکتریکی باید یک شارش خالص بار از یک سطح مقطع معیّن داشته باشیم. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. الکترون‌های آزاد در طول این سیم با تندی‌هایی از مرتبهٔ $10^6 m/s$ در حرکت‌اند، ولی این حرکت به‌طور کاتوره‌ای در همهٔ جهت‌هاست. بنابراین، هیچ شارش خالص باری از مقطعی معیّن نداریم (شکل ۲ــ۴). ولی اگر این سیم را در مدار الکتریکی مانند شکل ۲ــ۵ 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 ۲ــ۶) به‌طوری که می‌تواند لامپ مدار ۲ــ۵ 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[1] در خلاف جهت میدان به‌طور بسیار آهسته‌ای سوق پیدا می‌کنند که این موجب



شکل ۲ــ۵ 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.

۱ــ drift velocity

برقراری جریان الکتریکی در رسانا می‌شود (شکل ۲ــ۷). اندازهٔ سرعت سوق در یک رسانای فلزی بسیار کم و مثلاً در سیم‌های مسی از مرتبهٔ بزرگی $10^{-5}\,m/s$ یا $10^{-4}\,m/s$ است. توجه کنید که جهت قراردادی جریان الکتریکی I، برخلاف جهت سوق الکترون‌هاست.

شکل ۲ــ۷ مسیر زیگزاگ یک الکترون آزاد در یک رسانای فلزی. در حضور میدان الکتریکی، این مسیر زیگزاگ در خلاف جهت میدان سوق یافته است[1].

فعالیت ۲ــ۱

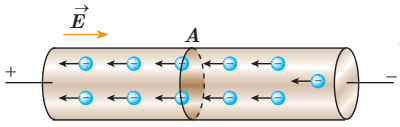
سرعت سوق الکترون‌های آزاد در یک رسانا می‌تواند به کندیِ سرعت حرکت یک حلزون باشد. اگر سرعت سوق الکترون‌ها این‌قدر کم است، پس چرا وقتی کلید برق را می‌زنیم چراغ‌های خانه به سرعت روشن می‌شوند؟ (*راهنمایی*: شیلنگ شفافی را در نظر بگیرید. وقتی شیر را باز می‌کنید، هنگامی که شیلنگ پر از آب است، آب بلافاصله از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

اکنون می‌خواهیم تعریفی برای جریان الکتریکی در یک رسانا ارائه کنیم. فرض کنید بار خالص Δq در بازهٔ 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

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad (۲ــ۱)$$

در رابطهٔ ۲ــ۱ 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 لامپ حبابیِ ۲۰۰W، ۲۰۰A برای استارت خودرو، ۱mA برای تأمین انرژی نمایشگر گوشی همراه، ۱nA برای جریان نورون‌های مغزی، ۱۰kA در یک یورش آذرخش نوعی، و ۱GA در بادهای خورشیدی[2].

در این فصل با جریان مستقیم[3] سروکار داریم که در آن جهت جریان با زمان تغییر نمی‌کند و مقدار جریان ثابت می‌ماند.



شکل ۲ــ۶ در حضور اختلاف پتانسیل، شارش بار خالص از مقطع A سیم، دیگر برابر صفر نیست.

آندره ماری آمپر (۱۸۳۶ــ۱۷۷۵م)

آندره ماری‌آمپر در حومه شهر لیون فرانسه به‌دنیا آمد. در کودکی و نوجوانی عشق و علاقهٔ فراوانی به ریاضیات داشت و پیوسته اطلاعاتش در زمینهٔ علوم ریاضی را تکمیل می‌کرد. 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 به‌عنوان معلم ریاضی و نجوم در مدرسهٔ لیون تدریس کند. دو سال در مدرسهٔ لیون تدریس کرد و در سال ۱۸۰۵ به پاریس سفر کرد تا در کالج پلی‌تکنیک مشغول به کار شود. در سال ۱۸۰۹ به سمت استاد ریاضی و مکانیک این کالج برگزیده شد. در سال ۱۸۱۹ دانشمند دانمارکی، *یوهان اُرستد* کشف کرد که عقربهٔ 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 برای قدردانی از زحمات او دانشمندان، یکای جریان را به‌نام آمپر نام‌گذاری کردند.

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

۲ــ به‌خاطر سپردن این مقادیر ضرورتی ندارد.

۳ــ Direct Current (DC)

مثال ۲ــ۱

ولتاژ باتری یک نوع ماشین‌حساب ۳/۰V است. وقتی ماشین‌حساب روشن است، این باتری باعث عبور جریان ۰/۱۷mA 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 ماشین‌حساب می‌دهد؟

پاسخ : الف) باری که در یک ساعت از مدار می‌گذرد، با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱ برابر است با

$$\Delta q = I(\Delta t) = (۰/۱۷ \times ۱۰^{-۳}\mathrm{A})(۳/۶ \times ۱۰^{۳}\mathrm{s}) = ۰/۶۱\mathrm{C}$$

ب) انرژی‌ای که باتری به مدار می‌دهد، بنابه رابطهٔ ۱ــ۱۳ ($W_{\text{خارجی}} = q\Delta V$) چنین می‌شود :

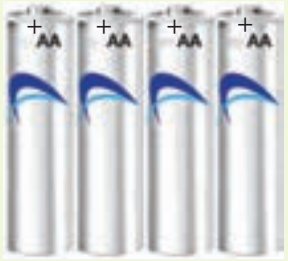
$$q\Delta V = (۰/۶۱\mathrm{C})(۳/۰\mathrm{V}) = ۱/۸\mathrm{J} = \text{انرژی داده شده به مدار}$$

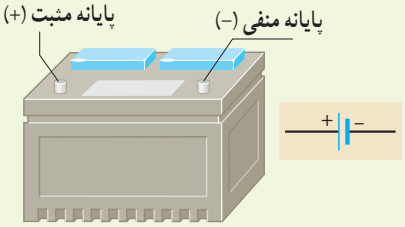
تمرین ۲ــ۱

در رابطهٔ $\Delta q = I(\Delta t)$ اگر I برحسب آمپر و Δt برحسب ساعت باشد، یکای Δq، *آمپر ــ ساعت* می‌شود. باتری خودروها با آمپر ــ ساعت (Ah) و باتری گوشی‌های همراه با میلی‌آمپر ــ ساعت (mAh) مشخص می‌شود. هرچه آمپر ــ ساعتِ یک باتری بیشتر باشد حداکثر باری که باتری می‌تواند از مدار عبور دهد تا به‌طور ایمن تخلیه شود، بیشتر است.

الف) باتری استاندارد خودرویی، ۵۰Ah است. اگر این باتری جریان متوسط ۵/۰A را فراهم سازد، چقدر طول می‌کشد تا خالی شود؟

ب) روی یک باتری قلمی مقدار ۱۰۰۰mAh نوشته شده است. اگر این باتری جریان متوسط ۱۰۰μA را فراهم سازد، چه مدت طول می‌کشد تا خالی شود؟





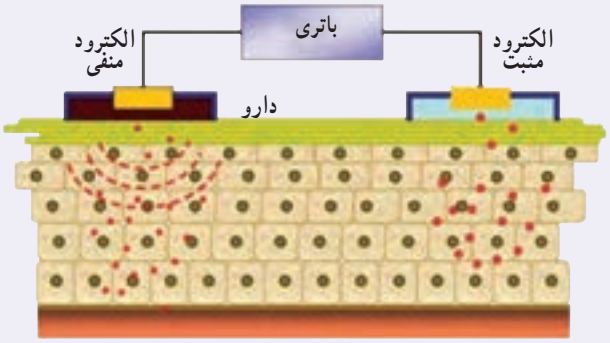
خوب است بدانید: یون‌رانی[۱]

برای درمان التهاب سه روش وجود دارد. روش نخست که بدون درد است، خوردن دارو است. در این روش مقدار کمی دارو، از مرتبهٔ ۱μg، به بافت آسیب‌دیده می‌رسد. روش دوم تزریق آمپول است. این روش دردناک است، ولی می‌تواند داروی زیادی، از مرتبهٔ ۱۰mg را به بافت آسیب‌دیده برساند، یعنی ۱۰۰۰۰ برابر بیش از روش خوردن دارو. اما از دههٔ ۹۰ میلادی روش سومی نیز مطرح شده است که بدون درد است، ولی می‌تواند مقدار دارویی از مرتبهٔ ۱۰۰μg را به بافت آسیب‌دیده برساند. این روش که موسوم به *یون‌رانی* است، دارو را با استفاده از جریان‌های الکتریکی بسیار ضعیف به بافت آسیب دیده می‌رساند. یک وسیلهٔ 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

۱ــ Iontophoresis

۲ــ 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 ۰/۱۴mA به پای آسیب دیده برساند (شکل ب)، محاسبه نشان می‌دهد که این عمل ۱۵ دقیقه به طول خواهد انجامید.



(الف)

(ب)

۲ــ۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم

همان‌طور که در بخش قبل دیدیم وقتی در مداری 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[1] است. از اینجا می‌توان پیش‌بینی کرد که مقاومت الکتریکی به ابعاد هندسی رسانا، یعنی طول و سطح مقطع رسانا بستگی دارد. همچنین جنس مادهٔ 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؛ به‌طوری که 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 :

$$R = \frac{V}{I} \qquad (۲ــ۲)$$

در این رابطه مقاومت الکتریکی (R) برحسب ولت بر آمپر (V/A) می‌شود که به پاس خدمات علمی *جُرج سیمون اُهم* به نام اُهم نام‌گذاری شده است و با نماد Ω[2] نشان داده می‌شود. رسانایی را که دارای مقاومت الکتریکی است، اصطلاحاً مقاومت[3] می‌نامند و آن را در مدارهای الکتریکی با نماد ⎓ نمایش می‌دهند.

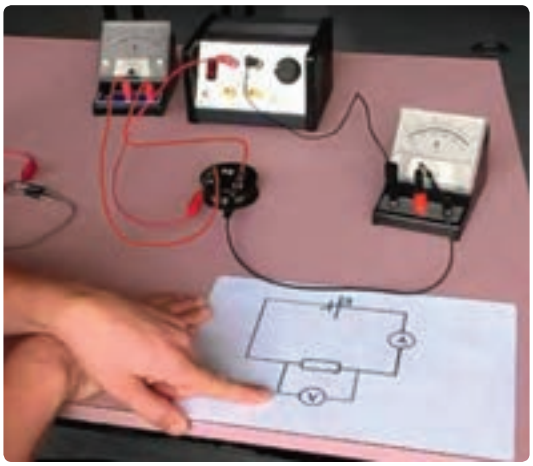
جورج سیمون اُهم (۱۸۵۴ــ۱۷۸۷م)

جورج سیمون اُهم در شهر باواریا آلمان متولد شد. جورج در ۱۸ سالگی به‌عنوان معلم ریاضی در یکی از مدارس سوئیس مشغول به کار شد. اُهم مطالعاتش را در رشتهٔ ریاضی دنبال کرد و در سال ۱۸۱۱ موفق به اخذ درجهٔ 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 «اُهم» نام‌گذاری کردند.

۱ــ Resistance

۲ــ از حروف الفبای یونانی که اُمگا خوانده می‌شود.

۳ــ Resistor



شکل ۲ــ۸ اسباب تحقیق قانون اُهم. توجه کنید که آمپرسنج در مدار به‌صورت متوالی و ولت‌سنج به‌صورت موازی بسته شده است.

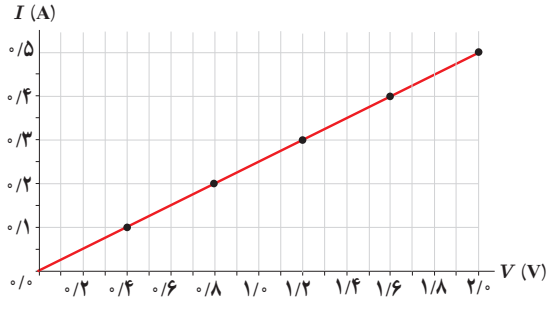
وسیله‌هایی که جریان الکتریکی را از خود عبور می‌دهند ممکن است با تغییر اختلاف پتانسیل اعمال‌شده و در نتیجه تغییر جریان عبوری، مقاومت ثابتی از خود بروز دهند و یا با تغییر اختلاف پتانسیل، مقاومت‌شان تغییر کند. برای تشخیص چنین وسایلی از هم، آزمایشی را تدارک می‌بینیم؛ به‌این ترتیب که وسیله را مانند شکل ۲ــ۸ 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 ولت‌سنجِ مدار اندازه می‌گیریم و سپس با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۲ 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 اُهمی می‌نامند. به عبارتی جریان عبوری از یک مقاومت اهمی همواره با اختلاف پتانسیل اعمال‌شده به دو سر آن رابطهٔ مستقیم دارد.

این قانون برای فلزات و بسیاری از رساناهای غیر فلزی در دمای ثابت برقرار است. جدول ۲ــ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده برای جریان و اختلاف پتانسیل یک مقاومت را نشان می‌دهد که از قانون اُهم پیروی می‌کند. همان‌طور که نمودار شکل ۲ــ۹ نشان می‌دهد جریان با ولتاژ برای این وسیله به‌طور خطی افزایش می‌یابد.

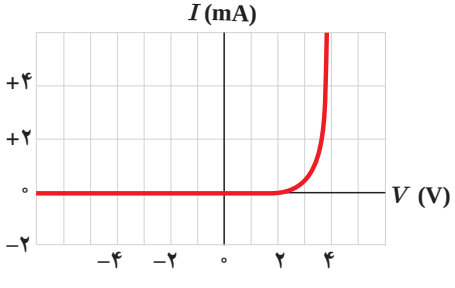
با این حال وسیله‌های زیادی نیز یافت می‌شود که از این قانون پیروی نمی‌کنند. یکی از این وسیله‌های غیراهمی، دیود نورگسیل (LED) است که با آن بعداً آشنا می‌شویم. نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل چنین دیودی تقریباً شبیه شکل ۲ــ۱۰ است.

جدول ۲ــ۱ مقادیری نوعی برای یک رسانای اُهمی

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

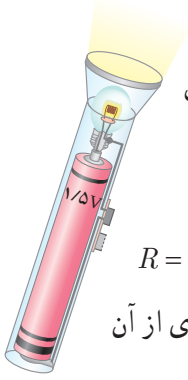


شکل ۲ــ۹ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل نشان می‌دهد که برای این رسانای اُهمی، جریان به‌طور مستقیم با ولتاژ افزایش می‌یابد.



شکل ۲ــ۱۰ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل برای یک دیود نورگسیل

مثال ۲ــ۲



یک لامپ چراغ قوهٔ کوچک از یک باتری ۱/۵V، جریانی برابر ۰/۳۰A می‌کشد. با فرض آنکه رشتهٔ لامپ، یک رسانای اُهمی باشد، الف) مقاومت آن چقدر است؟ ب) اگر باتری ضعیف شود و ولتاژ به ۱/۲V افت کند، جریان چقدر می‌شود؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۲ برای مقاومت رشتهٔ لامپ داریم :

$$R=\frac{V}{I}=\frac{۱/۵\text{V}}{۰/۳۰\text{A}}=۵/۰\Omega$$

ب) دوباره از رابطهٔ ۲ــ۲ استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه اکنون مقاومت رشتهٔ لامپ را داریم، جریان عبوری از آن چنین می‌شود :

$$I=\frac{V}{R}=\frac{۱/۲\text{V}}{۵/۰\Omega}=۰/۲۴\text{A}$$

۲ــ۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

در بخش قبل پیش‌بینی کردیم که مقاومت الکتریکی به طول و سطح مقطع رسانا و نیز ترکیب و ساختار آن بستگی دارد. در اینجا می‌خواهیم با تدارک آزمایشی این پیش‌بینی خود را بیازماییم.

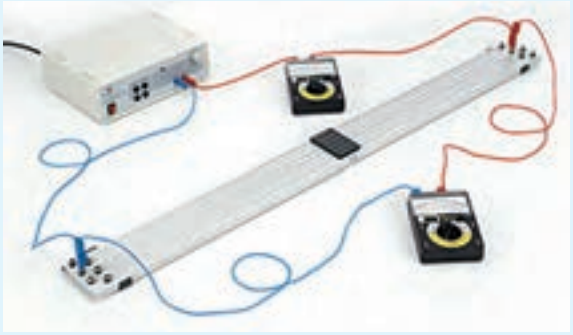
فعالیت ۲ــ۲

اسباب آزمایشی را شامل یک منبع تغذیه، آمپرسنج، ولت‌سنج، سیم‌های رابط و قطعه سیم‌هایی که می‌خواهیم مقاومت آنها را به‌دست آوریم، مطابق شکل داده‌شده سوار کنید. آزمایش شامل سه مرحله است.

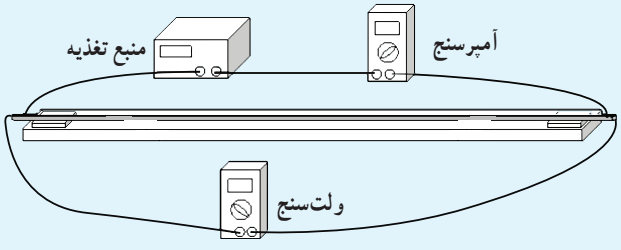
۱ــ قطعهٔ سیم‌هایی از جنس یکسان، مثلاً کنستانتان (یا نیکروم) با قطر برابر ولی طول‌های متفاوت را در مدار قرار دهید و بااستفاده از تعریف مقاومت، مقاومت هر کدام از سیم‌ها را با استفاده از عددی که آمپرسنج و ولت‌سنج نشان می‌دهند محاسبه و نتایج خود را در جدولی ثبت کنید. به‌نظر شما چه رابطه‌ای بین مقاومت سیم‌ها و طول آنها وجود دارد؟

۲ــ آزمایش را با سیم‌هایی از جنس یکسان با طول برابر، ولی قطرهای متفاوت انجام دهید و نتایج خود را در جدولی ثبت کنید. به‌نظر شما چه رابطه‌ای بین مقاومت سیم‌ها و سطح مقطع آنها وجود دارد؟

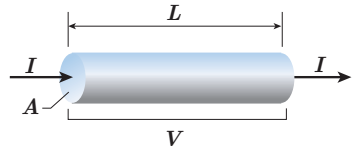
۳ــ آزمایش را با دو قطعه سیم هم‌طول و با قطر یکسان انجام دهید که این بار جنس یکی از آنها کنستانتان و دیگری نیکروم است و نتایج خود را یادداشت کنید. از این فعالیت چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



(الف) اسباب آزمایش اندازه‌گیری مقاومت یک سیم رسانا



(ب) طرحی از مدار این آزمایش



شکل ۲ــ۱۱ از سیمی به طول L و مقطع یکنواخت A، تحت اختلاف پتانسیل V، جریان I می‌گذرد.

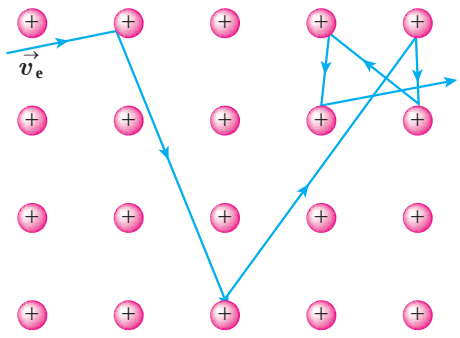
با انجام فعالیت بالا درمی‌یابیم که مقاومت جسم در دمای ثابت به طول، مساحت مقطع، و جنس آن بستگی دارد. این آزمایش‌ها که با محاسبات نظری نیز تأیید شده‌اند نشان می‌دهد اگر سطح مقطع جسم در تمام طول آن یکسان باشد (شکل ۲ــ۱۱)، مقاومت آن از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad (۲ــ۳)$$

که در آن طول رسانا (L) برحسب متر (m)، مساحت مقطع جسم (A) برحسب متر مربع (m^2)، و مقاومت جسم (R) برحسب اُهم (Ω) است، و بنابراین، کمیت ρ که به آن **مقاومت ویژه** گفته می‌شود برحسب اُهم‌ــمتر ($\Omega.m$) می‌شود. این بستگی مقاومت به طول و مساحت مقطع جسم را می‌توان با شبیه‌سازی‌های ساده‌ای نیز درک کرد. هرچه جسم بلندتر شود الکترون‌ها هنگام عبور از آن برخوردهای بیشتری با اتم‌ها پیدا می‌کنند. بنابراین، مقاومت الکتریکی جسم بیشتر می‌شود. کوچک‌تر شدن سطح مقطع جسم را نیز می‌توان به کوچک‌تر شدن سطح مقطع لوله‌ای تشبیه کرد که در آن شاره‌ای در جریان است. کوچک‌تر شدن مقطع سبب کاهش عبور شاره می‌شود که به‌معنای افزایش مقاومت در برابر عبور شاره است.

مقاومت ویژهٔ یک ماده به ساختار اتمی و دمای آن بستگی دارد. رساناهای الکتریکی خوب مقاومت ویژهٔ بسیار کم و عایق‌های خوب مقاومت ویژهٔ بسیار زیادی دارند. جدول ۲ــ۲ مقاومت ویژهٔ برخی مواد را در دمای $20^\circ C$ نشان می‌دهد. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد دسته‌ای از مواد مانند ژرمانیم و سیلیسیم نیز وجود دارند که مقاومت ویژهٔ آنها بین مقاومت ویژهٔ رساناها و نارساناهاست. به‌این دسته از مواد، **نیم‌رسانا** می‌گویند.

تغییر مقاومت ویژه با دما : اگر یک رسانای فلزی داشته باشیم، با افزایش دمای آن، تعداد حامل‌های بار (اینجا الکترون‌های آزاد) تقریباً ثابت می‌ماند، ولی ارتعاشات کاتوره‌ای اتم‌ها و یون‌های آن افزایش می‌یابد. این عامل موجب افزایش برخورد حامل‌های بار با شبکهٔ اتمی رسانای فلزی می‌شود (شکل ۲ــ۱۲) و به این ترتیب، مقاومت رسانا در برابر



شکل ۲ــ۱۲ حرکت الکترون در داخل شبکهٔ بلوری فلز. با افزایش دما، ارتعاشات شبکه و درنتیجه برخورد الکترون‌ها با شبکه افزایش می‌یابد.

جدول ۲ــ۲ــ مقاومت ویژه در دمای $20^\circ C$ و ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ برخی از رساناها و نیم‌رساناها

ماده	مقاومت ویژه ρ ($\Omega.m$)	ضریب دمایی مقاومت ویژه α (K^{-1})
رسانای فلزی		
نقره	$1/6\times10^{-8}$	$4/1\times10^{-3}$
مس	$1/7\times10^{-8}$	$4/3\times10^{-3}$
طلا	$2/4\times10^{-8}$	$3/4\times10^{-3}$
آلومینیم	$2/8\times10^{-8}$	$4/4\times10^{-3}$
تنگستن	$5/5\times10^{-8}$	$4/5\times10^{-3}$
آهن	$9/7\times10^{-8}$	$6/5\times10^{-3}$
پلاتین	10×10^{-8}	$3/9\times10^{-3}$
سرب	22×10^{-8}	$4/3\times10^{-3}$
کُنستانتان [1]	44×10^{-8}	$2/0\times10^{-6}$
نیکروم [2]	100×10^{-8}	$4/0\times10^{-4}$
نیم‌رسانا		
گرافیت	$3/5\times10^{-5}$	-5×10^{-4}
ژرمانیُم	$0/46$	-5×10^{-2}
سیلیسیم خالص	$2/5\times10^{3}$	-7×10^{-2}
عایق		
انواع شیشه	$10^{10}-10^{14}$	
لاستیک سخت	10^{13}	
کوارتز (ذوب شده)	10^{16}	

۱ــ ۶۰ درصد مس، ۴۰ درصد نیکل

۲ــ ۵۹ درصد نیکل، ۲۳ درصد مس، ۱۶ درصد کرم و ...

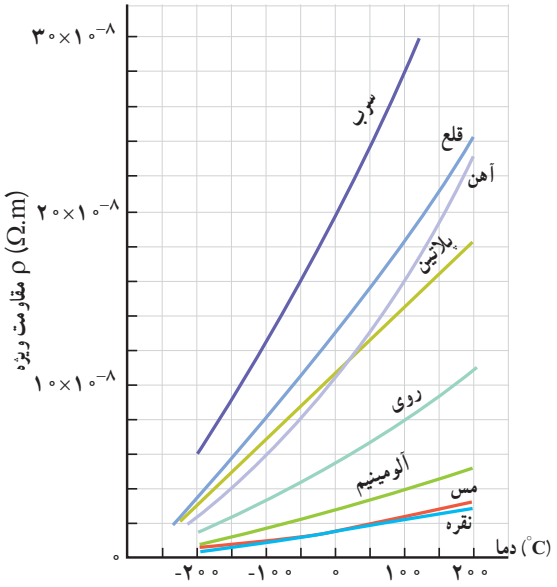
عبور جریان زیاد می‌شود؛ مثلاً در یک لامپ رشته‌ای حبابی (شکل ۲ــ۱۳) مقاومت آن با افزایش دمای رشته به‌شدت افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت ویژهٔ فلزات در یک گسترهٔ دمایی نسبتاً بزرگ با دما تقریباً به‌طور خطی تغییر می‌کند. شکل ۲ــ۱۴، مقاومت ویژهٔ برخی از فلزات را در محدوده‌ای از دما نشان می‌دهد. یک تقریب تجربی خوب که برای اغلب مقاصد، به حدّ کافی مناسب است توسط رابطهٔ زیر داده می‌شود :

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \qquad (۴ــ۲)$$

شکل ۲ــ۱۳ عبور جریان از رشتهٔ (فیلامان)تنگستنی موجب درخشش لامپ حبابی شده است.

که در آن T_0 دمای مرجع و ρ_0 مقاومت ویژه در آن دماست (معمولاً T_0 را دمای اتاق $T_0 = ۲۰^\circ C = ۲۹۳K$ می‌گیرند) و α ثابتی موسوم به ضریب دمایی مقاومت ویژه و T دمای رسانا (برحسب $^\circ C$ یا K) است. یکای α در این رابطه K^{-1} (یا $^\circ C^{-1}$) است.

اگر یک نیم‌رسانا داشته باشیم، در دماهای پایین تعداد حامل‌های بار[1] ناچیز است و نیم‌رسانا مانند یک نارسانا رفتار می‌کند. با افزایش دما، نشان داده می‌شود بر تعداد این حامل‌های بار افزوده می‌گردد. گرچه با افزایش دما تعداد برخوردهای کاتوره‌ای حامل‌های بار با شبکهٔ اتمی افزایش می‌یابد، اما تأثیر افزایش تعداد حامل‌های بار بیشتر از افزایش این برخوردهای کاتوره‌ای است. به این ترتیب، مقاومت ویژهٔ نیم‌رساناها با افزایش دما کاهش می‌یابد. ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ برخی از مواد در جدول ۲ــ۲ داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌کنید این ضریب برای نیم‌رساناها منفی است که به معنی کاهش مقاومت ویژهٔ این مواد با افزایش دما است.

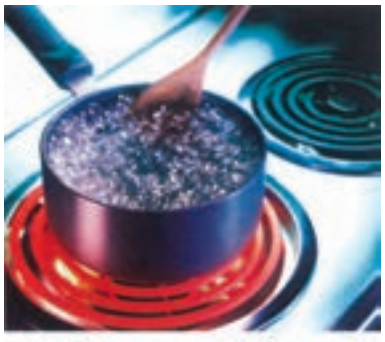


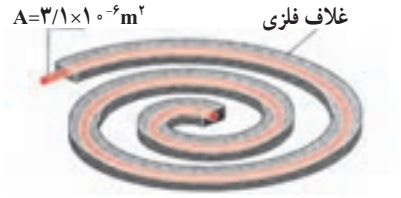
شکل ۲ــ۱۴ نمودار مقاومت ویژهٔ چند فلز در یک گسترهٔ دمایی

۱ــ در نیم‌رساناها علاوه بر الکترون‌های آزاد، حامل‌های بار مثبتی نیز وجود دارند که بررسی آنها خارج از سطح این کتاب است.

مثال ۲ــ۳

شکل روبه‌رو، المنت یک اجاق برقی را نشان می‌دهد. این المنت شامل سیمی به طول ۱/۱m و سطح مقطع $۳/۱\times۱۰^{-۶}m^۲$ است که داخل مادهٔ عایقی قرار گرفته است که خود، درون یک غلاف فلزی است. با عبور جریان، المنت داغ می‌شود. مقاومت ویژهٔ مادهٔ سازندهٔ سیم در دمای $T_۰ = ۳۲۰^\circ C$ برابر با $\rho_۰ = ۶/۸\times۱۰^{-۵}\Omega.m$ است و ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ آن $\alpha = ۲/۰\times۱۰^{-۳}K^{-۱}$ است. مقاومت سیم در دمای $۴۲۰^\circ C$ چقدر است؟





یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

پاسخ : مقاومت ویژهٔ ρ را از رابطهٔ $\rho = \rho_۰[۱ + \alpha(T - T_۰)]$ حساب می‌کنیم :

$$\rho = \rho_۰[۱ + \alpha(T - T_۰)] = (۶/۸\times۱۰^{-۵}\Omega.m)[۱ + (۲/۰\times۱۰^{-۳}K^{-۱})(۱۰۰K)]$$
$$= ۸/۲\times۱۰^{-۵}\Omega.m$$

حال از رابطهٔ ۳ــ۲ مقاومت سیم در دمای $۴۲۰^\circ C$ برابر است با

$$R = \rho\frac{L}{A} = (۸/۲\times۱۰^{-۵}\Omega.m)\frac{(۱/۱m)}{(۳/۱\times۱۰^{-۶}m^۲)} = ۲۹\Omega$$

مثال ۲ــ۴: دماسنج مقاومت پلاتینی

همان‌طور که در کتاب فیزیک ۱ دیدید دماسنج مقاومت پلاتینی یکی از سه دماسنج معیار برای اندازه‌گیری دماست. از دماسنج مقاومت پلاتینی می‌توان برای اندازه‌گیری دقیق دما در گسترهٔ دمایی حدوداً از ۱۴K تا ۱۲۳۵K استفاده کرد. اساس کار دماسنج های مقاومت پلاتینی مبتنی بر تغییر مقاومت الکتریکی با دماست. در این دماسنج‌ها از پلاتین استفاده می‌کنند که تقریباً دچار خوردگی نمی‌شود و نقطهٔ ذوب بالایی دارد.

تصویری از یک دماسنج مقاومت پلاتینی

فرض کنید در دمای $۲۰/۰^\circ C$ مقاومت پلاتین یک دماسنج برابر با ۱۶۴Ω باشد. وقتی این دماسنج در محلول خاصی قرار گیرد، مقاومت آن ۱۸۷Ω می‌شود. دمای این محلول چقدر است؟ (مقدار دقیق α برای پلاتین برابر $۳/۹۲\times۱۰^{-۳}(^\circ C)^{-۱}$ است.)

پاسخ : چون مقاومت R رابطهٔ مستقیمی با مقاومت ویژهٔ ρ دارد ($R = \rho L/A$)، آن‌گاه از رابطهٔ ۲ــ۴ نتیجه می‌گیریم [۱] :

$$R = R_۰[۱ + \alpha(T - T_۰)]$$

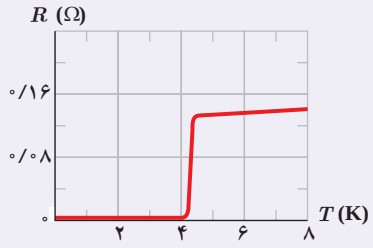
که در آن $R_۰ = \rho_۰\frac{L}{A}$ مقاومت سیم در دمای $T_۰ = ۲۰/۰^\circ C$ است. با جایگذاری مقادیر معلوم در معادلهٔ بالا خواهیم داشت :

$$۱۸۷\Omega = (۱۶۴\Omega)[۱ + (۳/۹۲\times۱۰^{-۳}(^\circ C)^{-۱})(T - ۲۰/۰^\circ C)] \Rightarrow T = ۵۵/۸^\circ C$$

۱ــ از افزایش طول و مساحت سیم در اثر افزایش دما صرف‌نظر می‌شود.

خوب است بدانید: ابَررسانایی[1]

در اوایل قرن بیستم میلادی پدیدهٔ شگفت‌انگیزی برای برخی از فلزات در دمای خیلی پایین مشاهده شد و دریافتند با کاهش دما، مقاومت ویژهٔ این فلزات در دمای خاصی موسوم به دمای بحرانی[2]، *ناگهان* به صفر افت می‌کند و از آن دما پایین‌تر همچنان صفر باقی می‌ماند. به این پدیده ابررسانایی می‌گویند. فیزیک‌دان هلندی *کامرلینگ اونز*[3] در سال ۱۹۱۱ برای نخستین بار، این پدیده را برای جیوه مشاهده کرد و دریافت که در دمای حدود ۴K مقاومت ویژهٔ جیوه به‌طور ناگهانی صفر می‌شود (شکل را ببینید). دمای بحرانی برای فلزات ابر رسانای مختلف، متفاوت است، ولی برای اغلب آنها نزدیک به صفر کلوین است. مثلاً همان‌طور که جدول روبه‌رو نشان می‌دهد این دما برای آلومینیم ۱/۱۷۵K و برای قلع ۳/۷۲۱K است. البته در سال ۱۹۸۶ میلادی در یک نمونهٔ غیر فلزی سرامیک که از باریم، لانتانیم، مس و اکسیژن ساخته شده بود این پدیده در دمای ۳۵K مشاهده شد. در اوایل ۱۹۸۷ میلادی فیزیک‌دان‌ها سرامیک دیگری با دمای بحرانی ۹۸K و در سال ۱۹۸۸ میلادی سرامیکی با دمای بحرانی ۱۲۵K ساختند.



مقاومت ویژهٔ جیوه در دمای حدود ۴K به صفر می‌رسد.

عنصر	دمای بحرانی(K)
تنگستن	۰/۰۱۵۴
بریلیم	۰/۰۲۶
تیتانیم	۰/۳۹
کادمیم	۰/۵۲
اُسمیم	۰/۶۵۵
مولیبدن	۰/۹۱۶
گالیم	۱/۰۸۳۳
آلومینیم	۱/۱۷۵
پروتاکتینیم	۱/۴
ایندیم	۳/۴۰۵
قلع	۳/۷۲۱
جیوه	۴/۱۵۴
تانتال	۴/۴۷
سرب	۷/۲۳
نیوبیم	۹/۲۵

برای اینکه به درکی از پدیدهٔ ابررسانایی برسید شارش یک مایع معمولی با چسبندگی ناچیز را در یک لوله تصور کنید. اگر از چنین مایعی استفاده کنید، دیگر نیاز نیست برای تداوم شارش مایع از یک منبع نیروی محرکهٔ شاره استفاده کنید؛ زیرا اگر اصطکاکی نباشد برای ادامهٔ حرکت یکنواخت نیاز به هیچ نیروی خارجی‌ای نخواهد بود. مثلاً اگر این شاره را در لولهٔ دایره‌ای با تکانی سریع به حرکت اندازیم، شاره با وجود اینکه فشار در تمام نقاط لوله یکسان است، به مدت نامحدودی در لوله جریان خواهد داشت. جالب است که چنین شاره‌ای را به دست آورده‌اند. *کاپیتزا*[4] فیزیکدان روسی در سال ۱۹۳۷ میلادی مشاهده کرد که هلیم مایع اگر تا زیر ۲/۱۲K سرد شده باشد، چسبندگی بسیار ناچیزی خواهد داشت و در قیاس با ابررساناها به این هلیم ابرشاره گفته می‌شود. پس شارش مایع بدون چسبندگی، مانند جریان الکتریکی در ابررساناهاست. به همین ترتیب اگر در یک حلقهٔ ابر رسانا جریانی الکتریکی ایجاد کنیم، پس از حذف نیروی محرکهٔ الکتریکی جریان متوقف نخواهد شد و برای مدتی طولانی ادامه خواهد یافت. فیزیک‌دانی به نام *کالینز*[5] در سال ۱۹۵۶ میلادی توانست جریان ثابتی را در یک حلقهٔ ابررسانا به مدت ۲/۵ سال حفظ کند. بنابراین، ابر رسانایی اهمیت بالقوهٔ زیادی در فنّاوری دارد؛ زیرا بدان معناست که بار می‌تواند بدون اتلاف انرژی در داخل یک ابر رسانا جریان پیدا کند، و کشف مواد سرامیکی که می‌توانند در دمای بالا ابر رسانا شوند وعدهٔ روزی را می‌دهد که وسایل ابررسانا در دمای اتاق به کار گرفته شوند.

۱ــ Super ــ Conductivity
۲ــ Critical Temperature
۳ــ Kamerlingh Onnes
۴ــ P. L. Kapitza
۵ــ T. Collins

خوب است بدانید: نمره‌بندی سیم‌ها

در صنعتِ تولید سیم، سیم‌ها را با ضخامت‌های معیّنی می‌سازند و معلوم می‌کنند هر سیم چه جریان بیشینه‌ای را می‌تواند تحمل کند. بدیهی است هر چه ضخامت سیم بزرگ‌تر باشد، جریان بیشتری را می‌تواند تحمل کند. به هر سیم با ضخامت معیّن کُد (نمره) مشخصی را اختصاص می‌دهند. جدول روبه‌رو، برخی از این نمره‌بندی‌ها با جریان مجاز بیشینهٔ چند سیم را براساس استاندارد بین‌المللی SWG[1] و استاندارد آمریکایی AWG[2] نشان می‌دهد.

نمره‌بندی سیم‌های توپر مسی براساس دو استاندارد SWG و AWG

جریان بیشینهٔ مجاز (A)	قطر (mm)	نمره بر اساس SWG	قطر (mm)	نمره براساس AWG
۱۱۹	۷/۰۱	۲	۷/۳۵	۱
۹۴	۶/۴۰	۳	۶/۵۴	۲
۷۵	۵/۸۹	۴	۵/۸۸	۳
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
۰/۲۸۸	۰/۳۷۶	۲۸	۰/۳۶۱	۲۷
۰/۲۲۶	۰/۳۱۵	۳۰	۰/۳۲۱	۲۸
۰/۱۸۲	۰/۲۷۴	۳۲	۰/۲۸۶	۲۹
۰/۱۴۲	۰/۲۵۴	۳۳	۰/۲۵۵	۳۰
۰/۱۱۳	۰/۲۳۴	۳۴	۰/۲۲۶	۳۱
۰/۰۹۱	۰/۱۹۳	۳۶	۰/۲۰۳	۳۲
۰/۰۷۲	۰/۱۷۳	۳۷	۰/۱۸۰	۳۳
۰/۰۵۶	۰/۱۵۲	۳۸	۰/۱۶۰	۳۴
۰/۰۴۴	۰/۱۳۲	۳۹	۰/۱۴۲	۳۵

مثال ۲ــ۵

سیم‌کشی خانه‌ها معمولاً با سیم‌های مسی نمرهٔ ۱۴ بر اساس استاندارد SWG صورت می‌گیرد که قطری برابر با ۲/۰۳۲ mm دارد. مقاومت ۱۰۰ m از این سیم‌ها در دمای اتاق چقدر است؟

پاسخ : مساحت مقطع این سیم برابر است با

$$A=\pi r^2=\pi D^2/4=(3/14)(2/032\times10^{-3}\text{m})^2/4=3/24\times10^{-6}\text{m}^2$$

از طرفی مقاومت ویژهٔ سیم مسی در دمای ۲۰°C با استفاده از جدول ۲ــ۲، برابر $1/69\times10^{-8}\Omega.\text{m}$ و طول سیم مسی ۱۰۰ m است. بنابراین، با استفاده از رابطهٔ $R=\rho L/A$ برای مقاومت سیم مسی خواهیم داشت :

$$R=\rho\frac{L}{A}=(1/69\times10^{-8}\Omega.\text{m})\frac{(100\text{m})}{(3/24\times10^{-6}\text{m}^2)}=0/522\Omega$$

انواع مقاومت‌ها و کدگذاری رنگی مقاومت‌های کربنی : در بسیاری از مدارها به‌خصوص در وسایل الکترونیکی مقاومت‌ها برای کنترل جریان و ولتاژ استفاده می‌شود. انواع اصلی مقاومت‌ها بر دو نوع‌اند.

۱ــ **مقاومت‌های پیچه‌ای**[3] شامل پیچه‌ای از یک سیم نازک‌اند که معمولاً جنس آنها از آلیاژهایی مانند

۱ــ Standard Wire Gauge

۲ــ American Wire Gauge

۳ــ wire wound resistor به این مقاومت‌ها در صنعت *مقاومت آجری* نیز می‌گویند.

نیکروم[1] یا *منگانین*[2] است. شکل ۲ــ۱۵ــ الف نمونه‌ای از ساختار چنین مقاومت‌هایی را نشان می‌دهد.

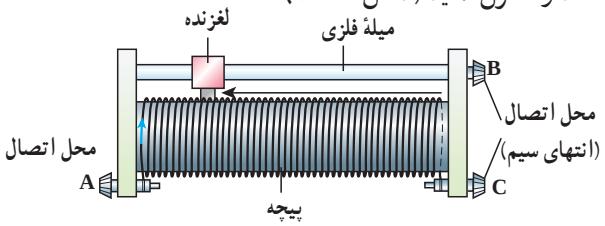
این مقاومت‌ها برای به‌دست آوردن مقاومت‌های پایین بسیار دقیق و همچنین توان‌های بالا ساخته می‌شوند. بیشینهٔ توان الکتریکی که این مقاومت‌ها می‌توانند تحمل کنند، بی‌آنکه بسوزند روی آنها نوشته شده است (شکل ۲ــ ۱۵ــ ب).

یکی از انواع مشهور مقاومت‌های پیچه‌ای، **رئوستا**[3] نام دارد که یک نوع مقاومت متغیر است. در مدارهای الکترونیکی وسیله‌ای به نام **پتانسیومتر**[4] به نوعی همان نقش را انجام می‌دهد. این نوع مقاومت‌ها، متغیرند. یک رئوستا از سیمی با مقاومت ویژهٔ نسبتاً زیاد ساخته شده است. در یکی از انواع رئوستا (رئوستای خطی)، 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 داده و جریان را در مدار کنترل نماید (شکل ۲ــ۱۶).

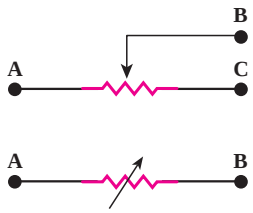
الف) نمونه‌ای از ساختار یک مقاومت پیچه‌ای

ب) تصویری از یک مقاومت پیچه‌ای

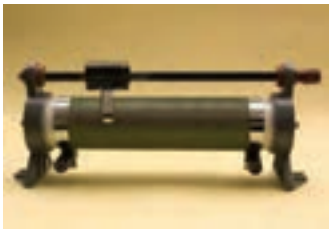
شکل ۲ــ۱۵

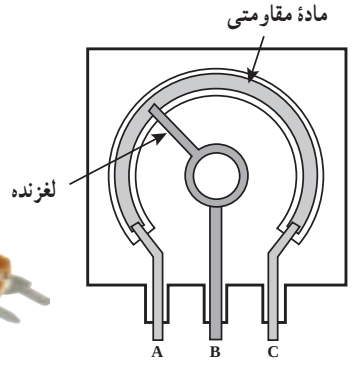


الف) طرحی از ساختار یک رئوستای خطی



ب) نمادیک رئوستا یا پتانسیومتر در مدار الکتریکی


پ) تصویر واقعی یک رئوستای خطی



ت) طرحی از یک پتانسیومتر

ث) تصویری واقعی از یک پتانسیومتر

شکل ۲ــ۱۶

جدول ۲ــ۳ــ کد رنگی مقاومت‌ها

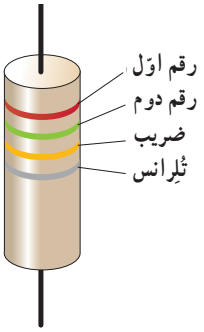
رنگ	عدد	ضریب	تلرانس
سیاه	۰	۱	
قهوه‌ای	۱	10^1	
قرمز	۲	10^2	
نارنجی	۳	10^3	
زرد	۴	10^4	
سبز	۵	10^5	
آبی	۶	10^6	
بنفش	۷	10^7	
خاکستری	۸	10^8	
سفید	۹	10^9	
طلایی		10^{-1}	٪۵
نقره‌ای		10^{-2}	٪۱۰
بی‌رنگ			٪۲۰

۲ــ **مقاومت‌های ترکیبی**[5] معمولاً از کربن، برخی نیم‌رساناها، و یا لایه‌های نازک فلزی ساخته شده‌اند. مقاومت‌های ترکیبی را در اندازه‌های خاص استانداردی تولید می‌کنند. مقدار این مقاومت‌ها یا روی آنها نوشته می‌شود، یا عمدتاً به‌صورت کدی رنگی نشان داده می‌شود که با ۳ یا ۴ حلقهٔ رنگی روی آنها مشخص شده است (شکل ۲ــ۱۷). هر رنگ، معرّف عددی است که در جدول ۲ــ۳

۱ــ Nichrome (آلیاژ نیکل و کُرم)　۲ــ Manganin (آلیاژ مس، نیکل و منگنز)　۳ــ Rheostat

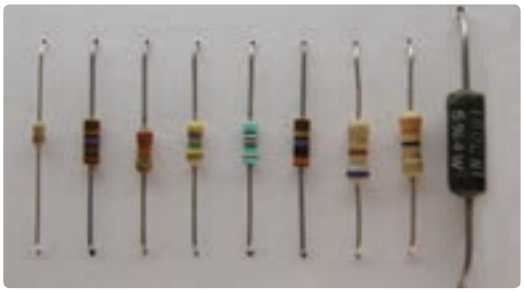
۴ــ Potentiometer. پتانسیومتر می‌تواند نقش پتانسیل‌سنجی نیز در مدارها داشته باشد که در آن صورت به آن پتانسیل‌سنج گفته می‌شود. این موضوع خارج از موضوع درسی این کتاب است.

۵ــ composition resistors



شکل ۲ــ۱۸ مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل ۲۵kΩ با تلرانس ۱۰ درصد است.

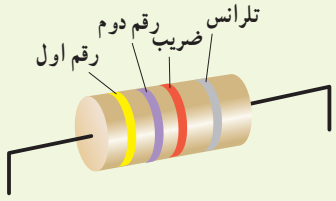
داده شده است. دو حلقهٔ اوّل (از آن طرفی که به یک سر مقاومت نزدیک‌تر است) به ترتیب، رقم اوّل و رقم دوم مقاومت را نشان می‌دهند. رقم حلقهٔ سوم ضریبی است به‌صورت 10^n که در ستون سوم جدول مشخص شده است.حلقهٔ چهارم یک حلقهٔ طلایی یا نقره‌ای رنگ است که تُلِرانس[1] نامیده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت را برحسب درصد مشخص می‌کند (شکل ۲ــ۱۸). نبود نوار چهارم به معنای آن است که تلرانس ۲۰ درصد است. برای خواندن حلقه‌های رنگی، مقاومت را طوری به دست می‌گیریم که حلقهٔ تلرانس در سمت راست قرار گیرد و بقیهٔ حلقه‌ها را از سمت چپ به راست می‌خوانیم.



شکل ۲ــ۱۷ تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی

تمرین ۲ــ۲

مقدار مقاومت نشان داده شده در شکل، و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت، بر حسب اُهم چقدر است؟

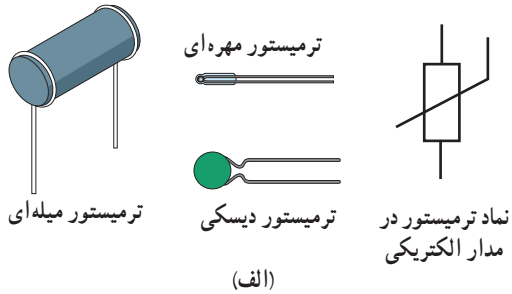


مقاومت‌های خاص و دیودها :

۱ــ **ترمیستور**[2] : 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 (شکل ۲ــ۱۹).

(ب)



(الف)

شکل ۲ــ۱۹ الف) طرحی از چند ترمیستور و نماد آن در مدارهای الکتریکی و ب) تصویری از چند ترمیستور دیسکی واقعی

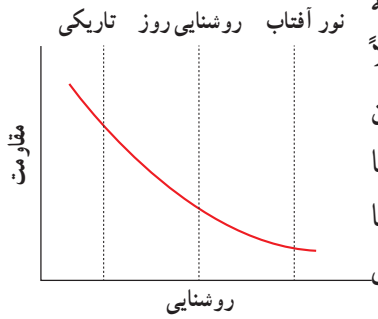
۱ــ tolerance

۲ــ Thermistor، برگرفته از عبارت Thermal Sensetive Resistor به معنای مقاومت حساس به دما.

فعالیت ۲ــ۳

ترمیستورها به دو نوع NTC و PTC تقسیم‌بندی می‌شوند. در مورد ساختار و کارکرد آنها تحقیق کرده و به کلاس گزارش دهید.

۲ــ مقاومت‌های نوری[۱] (LDR[۲]): 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 اُهمی دارد، در حالی‌که در یک نور مناسب، مقاومت آن به چند صد اُهم می‌رسد. نوعی از این مقاومت‌ها از جنس نیم‌رسانای خالص، مانند سیلیسیم هستند که با افزایش شدت نور تابیده شده، بر تعداد حامل‌های بار الکتریکی آنها افزوده شده و در نتیجه از مقاومت آنها کاسته می‌شود. مثلاً شکل ۲ــ۲۰ مقاومت الکتریکی چنین LDRهایی را بر حسب روشنایی[۳] (که با یکای LUX سنجیده می‌شود) نشان می‌دهد. شکل ۲ــ۲۱ الف تصویری از چند LDR و شکل ۲ــ۲۱ب دو نماد این مقاومت‌ها در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ــ۲۰ مقاومت بر حسب روشنایی برای یک LDR نوعی

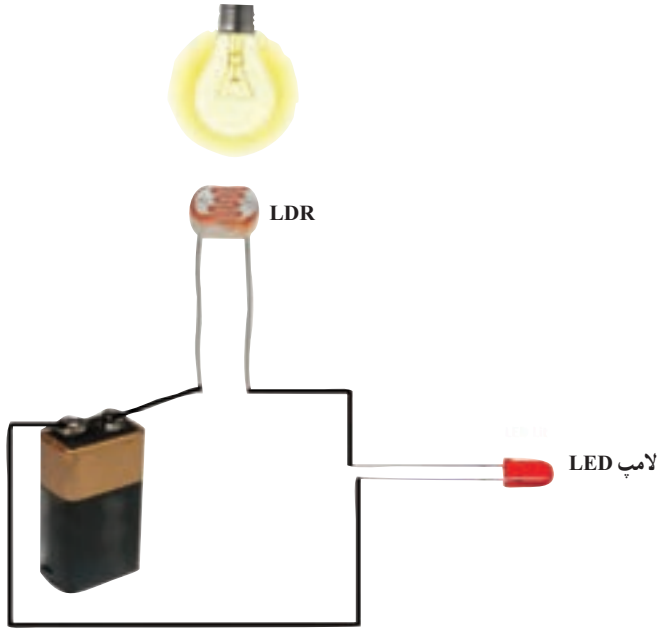
برای اینکه به درکی از ساز وکار این مقاومت‌ها برسید، شکل ۲ــ۲۲ را در نظر بگیرید که در آن یک LDR در مداری ساده به یک لامپ LED متصل شده است. تا هنگامی که لامپِ روشناییِ شکل خاموش باشد، LDR مقاومت بالایی دارد و مانع از روشن شدن لامپ LED می‌شود. با روشن شدن لامپ روشنایی از مقاومت LDR کاسته می‌شود و لامپ LED روشن می‌گردد. با تنظیم لامپ روشنایی به ترتیبی که LDR در معرض نور بیشتری قرار گیرد، شدت نور لامپ LED بیشتر می‌شود.

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

(الف)

(ب)

شکل ۲ــ۲۱ الف) تصویری از چند LDR
ب) نماد LDR در دو استاندارد متفاوت



شکل ۲ــ۲۲ یک مدار ساده متشکل از یک LDR، یک باتری، و یک لامپ LED. با روشن شدن چراغ روشنایی لامپ LED روشن می‌شود.

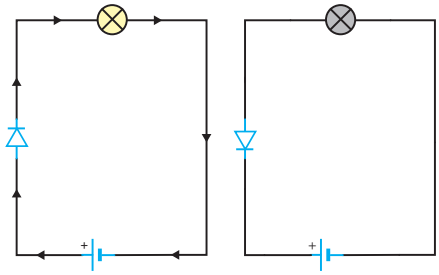
۱ــ Photoresistor
۲ــ Light Dependent Resistor
۳ــ Illumination

فنّاوری و کاربرد

در یک نوع از چراغ‌های روشنایی، اساس کار به این ترتیب است که با تابش نور به LDR و ایجاد جریان در آن، یک گرم‌کن الکتریکی فعال شده و با استفاده از یک دماپا، اتصال لامپ‌های روشنایی به منبع اصلی جریان را قطع می‌کند. در شب که نوری به LDR برخورد نمی‌کند، گرم‌کن خاموش می‌ماند و بدین‌ترتیب، اتصال لامپ‌های روشنایی قطع نمی‌شود و لامپ‌ها روشن می‌مانند (شکل ۲ــ۲۳).

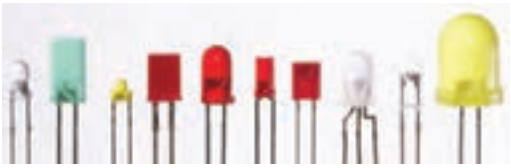
شکل ۲ــ۲۳ اجزای داخلی یک مدار کنترل‌کنندهٔ نوری، که در نوعی از چراغ‌های روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شود.

۳ــ 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. به‌همین دلیل، دیود را اغلب به عنوان یک‌سوکنندهٔ جریان در نظر می‌گیرند و آن را با نماد ⊣▷⊢ در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهند. پیکان در این نماد جهتی را نشان می‌دهد که جریان می‌تواند از دیود عبور کند. مثلاً مدارهای سادهٔ شکل ۲ــ۲۴ نشان می‌دهد که با تعویض جهت دیود، جریان از مدار عبور نمی‌کند و لامپ خاموش می‌شود. همچنین از دیود در مدارهای یک‌سوکننده برای تبدیل جریان‌های متناوب به جریان‌های مستقیم استفاده می‌شود که در فصل ۴ با آن آشنا می‌شوید.

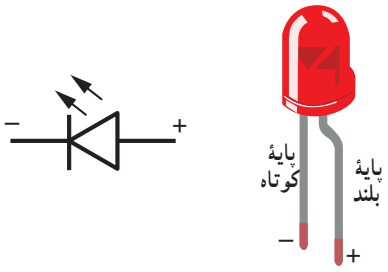


شکل ۲ــ۲۴ دیود در یک جهت جریان را عبور می‌دهد و در جهت مخالف مانع عبور جریان می‌شود.

دیودها انواع متفاوتی دارند که یکی از معروف‌ترین آنها دیودهای نورگسیل یا LED[۲] است (شکل ۲ــ۲۵). شکل ۲ــ۲۶ 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. نخستین LEDهای ساخته‌شده، قرمز و زرد بودند. فنّاوری LED در دههٔ ۹۰ میلادی با تولید LEDهایی که قابلیت تولید نور آبی و سفید داشتند، دستخوش تحوّل بزرگی شد. LED در مقایسه با لامپ‌های روشنایی معمولی، توان الکتریکی کمی مصرف کرده و در عوض، نور قابل ملاحظه‌ای تولید می‌کند. به همین دلیل از آنها در چراغ خودروها، روشنایی منازل، تابلوهای تبلیغاتی، نمایشگرهای LED و ... استفاده می‌شود. LEDها در مقایسه با لامپ‌های رشته‌ای عمر طولانی‌تری دارند و به‌دلیل نداشتن رشته به هنگام تولید نور انرژی گرمایی زیادی تولید نمی‌کنند.



شکل ۲ــ۲۵ تصویری از چند دیود نورگسیل



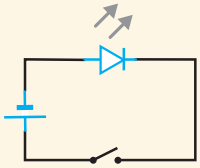
شکل ۲ــ۲۶ تصویری از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی

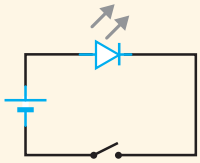
۱ــ Diode

۲ــ Light Emitting Diode

پرسش ۲ــ۱

در کدام شکل با بستن کلید، LED روشن می‌شود؟

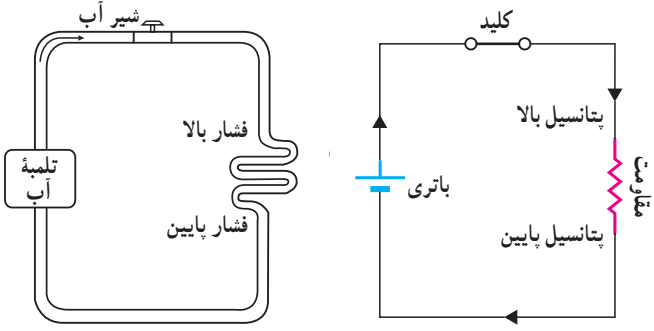




۲ــ۴ نیروی محرکهٔ الکتریکی و مدارها

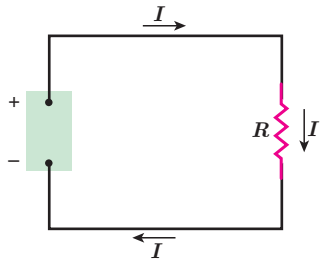
برای بالا بردن آب از سطح زمین به یک تلمبهٔ آب نیاز است تا آب را به ارتفاع معیّنی برساند. بدین ترتیب، آب انرژی پتانسیل گرانشی لازم برای جریان یافتن و انجام کار معیّنی را کسب می‌کند (شکل ۲ــ۲۷). برای اینکه بارهای الکتریکی را نیز از یک مقاومت الکتریکی عبور دهیم تا جریان ثابتی برقرار شود، لازم است بین دو 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 محرکهٔ الکتریکی گفته می‌شود. منبع‌های نیروی محرکهٔ الکتریکی (مانند باتری‌ها) بارهای الکتریکی مثبت را در خلاف جهت میدان الکتریکی از پتانسیل پایین‌تر به پتانسیل بالاتر می‌برند و با افزایش انرژی پتانسیل آنها، جریان ثابتی را در مدار برقرار می‌کنند (شکل ۲ــ۲۸).

شکل ۲ــ ۲۷ یک سرسرهٔ آبی. در واقع یک تلمبه، آب را مدام به بالای سرسره پمپ می‌کند و موجب جریان یافتن آب و سُرخوردن شخص بر روی سرسره می‌شود.



شکل ۲ــ۲۸ همان‌طور که تلمبهٔ 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 محرکهٔ 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 مهیّا می‌سازند. پیل‌های سوختی، سلول‌های خورشیدی، و مولدهای الکتریکی نمونه‌های دیگری از منبع‌های نیروی محرکهٔ الکتریکی‌اند.



شکل ۲ــ۲۹ یک مدار سادهٔ الکتریکی شامل مقاومت R، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ و سیم‌های رابط

مدار سادهٔ الکتریکی شکل ۲ــ۲۹ را در نظر بگیرید. منبع نیروی محرکه هنگام عبور بار Δq از منبع کاری به اندازهٔ ΔW روی آن انجام می‌دهد تا آن را در مدار به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا آن را از پایانهٔ با پتانسیل کمتر به پایانهٔ با

پتانسیل بیشتر ببرد، اصطلاحاً نیروی محرکهٔ الکتریکی (emf[1]) نامیده و با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود[2] :

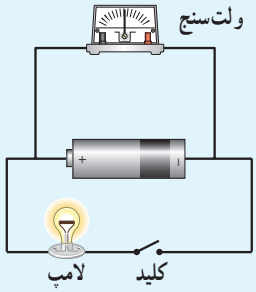
$$\mathscr{E}=\frac{\Delta W}{\Delta q} \qquad (۵_۲)$$

یکای کمیت نیروی محرکهٔ الکتریکی همان یکای اختلاف پتانسیل الکتریکی، یعنی ولت (V) است (۱V=۱J/۱C). پس اگر نیروی محرکهٔ یک باتری مثلاً ۱/۵V باشد، به این معناست که باتری روی هر کولن باری که از آن می‌گذرد ۱/۵J کار انجام می‌دهد و به این ترتیب انرژی پتانسیل الکتریکی آن را ۱/۵J افزایش می‌دهد.

فعالیت ۲ــ۴

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.



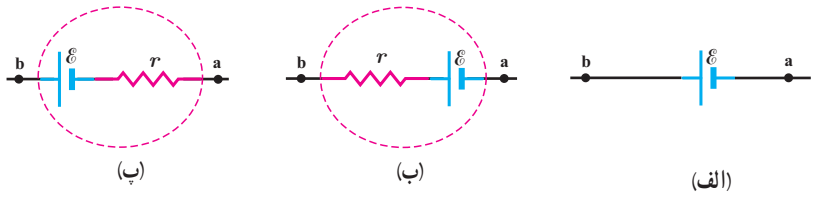
منبع‌های نیروی محرکهٔ الکتریکی، یا آرمانی هستند و یا واقعی. اگر پایانه‌های منفی و مثبت یک منبع نیروی محرکه را به ترتیب با a و b نمایش دهیم، اختلاف پتانسیل میان این دو پایانه برای یک منبع آرمانی برابر با نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ آن است :

$$V_b-V_a=\mathscr{E} \qquad (۶_۲)$$

فعالیت ۲ــ۵

میدان الکتریکی درون باتری از پایانهٔ مثبت به سمت پایانهٔ منفی است. توضیح دهید چرا وقتی از پایانهٔ مثبت باتری به سمت پایانهٔ منفی آن می‌رویم، پتانسیل کاهش می‌یابد و بالعکس.

منبع آرمانی در واقعیت وجود ندارد و منبع‌های نیروی محرکهٔ 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 محرکهٔ الکتریکی خواهد شد. شکل ۲ــ۳۰ نماد منبع نیروی محرکه را در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهد.



شکل ۲ــ۳۰ در مدارهای الکتریکی، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی آرمانی را به‌صورت (الف) و منبع‌های واقعی را به صورت (ب) یا (پ) نمایش می‌دهند.

۱ــ Electromotive Force

۲ــ توجه کنید که نیروی محرکهٔ الکتریکی واژهٔ نامناسبی است؛ زیرا emf نیرو نیست؛ بلکه مانند پتانسیل یک کمیت انرژی به ازای واحد بار است. نماد نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ است که فونت خاصی از حرف E یونانی می‌باشد.

خوب است بدانید: ماهی الکتریکی

ماهی‌های عظیم‌الجثهٔ 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 الکتریسیته بر بدن انسان

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 سَر باز داشته باشد، و یا با کرمی 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 آن‌قدر زیاد باشد که موجب مرگ شود. از سوی دیگر اگر مقاومت الکتریکی منطقهٔ تماس زیاد باشد و مثلاً شخص بر پایه‌های عایق ایستاده باشد، این خطر بسیار کم می‌شود.

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 عضلهٔ بطنی قلب
۰/۵۰A تا چند آمپر	ایست قلبی، اگر جریان سریع قطع شود، قلب مجدداً به‌کار می‌افتد.
بیشتر از چند آمپر	ایست قلبی، قطع تنفس، سوختگی.

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. به‌طوری 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.

مدار تک‌حلقه‌ای و افت پتانسیل در مقاومت : مدار سادهٔ تک‌حلقه‌ای شکل ۲ــ۳۱ را در نظر بگیرید. این مدار شامل باتری آرمانی B با نیروی محرکهٔ $\mathscr{E}$، مقاومت R، و دو سیم رابط است. فرض کنید می‌خواهیم از نقطهٔ دلخواهی شروع کنیم و مدار را به‌طور ذهنی در یک جهت دور بزنیم و هرجا با اختلاف پتانسیل‌ها مواجه شدیم، آنها را به‌طور جبری جمع کنیم. اگر از نقطهٔ a مثلاً به‌طور ساعتگرد شروع کنیم، نخست با باتری B مواجه می‌شویم. همان‌طور که دیدیم با حرکت از پایانهٔ منفی باتری به سمت پایانهٔ مثبت آن پتانسیل الکتریکی به اندازهٔ $\mathscr{E}+$ افزایش می‌یابد. وقتی در طول سیم بالایی حرکت می‌کنیم، هیچ تغییر پتانسیلی وجود ندارد؛ زیرا در بستن مدارها فرض کرده‌ایم از سیم‌های رابط با مقاومت ناچیز استفاده شده است. وقتی از مقاومت می‌گذریم پتانسیل طبق رابطهٔ $\Delta V = IR$ تغییر می‌کند، ولی توجه کنید پتانسیل باید کاهش یابد؛ زیرا ما از طرف پتانسیل بالاتر به سمت پتانسیل پایین‌تر حرکت کرده‌ایم (شکل ۲ــ۳۲). بنابراین، در شکل ما تغییر پتانسیل هنگام عبور از مقاومت برابر با $-IR$ است؛ یعنی اصطلاحاً در مقاومت افت پتانسیلی رخ می‌دهد. اگر با حرکت در طول سیم پایینی به نقطهٔ a باز گردیم چون مقاومت این سیم نیز ناچیز فرض شده است باز تغییر پتانسیل نخواهیم داشت. با بازگشت به نقطهٔ a، پتانسیل دوباره برابر با پتانسیل نقطهٔ a می‌شود؛ یعنی می‌توان نوشت :

$$V_a + \mathscr{E} - IR = V_a$$

و با حذف V_a از دو طرف معادلهٔ بالا به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

$$\mathscr{E} - IR = 0$$

این رابطه نشان می‌دهد که جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در مدار ما برابر با صفر است.

توجه کنید که اگر حلقه را درخلاف جهت نشان داده شده در شکل دور می‌زدیم به رابطهٔ $-\mathscr{E}+IR=0$ می‌رسیدیم که همان رابطهٔ بالاست. در حالت کلی جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در هر حلقه صفر است. به این قاعده، **قاعدهٔ حلقه** می‌گویند. قاعدهٔ حلقه یا قانون ولتاژها بیان می‌دارد :

در هر دورزدن کامل حلقه‌ای از مدار، جمع جبری اختلاف پتانسیل‌های اجزای مدار صفر است.

نشان داده می‌شود که قاعدهٔ حلقه چیزی جز پایستگی انرژی نیست (تمرین ۲ــ۴ را ببینید).

اکنون اگر باتری آرمانی مدار شکل ۲ــ۳۱ را با یک باتری واقعی که مقاومت داخلی r دارد جایگزین کنیم (شکل ۲ــ۳۳)، با به‌کاربستن قاعدهٔ حلقه به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

$$\mathscr{E} - Ir - IR = 0$$

همچنین می‌توانیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری را نیز به‌دست آوریم. اگر از نقطهٔ a در جهت جریان I به سمت نقطهٔ b حرکت کنیم، می‌توانیم با درنظر گرفتن اختلاف پتانسیل‌ها رابطهٔ زیر را بنویسیم :

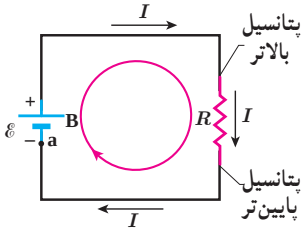
$$V_a + \mathscr{E} - Ir = V_b$$

و یا

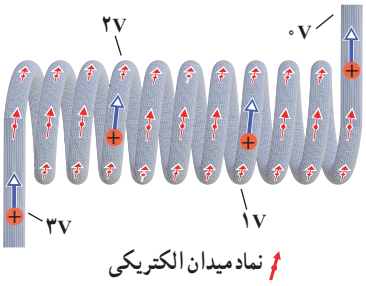
$$V_b - V_a = \mathscr{E} - Ir \qquad (۲ــ۷)$$

در حلّ مسئله‌های مدار تک‌حلقه‌ای همواره دو دستورالعمل سادهٔ زیر را به‌کار می‌بندیم :

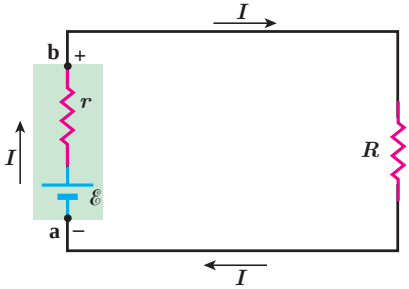
۱ــ هرگاه در مدار در جهت جریان از مقاومت مثلاً R بگذریم، پتانسیل به اندازهٔ IR کاهش می‌یابد و اگر در خلاف جهت جریان حرکت کنیم پتانسیل به همان اندازه افزایش می‌یابد.



شکل ۲ــ۳۱ مداری تک‌حلقه‌ای که در آن مقاومت R به دو سر باتری آرمانی B با نیروی محرکهٔ $\mathscr{E}$ بسته شده است. جریان I در کل مدار یکسان است.



شکل ۲ــ۳۲ با حرکت در جهت جریان در این مقاومت، پتانسیل پیوسته کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۲ــ۳۳ مدار تک‌حلقه‌ای شکل ۲ــ۳۱ که باتری آرمانی آن با یک باتری واقعی جایگزین شده است.

۲ــ هرگاه از پایانهٔ منفی به طرف پایانهٔ مثبت یک منبع نیروی محرّکه حرکت کنیم، پتانسیل به اندازهٔ $\mathscr{E}$ افزایش می‌یابد و اگر در خلاف این جهت (یعنی از پایانهٔ مثبت به طرف پایانهٔ منفی) حرکت کنیم پتانسیل به اندازهٔ $\mathscr{E}$ کاهش می‌یابد. در جدول ۲ــ۴ این دستورالعمل‌ها خلاصه شده‌اند.

جدول ۲ــ۴ جدول قرارداد تعیین علامت اختلاف پتانسیل‌ها در یک مدار تک‌حلقه‌ای، شامل مقاومت و منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی

عنصر مدار	جهت حرکت	تغییر پتانسیل	
مقاومت	در جهت جریان	$-IR$	جهت حرکت، R، I، $\Delta V=-IR$
مقاومت	در خلاف جهت جریان	$+IR$	جهت حرکت، I، R، $\Delta V=+IR$
منبع نیروی محرکه	از پایانهٔ منفی به پایانهٔ مثبت	$+\mathscr{E}$	جهت حرکت، $\Delta V=+\mathscr{E}$
منبع نیروی محرکه	از پایانهٔ مثبت به پایانهٔ منفی	$-\mathscr{E}$	جهت حرکت، $\Delta V=-\mathscr{E}$

گوستاو کیرشهوف (۱۸۸۷ــ ۱۸۲۴م.)

گوستاو رابرت کیرشهوف[1] در غرب آلمان کنونی به دنیا آمد. کیرشهوف سهمی اساسی در درک مدارهای الکتریکی، طیف‌نگاری، ترمودینامیک و تابش اجسام گرم داشته است. درواقع او نخستین کسی بود که واژهٔ جسم سیاه را در سال ۱۸۶۲ به‌کار برد و دو قانون مهم در نظریهٔ مدارهای الکتریکی (قاعده‌های حلقه و انشعاب) و ترمودینامیک به افتخار او نام‌گذاری شده است. کیرشهوف قانون مدارهای الکتریکی خود را در سال ۱۸۴۵ درحالی پی‌ریزی کرد که دانشجوی دانشگاه *آلبرتوس* بود. او قانون تابش گرمایی خود را در سال ۱۸۵۹ پیشنهاد داد و آن را در سال ۱۸۶۱ اثبات کرد. او سپس عازم دانشگاه *هایدلبرگ* شد و در آنجا کارهای بدیعی در طیف‌نگاری به انجام رسانید. کیرشهوف سرانجام در سال ۱۸۸۷ میلادی در سن ۶۳ سالگی در برلین دیده از جهان فرو بست.

مثال ۲ــ۶

در مدار شکل ۲ــ۳۳ فرض کنید $\mathscr{E}=12\,V$، $r=2/0\,\Omega$ و $R=4/0\,\Omega$ باشد.

الف) جریان عبوری از مدار چقدر است؟ ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری را محاسبه کنید.

پاسخ : الف) اگر مدار را در جهت جریان نشان داده شده دور بزنیم براساس آنچه گفته شد، در یک حلقهٔ کامل با استفاده از قاعدهٔ حلقه داریم :

$$\mathscr{E}-Ir-IR=0$$

و در نتیجه

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R+r}=\frac{12\,V}{4/0\,\Omega+2/0\,\Omega}=2/0\,A$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۷ اختلاف پتانسیل دوسر باتری برابر است با

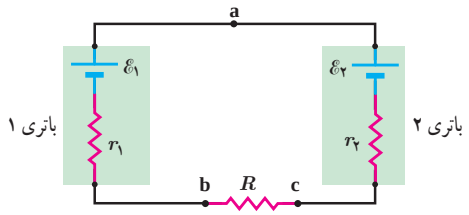
$$V_b-V_a=\mathscr{E}-Ir=12\,V-(2/0\,A)(2/0\,\Omega)=8\,V$$

تمرین ۲ــ۳

مثال بالا را با حرکت در خلاف جهت جریان نشان داده شده، حل و نتیجه را با پاسخ مثال مقایسه کنید.

۱ــ Gustov Robert Kirchhoff

مثال ۲ــ۷



مدار شکل روبه‌رو را درنظر بگیرید. مقادیر نیروهای محرکهٔ الکتریکی و مقاومت‌های مدار عبارت‌اند از :

$\mathscr{E}_1 = ۸/۰\,V$، $\mathscr{E}_2 = ۲/۰\,V$، $r_1 = ۲/۰\,\Omega$، $r_2 = ۱/۵\,\Omega$ و $R = ۸/۵\,\Omega$

الف) جهت جریان عبوری از مدار و مقدار آن را تعیین کنید.

ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری‌های ۱ و ۲ را محاسبه کنید.

پاسخ : الف) با استفاده از دستورالعمل‌های حلّ مدارهای تک حلقه‌ای، مسئله را حل می‌کنیم. گرچه لازم نیست که جهت جریان I را بدانیم، ولی می‌توانیم آن را با مقایسهٔ نیروهای محرکهٔ الکتریکی دو باتری تعیین کنیم؛ چون $\mathscr{E}_1 > \mathscr{E}_2$ است جهت جریان را باتری ۱ تعیین می‌کند. بنابراین، جهت جریان، ساعتگرد است. در نتیجه با حرکت پادساعتگرد از نقطهٔ a داریم :

$$V_a - \mathscr{E}_1 + Ir_1 + IR + Ir_2 + \mathscr{E}_2 = V_a$$

و از آنجا

$$I = \frac{\mathscr{E}_1 - \mathscr{E}_2}{r_1 + R + r_2} = \frac{۸/۰\,V - ۲/۰\,V}{۲/۰\,\Omega + ۸/۵\,\Omega + ۱/۵\,\Omega} = ۰/۵۰\,A$$

ب) اختلاف پتانسیل بین دوسر باتری ۱ را با حرکت از نقطهٔ b به سمت نقطهٔ a به‌دست می‌آوریم :

$$V_b - Ir_1 + \mathscr{E}_1 = V_a$$

در نتیجه

$$V_a - V_b = \mathscr{E}_1 - Ir_1 = ۸/۰\,V - (۰/۵۰\,A)(۲/۰\,\Omega) = ۷/۰\,V$$

که این نتیجه را می‌توانستیم به‌طور مستقیم از رابطهٔ ۲ــ۷ نیز به‌دست آوریم. اما در مورد باتری ۲ که در آن جهت جریان از قطب مثبت وارد و از قطب منفی خارج می‌شود، نمی‌توانیم از این رابطه استفاده کنیم.

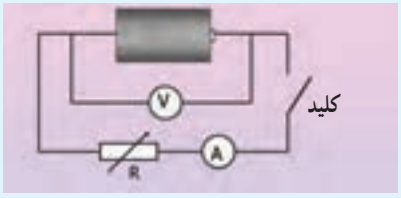
برای محاسبهٔ اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ حتماً باید مسئله را از نو حل کرد. به این منظور، از نقطهٔ c به سمت نقطهٔ a حرکت می‌کنیم :

$$V_c + Ir_2 + \mathscr{E}_2 = V_a$$

و در نتیجه :

$$V_a - V_c = \mathscr{E}_2 + Ir_2 = ۲/۰\,V + (۰/۵۰\,A)(۱/۵\,\Omega) = ۲/۸\,V$$

فعالیت ۲ــ۶ (کار در کلاس)



تفاوت یک باتری نو و فرسوده عمدتاً در مقدار مقاومت داخلی آن است که می‌تواند کمتر از یک اُهم برای باتری نو تا چند هزار اُهم 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 درحالی‌که 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 رابطهٔ ۲ــ۷ 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.

۲ــ۵ توان در مدارهای الکتریکی

اکنون می‌خواهیم رابطه‌هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به‌دست آوریم. جعبهٔ شکل ۲ــ۳۴ 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 $\Delta V = V_b - V_a$ از پایانهٔ a به پایانهٔ b برود. در فصل پیش دیدیم کار نیروی خارجی برای چنین انتقالی برابر با $W = q\Delta V$ است. از طرفی توان الکتریکی، آهنگ انجام این کار است :

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

$$P = I\Delta V \qquad (۸ــ۲)$$

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

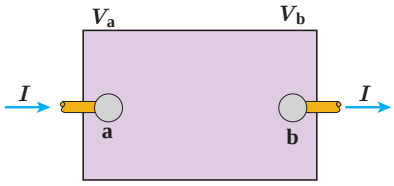
توان الکتریکی مصرفی در یک مقاومت : همان‌طور که گفتیم رابطهٔ ۲ــ۸ برای مقاومت‌های الکتریکی نیز برقرار است. برای یک مقاومت، همان‌طور که پیش از این دیدیم ΔV را با V نشان می‌دهیم. برای محاسبهٔ مقدار توان مصرفی، کافی است در این رابطه به‌جای V از رابطهٔ تعریف مقاومت ($R = V/I$) استفاده کنیم :

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

در نتیجه :

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 \qquad (۹ــ۲)$$

$$P_{\text{مصرفی}} = \frac{V^2}{R} \qquad (۱۰ــ۲)$$



شکل ۲ــ۳۴ یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی بین دوسر آن برقرار است.

$P = I(V_b - V_a)$

این جز، به بقیهٔ مدار انرژی می‌دهد $\Rightarrow P > 0$ اگر

این جز، از بقیهٔ مدار انرژی می‌گیرد $\Rightarrow P < 0$ اگر

مثال ۲ــ۸

وقتی دو سر یک بخاری برقی را به اختلاف پتانسیل ۲۲۰V وصل کنیم، جریان ۱۰/۰A از آن می‌گذرد. الف) توان این بخاری چقدر است؟ ب) اگر این بخاری به مدت ۳/۰۰h در روز کار کند و قیمت برق مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت ۵۰ تومان باشد، هزینهٔ یک ماه مصرف این بخاری چقدر می‌شود؟

پاسخ : الف) بنا به رابطهٔ ۲ــ۸ توان مورد نیاز بخاری چنین می‌شود :

$$P = I\Delta V = (10/0\,\text{A})(220\,\text{V}) = 2/20\times10^3\,\text{W} = 2/20\,\text{kW}$$

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 محاسبهٔ 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 ($3/6\times10^6\,\text{J} = (1000\,\frac{\text{J}}{\text{s}})(3600\,\text{s})$ ، $1\,\text{kWh} = 1000\,\frac{\text{J}}{\text{s}}$).

پس انرژی مصرفی بخاری در یک ماه، برابر است با

$$U = Pt = (۲/۲۰\text{kW})(۳۰ \times ۳/۰۰\text{h}) = ۱۹۸\text{kWh}$$

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

$$\text{بها} = (۱۹۸\text{kWh})(۵۰ \frac{\text{تومان}}{\text{kWh}}) = ۹۹۰۰ \text{تومان}$$

فعالیت ۲ـ۷

قانون ژول بیان می‌دارد گرمای تولید شده توسط جریان Iی عبوری از یک مقاومت R در مدت زمان t برابر با $RI^۲t$ 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. دربارهٔ چگونگی این آزمایش تحقیق کنید.

فعالیت ۲ـ۸

الف) همانند شکل با یک اهم‌متر، مقاومت رشتهٔ سیم داخل لامپ ۱۰۰واتی را اندازه‌گیری کنید. سپس با استفاده از رابطهٔ ۲ـ۱۰ و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. نتیجهٔ محاسبه را با مقدار اندازه‌گیری‌شده مقایسه کنید و نتیجه را پس از گفت‌وگوی گروهی گزارش دهید.

ب) اکنون با استفاده از نتیجهٔ به‌دست آمده، دمای رشتهٔ سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشتهٔ سیم لامپ از جنس تنگستن و ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ آن $۴/۵\times۱۰^{-۳}\,^\circ\text{C}^{-۱}$ است[۱]).

پرسش ۲ـ۲

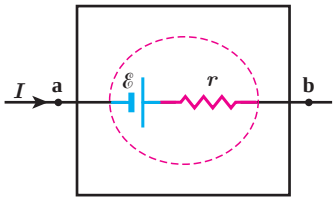
اگر لامپ‌های رشته‌ای (التهابی) را با لامپ‌های LED جایگزین کنیم، درخواهیم یافت که در مصرف انرژی تفاوت چشمگیری حاصل می‌شود. مثلاً درحالی‌که لامپ هالوژن یک کلاه ایمنی چند باتری را در ۳ ساعت مصرف می‌کند، نوع LED همان لامپ، آن باتری‌ها را در ۳۰ ساعت به مصرف می‌رساند. دلیل این اختلاف را بیان کنید.

۱ـ مقاومت ویژهٔ تنگستن در یک گسترهٔ بزرگ دمایی تا نزدیکی نقطهٔ ذوبش در $۳۴۰۰\,^\circ\text{C}$ رفتاری خطی دارد.

توان خروجی یک منبع نیروی محرکهٔ واقعی : در بخش پیش اختلاف پتانسیل ΔVی دو سر یک باتری واقعی را مانند شکل ۲ــ۳۵ به‌صورت $\mathscr{E} - Ir$ به‌دست آوردیم. با قرار دادن این اختلاف پتانسیل در رابطهٔ توان الکتریکی خواهیم داشت :

$$P_{\text{خروجی}} = I\Delta V = I(\mathscr{E} - Ir) = \mathscr{E}I - rI^2$$

$$P_{\text{خروجی}} = \mathscr{E}I - rI^2 \qquad (۲ــ۱۱)$$

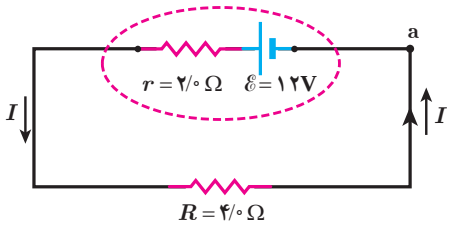


شکل ۲ــ۳۵ توان خروجی از باتریِ شکل، از رابطهٔ $P = (V_b - V_a)I$ به‌دست می‌آید.

که این توان خروجی یک باتری واقعی است. همان‌طور که می‌بینیم این توان به‌اندازهٔ rI^2 (توان مصرفی در مقاومت داخلی باتری) با توان تولیدی باتری ($\mathscr{E}I$) متفاوت است. اگر باتری آرمانی باشد ($r = ۰$) توان خروجی با توان تولیدی آن برابر است.

مثال ۲ــ۹

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



پاسخ : الف) نخست، جریان را با استفاده از قاعدهٔ حلقه به دست می‌آوریم :

$$V_a + \mathscr{E} - Ir - IR = V_a \Rightarrow I = \frac{\mathscr{E}}{R+r} = \frac{۱۲\text{V}}{۴/۰\Omega + ۲/۰\Omega} = ۲/۰\text{A}$$

اکنون توان الکتریکی خروجی از باتری با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ چنین می‌شود :

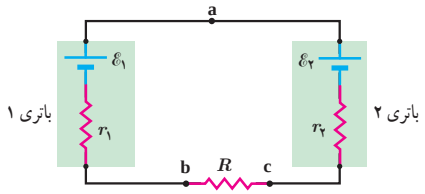
$$P_{\text{خروجی}} = \mathscr{E}I - rI^2 = (۱۲\text{V})(۲/۰\text{A}) - (۲/۰\Omega)(۲/۰\text{A})^2 = ۱۶\text{W}$$

ب) با استفاده از پایستگی انرژی بدیهی است که توان الکتریکی مصرفی در مقاومت ۴ اهمی برابر با توان خروجی باتری، یعنی ۱۶W می‌شود. با این حال، این را می‌توانیم به‌طور مستقیم نیز نشان دهیم :

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (۴/۰\Omega)(۲/۰\text{A})^2 = ۱۶\text{W}$$

مثال ۲ــ۱۰

در مثال ۲ــ۷ توان هریک از اجزای مدار را محاسبه کنید.



پاسخ : توان مصرفی در مقاومت $R = ۸/۵\Omega$ با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۹ چنین می‌شود :

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (۸/۵\Omega)(۰/۵۰\text{A})^2 = ۲/۱\text{W}$$

که در آن از $I = ۰/۵۰\text{A}$ استفاده کرده‌ایم.

توان خروجی باتری ۱ را با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ محاسبه می‌کنیم :

$$P_{\text{خروجی}} = \mathscr{E}_1 I - r_1 I^2 = (۸/۰\text{V})(۰/۵۰\text{A}) - (۲/۰\Omega)(۰/۵۰\text{A})^2 = ۳/۵\text{W}$$

اما توان باتری ۲ از رابطهٔ ۲ــ۱۱ به‌دست نمی‌آید؛ زیرا همان‌طور که دیدیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ از رابطهٔ $V_a - V_c = \mathscr{E}_2 + Ir_2$ به‌دست می‌آید. اما طبق تعریف این کتاب، برای استفاده از رابطهٔ ۲ــ۸ ($P = I\Delta V$)، باید اختلاف پتانسیل $V_c - V_a$ را درنظر بگیریم که $-(\mathscr{E}_2 + Ir_2)$ می‌شود. بنابراین، مقدار (قدرمطلق) توان ورودی به باتری ۲ چنین می‌شود :

$$P_{\text{ورودی}} = |P| = |I\Delta V| = I(\mathscr{E}_2 + Ir_2) = \mathscr{E}_2 I + r_2 I^2$$

$$= (۲/۰\text{V})(۰/۵۰\text{A}) + (۱/۵\Omega)(۰/۵۰\text{A})^2 = ۱/۴\text{W}$$

این‌که باتری ۲ انرژی مصرفی خود را از باتری ۱ تأمین می‌کند، همان اتفاقی است که هنگام اتصال یک باتری به شارژکننده روی می‌دهد. شارژکننده به باتری انرژی الکتریکی می‌دهد. بخشی از این انرژی به انرژی شیمیایی تبدیل می‌شود و بقیهٔ آن در مقاومت درون باتری تلف می‌شود و باتری را گرم می‌کند.

همان‌طور که انتظار داریم این نتیجه همچنین با پایستگی انرژی سازگار است :

توان خروجی باتری ۱ = توان ورودی باتری ۲ + توان مصرفی مقاومت R

$$۳/۵\text{W} = ۱/۴\text{W} + ۲/۱\text{W}$$

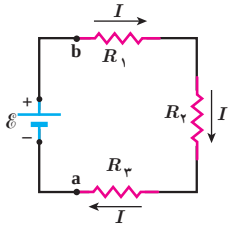
تمرین ۲ــ۴

با توجه به قانون ژول (فعالیت ۲ــ۷) و تعریف نیروی محرکهٔ الکتریکی، برای یک حلقهٔ ساده، شامل یک باتری و یک مقاومت نشان دهید که قاعدهٔ حلقه یا قانون ولتاژها چیزی جز پایستگی انرژی نیست.

۲ــ۶ ترکیب مقاومت‌ها

مقاومت‌ها در انواع وسایل الکتریکی دیده می‌شوند، از ساده‌ترین وسیله‌ها مانند بخاری‌های برقی و موخشک‌کن‌ها گرفته تا وسایل الکتریکی پیچیده‌تری مانند تلویزیون و رایانه‌ها. مدارهای این وسیله‌ها اغلب چندین مقاومت دارند؛ در نتیجه لازم است که ترکیبی از مقاومت‌ها را در نظر بگیریم. رشته‌ای از لامپ‌ها که در چراغانی‌ها به‌کار می‌رود، نمونهٔ ساده‌ای از ترکیب مقاومت‌هاست که در آن هر لامپ به‌عنوان یک مقاومت عمل می‌کند و رشتهٔ لامپ‌ها از دیدگاه تحلیل مدار، ترکیبی است از مقاومت‌ها. ترکیب مقاومت‌ها ممکن است بسیار پیچیده باشد، اما کار کردن با دو نوع از این ترکیب‌ها بسیار ساده است : مقاومت‌های متوالی و مقاومت‌های موازی. وقتی مقاومت‌ها به‌طور متوالی، یا موازی یا ترکیبی از هر دو بسته شده باشند، آنها را می‌توانیم با یک مقاومت معادل جایگزین کنیم. در این بخش به این موضوع می‌پردازیم و اینکه چگونه می‌توان مقاومت معادل ترکیبی از مقاومت‌ها را تعیین کرد.

به هم بستن متوالی مقاومت‌ها : شکل ۲ــ۳۶ سه مقاومت را نشان می‌دهد که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ بسته شده‌اند. توجه کنید واژهٔ «متوالی» ربط چندانی به‌چگونگی رسم مقاومت‌ها ندارد. «متوالی» به معنای بسته شدن مقاومت‌ها یکی پس از دیگری است، به‌طوری که هیچ انشعابی بین آنها وجود نداشته باشد و اختلاف پتانسیل V به دوسر این مجموعه از مقاومت‌ها اعمال شده باشد. در بستن متوالی مقاومت‌ها از همهٔ مقاومت‌ها جریان یکسان I عبور می‌کند. به عبارتی اگر آمپرسنج‌هایی را در نقطه‌های مختلفی از این مدار قرار دهیم، همگی جریان یکسانی را نشان می‌دهند. مقاومت‌هایی را که به‌طور متوالی بسته شده‌اند می‌توان با یک مقاومت معادل R_{eq} جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دو سر مجموعهٔ مقاومت‌ها و همان جریان I است.



شکل ۲ــ۳۶ سه مقاومت که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده‌اند.

با به‌کارگیری قاعدهٔ حلقه، مثلاً با حرکت در جهت جریان I و با شروع از نقطهٔ a و بازگشت دوباره به آن، داریم :

$$V_a + \mathscr{E} - IR_۱ - IR_۲ - IR_۳ = V_a$$

و در نتیجه

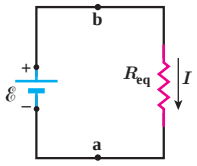
$$\mathscr{E} = IR_۱ + IR_۲ + IR_۳$$

به عبارتی اختلاف پتانسیل کل اعمال شده، برابر با جمع اختلاف پتانسیل‌های دو سر مقاومت‌هاست : $V = \mathscr{E} = V_1 + V_2 + V_3$. اکنون به سراغ محاسبهٔ جریان I می‌رویم. از رابطهٔ بالا داریم :

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_1 + R_2 + R_3}$$

با تعریف مقاومت معادل، به‌صورت

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$



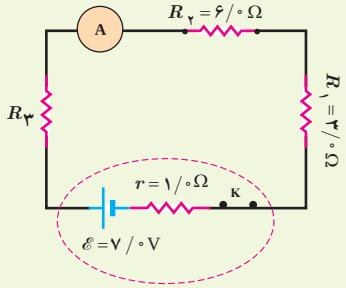
شکل ۲ــ۳۷ مدار معادل شکل ۲ــ۳۶ که در آن سه مقاومت با مقاومت R_{eq} جایگزین شده است.

مدار شکل ۲ــ۳۶ را می‌توان با مدار معادل شکل ۲ــ۳۷ جایگزین کرد. بدیهی است که اگر به‌جای سه مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آنها از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \qquad (۱۲ــ۲)$$

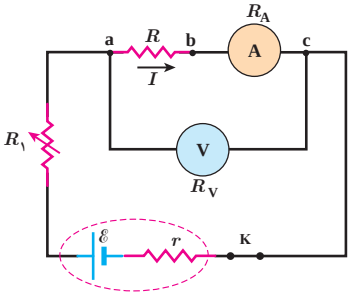
توجه کنید وقتی مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند، مقاومت معادل آنها بزرگ‌تر از مقاومت هریک از آنهاست.

تمرین ۲ــ۵



در شکل روبه‌رو، سه مقاومت به همراه یک آمپرسنج به‌صورت متوالی به یک باتری وصل شده‌اند و مقاومت آمپرسنج صفر است (آمپرسنج آرمانی). اگر مقاومت معادل مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_3 برابر با $13/0\,\Omega$ باشد : الف) مقاومت R_3 چقدر است؟ ب) جریانی را که آمپرسنج نشان می‌دهد به‌دست آورید. پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان‌های مصرفی مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_3 در مدار برابر است.

مثال ۲ــ۱۱



شکل روبه‌رو مداری را برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول R نشان می‌دهد. فرض کنید در این مدار ولت‌سنج $24/0\,V$ و آمپرسنج $0/200\,A$ را نشان دهد. مقاومت ولت‌سنج $R_V = 1/00 \times 10^4\,\Omega$ و مقاومت آمپرسنج $R_A = 1/00\,\Omega$ 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 $24/0\,V$ است. با توجه به اینکه آمپرسنج جریان $0/200\,A$ را نشان می‌دهد و به‌طور متوالی به مقاومت R بسته شده است، جریان عبوری از این دو مقاومت نیز برابر $0/200\,A$ است :

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{24/0\,V}{0/200\,A} = 120\,\Omega$$

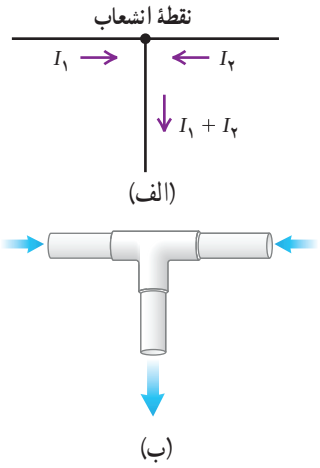
با توجه به اینکه $R_{eq} = R + R_A$ و $R_A = 1/00\,\Omega$ است مقاومت مجهول برابر با $R = 119\,\Omega$ می‌شود.

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.

قاعدهٔ انشعاب و به‌هم بستن موازی مقاومت‌ها : یک نقطهٔ انشعاب (گره) در مدار، نقطه‌ای است که در آن سه یا چند سیم به یکدیگر متصل شده‌اند. هر اتصالی بین دو نقطهٔ انشعاب در مدار، شاخه نامیده می‌شود. یک شاخه می‌تواند شامل هر تعدادی از اجزای مختلف مدار و سیم‌های بین آنها باشد. از هر شاخه یک جریان می‌گذرد. در هر نقطهٔ انشعاب از مدار قاعده‌ای برای جریان‌ها برقرار است که به صورت زیر بیان شده است و به آن قاعدهٔ انشعاب گفته می شود :

مجموع جریان‌هایی که به هر نقطهٔ انشعاب وارد می‌شود برابر با مجموع جریان‌هایی است که از آن نقطهٔ انشعاب خارج می‌شود.

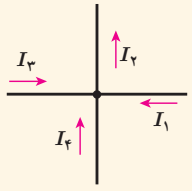
قاعدهٔ انشعاب در واقع مبتنی بر پایستگی بار الکتریکی است و اینکه هیچ باری نمی‌تواند در یک نقطهٔ انشعاب جمع گردد. بنابراین، مجموع بار وارد شده به هر نقطهٔ انشعاب در واحد زمان باید برابر با مجموع بار خارج شده از آن نقطه در واحد زمان باشد (شکل ۲ــ۳۸ الف). همان‌طور که می‌دانیم بار عبوری در واحد زمان همان جریان است. بنابراین، پایستگی بار، به قاعدهٔ انشعاب جریان می‌انجامد. این مشابه یک اتصال سه‌راهی لوله‌های آب است (شکل ۲ــ۳۸ ب)؛ اگر یک لیتر آب در هر دقیقه از سمت چپ، و یک لیتر آب در هر دقیقه از سمت راست وارد اتصال شود، واضح است که آب خارج شده در هر دقیقه برابر با ۲ لیتر است.



شکل ۲ــ۳۸ الف) طرحی از قاعدهٔ انشعاب. ب) مشابهت‌سازی اتصال لولهٔ آب برای قاعدهٔ انشعاب

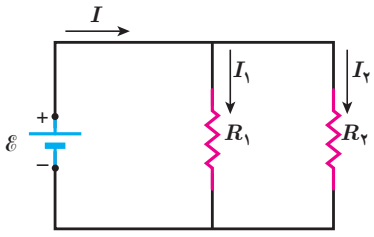
پرسش ۲ــ۳

برای نقطهٔ انشعاب نشان داده شده در شکل، رابطهٔ بین جریان‌ها را بنویسید.



مثال ۲ــ۱۲ *

در شکل روبه‌رو، یک باتری آرمانی اختلاف پتانسیل $\mathscr{E}=12\,V$ را به دو سر مقاومت‌های $R_1 = 40\,\Omega$ و $R_2 = 60\,\Omega$ 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 :

$$V_1 = \mathscr{E} = I_1 R_1 \Rightarrow I_1 = \frac{\mathscr{E}}{R_1} = \frac{12\,V}{40\,\Omega} = 0/3\,A$$

$$V_2 = \mathscr{E} = I_2 R_2 \Rightarrow I_2 = \frac{\mathscr{E}}{R_2} = \frac{12\,V}{60\,\Omega} = 0/2\,A$$

ب) اکنون با استفاده از قاعدهٔ انشعاب، جریان عبوری از باتری را می‌یابیم :

$$I = I_1 + I_2 = 0/3\,A + 0/2\,A = 0/5\,A$$

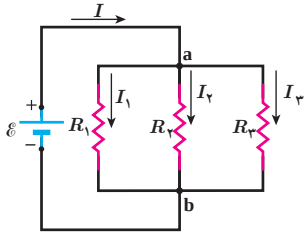
* حل مدارهای چندحلقه‌ای که در حلقه‌های مختلف از باتری استفاده می‌شود و همچنین سایر به هم بستن‌های مقاومت‌ها به‌غیر از به هم بستن متوالی و موازی جزء برنامه درسی این کتاب نبوده و نباید در آموزش و ارزشیابی‌ها مدّنظر قرار گیرد.

فعالیت ۲ــ۹

مداری مانند مدار مثال ۲ــ۱۲ ببندید و در هر شاخهٔ آن، یک آمپرسنج قرار دهید. با خواندن آمپرسنج‌ها، رابطهٔ بین جریان‌ها را بررسی کنید.

بستن مقاومت‌ها به‌صورت موازی : شکل ۲ــ۳۹ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که سه مقاومت به‌صورت موازی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ بسته شده‌اند. توجه کنید واژهٔ «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 :

$$V = \mathscr{E} = V_۱ = V_۲ = V_۳$$



شکل ۲ــ۳۹ مداری شامل سه مقاومت که به‌صورت موازی به نقطه‌های a و b بسته شده‌اند.

مجموعهٔ 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 از قاعدهٔ انشعاب استفاده می‌کنیم. اگر این قاعده را برای نقطهٔ a شکل ۲ــ۳۹ به کار ببریم خواهیم داشت :

$$I = I_۱ + I_۲ + I_۳$$

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

$$I_۱ = \frac{V}{R_۱} \ , \ I_۲ = \frac{V}{R_۲} \ , \ I_۳ = \frac{V}{R_۳}$$

با قرار دادن این جریان‌ها در معادلهٔ حاصل از قاعدهٔ انشعاب خواهیم داشت :

$$I = V(\frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳})$$

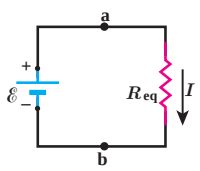
اگر ترکیب موازی مقاومت‌ها را با مقاومت R_{eq} جایگزین کنیم $I = \frac{V}{R_{eq}}$ می‌شود و از آنجا خواهیم داشت :

$$\frac{۱}{R_{eq}} = \frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳}$$

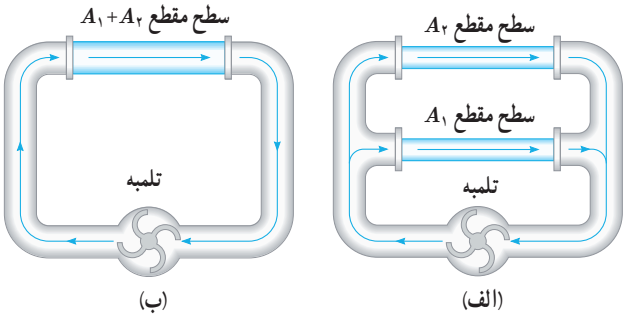
در حالت کلی برای n مقاومت موازی به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

$$\frac{۱}{R_{eq}} = \frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳} + \cdots + \frac{۱}{R_n} \qquad (۱۳ــ۲)$$

مدار شکل ۲ــ۳۹ به مدار معادل شکل ۲ــ۴۰ تبدیل می‌شود. توجه کنید هرگاه چند مقاومت به‌صورت موازی به هم بسته شوند، مقاومت معادل آنها کوچک‌تر از هریک از مقاومت‌های موجود در آن ترکیب است. برای اینکه به درکی از این نتیجه برسیم، دوباره مشابهت‌سازی با لوله‌های آب می‌تواند راه‌گشا باشد. شکل ۲ــ۴۱ــ الف دو لولهٔ هم‌طول با سطح مقطع‌های $A_۱$ و $A_۲$ را نشان می‌دهد



شکل ۲ــ۴۰ مدار معادل شکل ۲ــ۳۹ که در آن مقاومت معادل، R_{eq} جایگزین مقاومت‌های $R_۱$، $R_۲$ و $R_۳$ شده است.

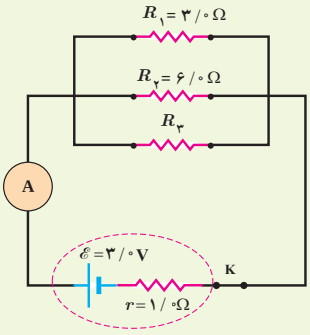


شکل ۲ــ۴۱ (الف) دو لولهٔ هم‌طول با سطح مقطع‌های $A_۱$ و $A_۲$ به طور موازی به تلمبهٔ آبی متصل شده‌اند. (ب) دو لولهٔ بخش الف معادل با تک‌لوله‌ای با همان طول و سطح مقطع مجموع آنهاست.

که به‌طور موازی به یک تلمبهٔ آب متصل شده‌اند. در شکل ۲ــ۴۱ــ 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 لولهٔ عریض‌تر در مقایسه با هر یک از لوله‌ها عبور می‌دهد. به عبارتی، لولهٔ عریض‌تر مقاومت کمتری نسبت به شارش آب در مقایسه با هر یک از دو لولهٔ باریک‌تر دارد.

تمرین ۲ــ۶

در شکل روبه‌رو سه مقاومت موازی به همراه یک آمپرسنج آرمانی به دو سر یک باتری وصل شده‌اند. اگر مقاومت معادل این ترکیب ۱/۶Ω باشد، الف) مقاومت $R_۳$ چقدر است؟ ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد را به‌دست آورید. پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان‌های مصرفی مقاومت‌های $R_۱$ ، $R_۲$ و $R_۳$ برابر است.

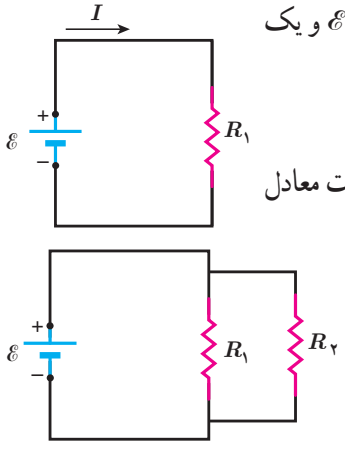


مثال ۲ــ۱۳

مدار سادهٔ شکل روبه‌رو را که شامل یک منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی آرمانی با $\mathscr{E}=۱۵۰V$ و یک مقاومت با $R_۱=۱۰۰k\Omega$ است، در نظر بگیرید.

الف) جریان عبوری از منبع را به‌دست آورید.

ب) اگر مقاومت $R_۲=۱۰/۰M\Omega$ به‌طور موازی به دو سر مقاومت $R_۱$ متصل شود، مقاومت معادل مدار چقدر می‌شود و چه جریانی از منبع می‌گذرد؟



پاسخ : الف) با استفاده از تعریف مقاومت داریم :

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R_۱}=\frac{۱۵۰V}{۱۰۰\times۱۰^{۳}\Omega}=۱/۵۰\times۱۰^{-۳}A=۱/۵۰mA$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۳ داریم :

$$\frac{۱}{R_{eq}}=\frac{۱}{R_۱}+\frac{۱}{R_۲}$$

در نتیجه

$$R_{eq}=\frac{R_۱R_۲}{R_۱+R_۲}=\frac{(۱۰۰\times۱۰^{۳}\Omega)(۱۰/۰\times۱۰^{۶}\Omega)}{۱۰۰\times۱۰^{۳}\Omega+۱۰/۰\times۱۰^{۶}\Omega}=۹۹/۰k\Omega$$

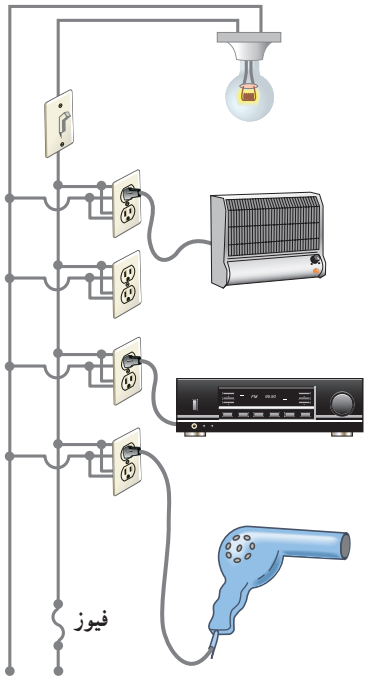
و بنابراین، جریان عبوری از منبع برابر است با

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R_{eq}}=\frac{۱۵۰V}{۹/۹۰\times۱۰^{۴}\Omega}=۱/۵۲\times۱۰^{-۳}A=۱/۵۲mA$$

همان‌طور که می‌بینید، مقاومت معادل در این حالت که یکی از مقاومت‌ها خیلی بزرگ‌تر از مقاومت دیگر است ($R_۲>>R_۱$) تقریباً برابر با مقاومت کوچک‌تر ($R_۱$) است.

مثال ۲ـ ۱۴

یک لامپ رشته‌ای ۱۰۰W، یک بخاری برقی ۲۰۰۰W، یک دستگاه پخش‌صوت ۲۰۰W، و یک سشوار (موخشک‌کن) ۲۲۰۰W مطابق شکل به پریزهای یک مدار سیم‌کشی خانگی ۲۲۰V وصل شده است.



الف) اگر فیوز شکل ۱۵A باشد، یعنی حداکثر بتواند جریان ۱۵A 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) همان‌طور که در شکل می‌بینیم در سیم‌کشی منازل همهٔ مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر با مجموع جریان‌های عبوری از هریک از مصرف‌کننده‌هاست. با استفاده از رابطهٔ $I = P/V$ جریان عبوری از هریک از این چهار مصرف‌کننده را به‌دست می‌آوریم. بنابراین، به ترتیب داریم :

$$I_{\text{لامپ}} = \frac{P_{\text{لامپ}}}{V} = \frac{۱۰۰\text{W}}{۲۲۰\text{V}} = ۰/۴۵۵\,\text{A}$$

$$I_{\text{بخاری}} = \frac{P_{\text{بخاری}}}{V} = \frac{۲۰۰۰\text{W}}{۲۲۰\text{V}} = ۹/۰۹\,\text{A}$$

$$I_{\text{پخش}} = \frac{P_{\text{پخش}}}{V} = \frac{۲۰۰\text{W}}{۲۲۰\text{V}} = ۰/۹۰۹\,\text{A}$$

$$I_{\text{سشوار}} = \frac{P_{\text{سشوار}}}{V} = \frac{۲۲۰۰\text{W}}{۲۲۰\text{V}} = ۱۰/۰\,\text{A}$$

بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر است با :

$$I_{\text{فیوز}} = I_{\text{کل}} = I_{\text{لامپ}} + I_{\text{بخاری}} + I_{\text{پخش}} + I_{\text{سشوار}}$$
$$= ۰/۴۵۵\text{A} + ۹/۰۹\text{A} + ۰/۹۰۹\text{A} + ۱۰/۰\text{A} = ۲۰/۵\text{A}$$

چون فیوز ۱۵A است. بنابراین، فیوز خواهد پرید. در اغلب منازل چند مدار سیم‌کشی جداگانه داریم که هریک فیوز مربوط به خود را دارد. برای اینکه بتوانیم به‌طور هم‌زمان از چند وسیلهٔ برقی استفاده کنیم، باید وسایل برقی را به‌طور هم‌زمان به یک مدار وصل نکنیم و مدارهای دیگر را نیز به‌کار گیریم.

ب) دیدیم که همهٔ مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، مقاومت معادل مصرف‌کننده‌های شکل از رابطهٔ ۲ـ۱۳ به‌دست می‌آید. بنابراین، برای محاسبهٔ مقاومت لازم است مقاومت هریک از وسیله‌ها را به‌طور جداگانه محاسبه کنیم. مقاومت هر مصرف‌کننده با استفاده از رابطهٔ $P = \frac{V^۲}{R}$ به‌دست می‌آید. بنابراین، به ترتیب داریم :

$$R_{\text{لامپ}} = \frac{V^۲}{P_{\text{لامپ}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۱۰۰\text{W}} = ۴۸۴\,\Omega$$

$$R_{\text{بخاری}} = \frac{V^۲}{P_{\text{بخاری}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۲۰۰۰\text{W}} = ۲۴/۲\,\Omega$$

$$R_{\text{پخش}} = \frac{V^۲}{P_{\text{پخش}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۲۰۰\text{W}} = ۲۴۲\,\Omega$$

$$R_{\text{سشوار}} = \frac{V^۲}{P_{\text{سشوار}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۲۲۰۰\text{W}} = ۲۲/۰\,\Omega$$

پس مقاومت معادل چنین محاسبه می‌شود :

$$\frac{۱}{R_{eq}}=\frac{۱}{R_{\text{لامپ}}}+\frac{۱}{R_{\text{بخاری}}}+\frac{۱}{R_{\text{پخش}}}+\frac{۱}{R_{\text{سشوار}}}=$$

$$=\frac{۱}{۴۸۴\,\Omega}+\frac{۱}{۲۴/۲\,\Omega}+\frac{۱}{۲۴۲\,\Omega}+\frac{۱}{۲۲/۰\,\Omega}=۰/۰۹۳۰\,\Omega^{-۱}$$

و در نتیجه $R_{eq}=۱۰/۷۵\,\Omega\approx ۱۰/۸\,\Omega$. بنابراین، توان مصرفی مقاومت معادل چنین می‌شود :

$$P_{R_{eq}}=\frac{V^{۲}}{R_{eq}}=\frac{(۲۲۰\text{V})^{۲}}{۱۰/۷۵\,\Omega}=۴/۵۰\,\text{kW}$$

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

مجموع توان مصرف‌کننده‌ها برابر است با :

$$P_{\text{کل}}=P_{\text{لامپ}}+P_{\text{بخاری}}+P_{\text{پخش}}+P_{\text{سشوار}}=۱۰۰\text{W}+۲۰۰۰\text{W}+۲۰۰\text{W}+۲۲۰۰\text{W}=۴۵۰۰\text{W}$$

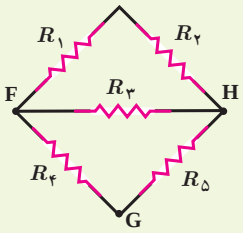
که همان توان مصرفی مقاومت معادل است.

تمرین ۲ــ۷

شکل روبه‌رو پنج مقاومت ۸/۰۰ اهمی را نشان می‌دهد.

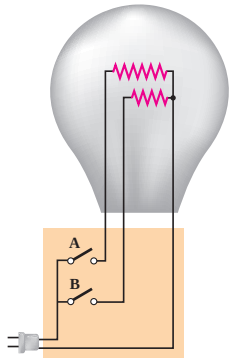
الف) مقاومت معادل بین نقطه‌های F و H چقدر است؟

ب) مقاومت معادل بین نقطه‌های F و G چقدر است؟



مثال ۲ــ۱۵

یک لامپ سه‌راههٔ ۲۲۰V که دو رشته دارد مطابق شکل برای کار در سه توان مختلف ساخته شده است. کمترین و بیشترین توان مصرفی این لامپ به ترتیب ۵۰/۰W و ۱۵۰W است. مقاومت هریک از رشته‌ها را بیابید.



پاسخ : همان‌طور که می‌دانیم توان الکتریکی مصرفی از رابطهٔ $P=V^{۲}/R$ به‌دست می‌آید. بنابراین، بیشترین توان مربوط به کمترین مقاومت و کمترین توان مربوط به بیشترین مقاومت است. در بستن موازی مقاومت‌ها دیدیم مقاومت معادل کوچک‌تر از هریک از مقاومت‌هاست. بنابراین، بیشترین توان مربوط به وقتی است که کلیدهای a و b هردو بسته‌اند؛ یعنی :

$$\frac{۱}{R_{eq}}=\frac{۱}{R_{۱}}+\frac{۱}{R_{۲}}$$

که در آن $R_{۱}$ و $R_{۲}$ مقاومت‌های دو رشتهٔ لامپ‌اند. بنابراین، برای مقاومت معادل داریم :

$$R_{eq}=R_{min}=\frac{V^{۲}}{P_{max}}=\frac{(۲۲۰\text{V})^{۲}}{۱۵۰\text{W}}=۳۲۳\Omega$$

از طرفی کمترین توان مربوط به وقتی است که کلید مربوط به رشتهٔ با مقاومت بیشتر بسته شده است. اگر این مقاومت را با $R_۱$ نمایش دهیم، داریم :

$$R_۱ = R_{max} = \frac{V^۲}{P_{min}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۵۰/۰\text{W}} = ۹۶۸\Omega$$

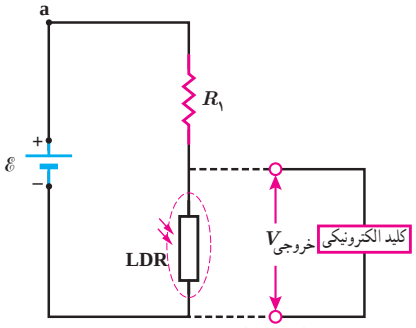
بنابراین، مقاومت مجهول $R_۲$ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\frac{۱}{R_۲} = \frac{۱}{R_{eq}} - \frac{۱}{R_۱} = \frac{۱}{۳۲۳\Omega} - \frac{۱}{۹۶۸\Omega} = ۲/۰۶\times۱۰^{-۳}\Omega^{-۱}$$

در نتیجه

$$R_۲ = \frac{۱}{۲/۰۶\times۱۰^{-۳}\Omega^{-۱}} = ۴۸۵\Omega$$

مثال ۲ـ۱۶



در بسیاری از مدارهای الکتریکی از تغییر مقاومت برای تقسیم ولتاژ استفاده می‌کنند. از این ویژگی در برخی از تجهیزات الکتریکی به‌عنوان کلید الکترونیکی بهره‌برداری می‌شود. آژیر خطر، کلید خودکار روشن شدن چراغ‌ها و ... مثال‌هایی از این دست هستند. شکل روبه‌رو چنین مداری را که در چراغ روشنایی خودروها به‌کار می‌رود، نشان می‌دهد. در این مدار از دو مقاومت $R_۱$ و مقاومت متغیر LDR استفاده شده است که به‌طور متوالی به هم وصل‌اند. همان‌طور که می‌دانیم وقتی تابش نور به LDR قطع می‌شود، مقاومت آن افزایش می‌یابد. در نتیجه ولتاژ خروجی ($V_{خروجی}$) زیاد می‌شود. این افزایش ولتاژ سبب فعال شدن کلید الکترونیکی می‌شود که به چراغ وصل است و بدین ترتیب چراغ روشن می‌شود. بنابراین تا زمانی که نور به اندازه کافی بتابد، کلید فعال نمی‌شود. فرض کنید در شکل بالا، منبع نیروی محرکه، آرمانی و ولتاژ آن ۱۲/۰V باشد و ولتاژ موردنیاز برای فعال شدن کلید الکترونیکی ۵/۰۰V باشد. وقتی مقاومت LDR به ۲۰۰kΩ می‌رسد، کلید الکترونیکی فعال می‌شود. مقاومت $R_۱$ چقدر است؟ (مقاومت کلید الکترونیکی آنقدر زیاد است که جریان قابل ملاحظه‌ای از آن عبور نمی‌کند. بنابراین می‌توانیم $R_۱$ و LDR را متوالی در نظر بگیریم.)

پاسخ : با استفاده از قاعدهٔ حلقه داریم :

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_۱ + R_{LDR}}$$

از طرفی بدیهی است

$$V_{خروجی} = R_{LDR} I$$

از ترکیب دو معادله بالا خواهیم داشت :

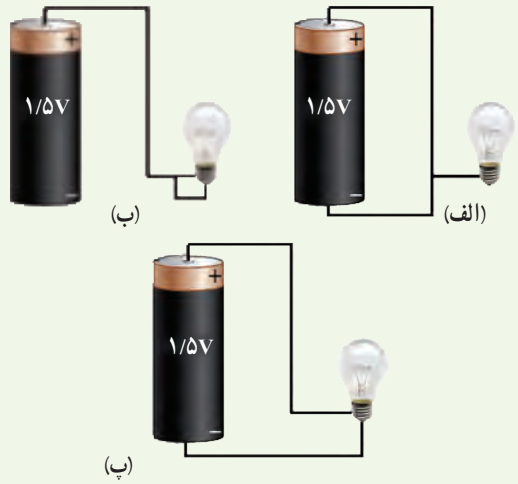
$$V_{خروجی} = R_{LDR}\frac{\mathcal{E}}{R_۱ + R_{LDR}}$$

و از آنجا برای $R_۱$ چنین به‌دست می‌آوریم :

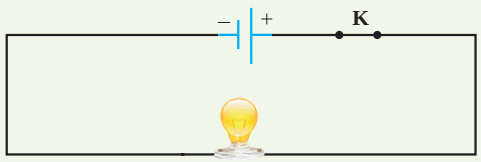
$$R_۱ = \frac{R_{LDR}(\mathcal{E} - V_{خروجی})}{V_{خروجی}} = \frac{(۲۰۰\text{k}\Omega)(۱۲/۰\text{V} - ۵/۰۰\text{V})}{۵/۰۰\text{V}} = ۲۸۰\text{k}\Omega$$

۲ـ۱ و ۲ـ۲ جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی و قانون اهم

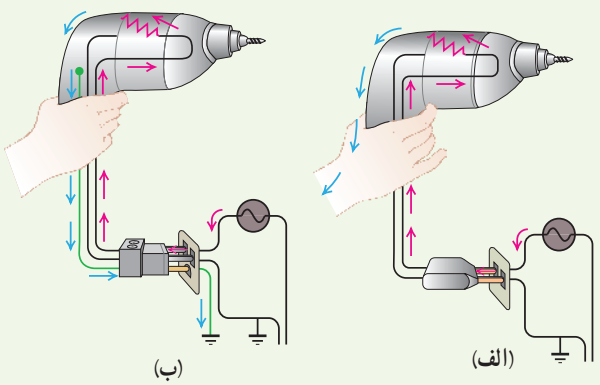
۱ در کدام یک از شکل‌های زیر، لامپ روشن می‌شود؟



۲ در مدار شکل زیر اختلاف پتانسیل دو سر لامپ ۴/۰V و مقاومت آن ۵/۰Ω است. در مدت ۵ دقیقه چه تعداد الکترون از لامپ می‌گذرد؟



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



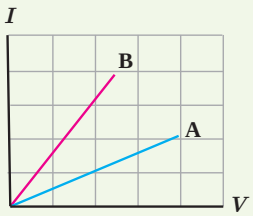
۴ آذرخش مثالی جالب از جریان الکتریکی در پدیده‌های طبیعی است. در یک آذرخش نوعی $۱/۰\times۱۰^{۹}\,J$ انرژی تحت اختلاف‌پتانسیل $۵/۰\times۱۰^{۷}\,V$ در بازهٔ زمانی ۰/۲۰s آزاد می‌شود. با استفاده از این اطلاعات الف) مقدار بار کل منتقل‌شده بین ابر و زمین، ب) جریان متوسط در یک یورش آذرخش و پ) توان الکتریکی آزادشده در ۰/۲۰s را به‌دست آورید.

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

شمارهٔ 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 کدام‌یک بیشتر است؟ چرا؟



۲ـ۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

۷ دو رسانای فلزی از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توپری به‌قطر ۱/۰ mm است. رسانای B لوله‌ای توخالی به شعاع خارجی ۲/۰ mm و شعاع داخلی ۱/۰ mm است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟

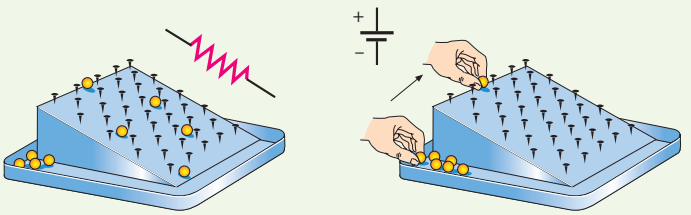
۸ در ماشین‌های چمن‌زنی برقی برای مسافت‌های حداکثر تا ۳۵ m از سیم‌های مسی نمرهٔ ۲۰ (قطر ۰/۰۸ cm) و برای مسافت‌های طولانی‌تر از سیم‌های ضخیم‌تر نمرهٔ ۱۶ (قطر ۰/۱۳cm) استفاده می‌کنند تا بدین ترتیب مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. الف) مقاومت یک

سیم ۳۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ ب) مقاومت یک سیم ۷۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ (دمای سیم‌ها را $20^{\circ}C$ درنظر بگیرید.)

۹ مقاومت رشتهٔ درونی یک برشته‌کن که از جنس نیکروم است، در حالت روشن (دمای $1200^{\circ}C$) برابر 44Ω است. مقاومت این رشته در دمای $20^{\circ}C$ چقدر است؟ (از تغییر طول و قطر رشته در اثر تغییر دما چشم‌پوشی شود).

۲ـ۴ نیروی محرکهٔ الکتریکی و مدارها

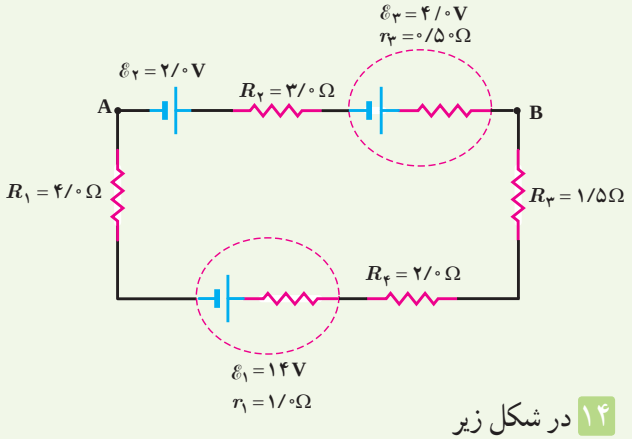
۱۰ شکل زیر یک مشابهت‌سازی مکانیکی برای درک مقاومت و نیروی محرکهٔ الکتریکی را نشان می‌دهد که در آن بر سطح شیب‌داری میخ‌هایی تعبیه شده و تیله‌ها از ارتفاع بالای سطح شیب‌دار رها می‌شوند و سپس دوباره به بالای سطح شیب‌دار بازگردانده می‌شوند. این مشابهت‌سازی مکانیکی را توجیه کنید.



۱۱ اختلاف پتانسیل دو سر باتری خودروهای سواری برابر ۱۲ولت است.اگر هشت باتری قلمی ۱/۵ ولتی را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعهٔ آنها نیز برابر ۱۲ ولت می شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از هشت باتری قلمی استفاده نمی‌شود.

۱۲ یک باتری را در نظر بگیرید که وقتی به مدار بسته نیست اختلاف پتانسیل دو سرش برابر $12/0V$ است. وقتی یک مقاومت $10/0\Omega$ به این باتری بسته شود، اختلاف پتانسیل دو سر باتری به $10/9V$ کاهش می‌یابد. مقاومت داخلی باتری چقدر است؟

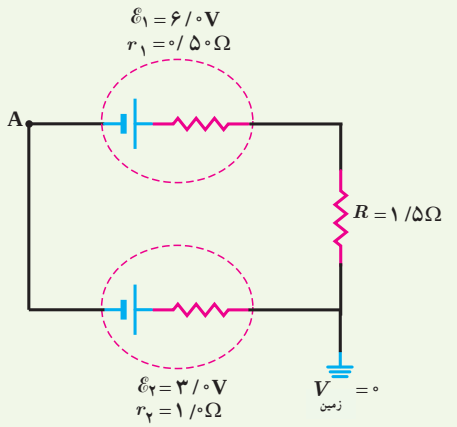
۱۳ در مدار شکل زیر جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ A و B ($V_B - V_A$) را محاسبه کنید.



۱۴ در شکل زیر

الف) اختلاف پتانسیل دو سر منبع‌های نیروی محرکه را به‌دست آورید.

ب) پتانسیل نقطهٔ A را تعیین کنید.



۲ـ۵ توان در مدارهای الکتریکی

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

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

۲۲۰V، ۸۵۰W، اتوی برقی

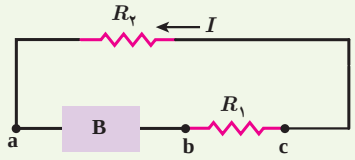
۲۲۰V، ۲۴۰۰W، کتری برقی

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؟

۱۷ لامپ یک چراغ قوهٔ معمولی با ولتاژ ۲/۹V کار می‌کند و در این حالت توان مصرفی آن ۰/۸۷W می‌شود. اگر مقاومت رشتهٔ تنگستنی این لامپ در دمای اتاق (۲۰°C) برابر ۱/۱Ω باشد، دمای این رشته وقتی که لامپ روشن است، چقدر می‌شود؟

۱۸ شکل زیر جریان I را در یک مدار تک‌حلقه‌ای با باتری B و مقاومت‌های R_1 و R_2 (و سیم‌هایی با مقاومت ناچیز) نشان می‌دهد. الف) علامت پایانه‌های باتری B را مشخص کنید. در نقاط a ، b و c، ب) بزرگی جریان، پ) پتانسیل الکتریکی و ت) انرژی پتانسیل الکتریکی حامل‌های بار مثبت را به‌گونه‌ای مرتب کنید که بیشترین مقدار در ابتدا باشد.



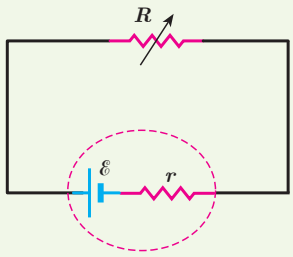
۱۹ تلویزیون و یکی از لامپ‌های خانهٔ خود را درنظر بگیرید و فرض کنید که هرکدام روزی ۸ ساعت با اختلاف پتانسیل ۲۲۰ولت روشن باشد.

الف) انرژی الکتریکی مصرفی هرکدام در یک دورهٔ 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 ۵۰تومان در یک دورهٔ 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؟

۲۰ در شکل زیر، الف) نیروی محرکهٔ الکتریکی و مقاومت



داخلی منبع را که توان خروجی آن به ازای $I_1 = 5/00\,A$ برابر $9/50\,W$ و به ازای $I_2 = 7/00\,A$ برابر $12/6\,W$ است، محاسبه کنید.

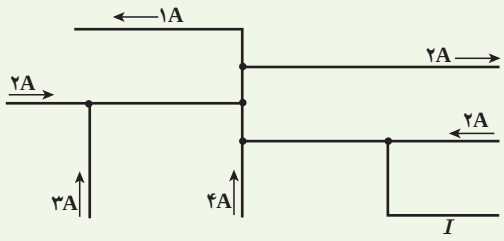
ب) نمودار اختلاف پتانسیل دو سر باتری برحسب جریان گذرنده از آن را رسم کنید.

۲ــ۶ ترکیب مقاومت‌ها

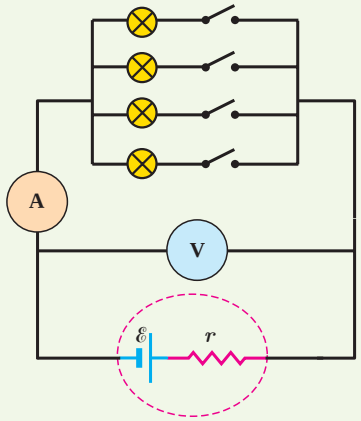
۲۱ لامپ‌های یک درخت زینتی، به طورمتوالی متصل شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتفاقی می‌افتد؟ به‌نظر شما چرا همهٔ چراغ‌های خودرو (چراغ‌های جلو، عقب و ...) به‌طور موازی بسته می‌شوند؟

۲۲ مقاومت یک آمپرسنج برای اندازه‌گیری جریان در یک مدار باید چگونه باشد تا جریان اندازه‌گیری‌شده توسط آمپرسنج با جریان قبل از قرار دادن آمپرسنج، نزدیک به هم باشد؟

۲۳ شکل زیر بخشی از یک مدار را نشان می‌دهد. بزرگی و جهت جریان I در سیم پایین سمت راست چیست؟

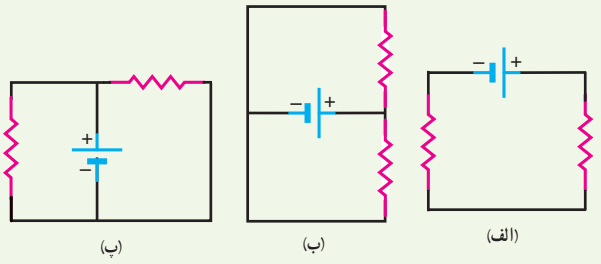


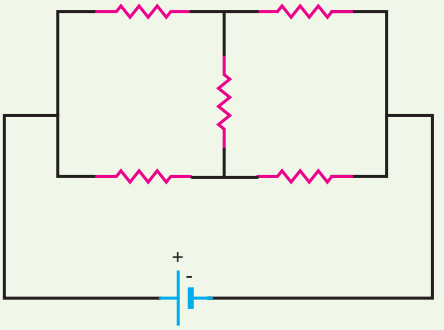
۲۴ در شکل زیر، تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده‌اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، عددهایی که آمپرسنج و ولت سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟



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

۲۶ در شکل‌های زیر، آیا مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند یا موازی و یا هیچ کدام؟

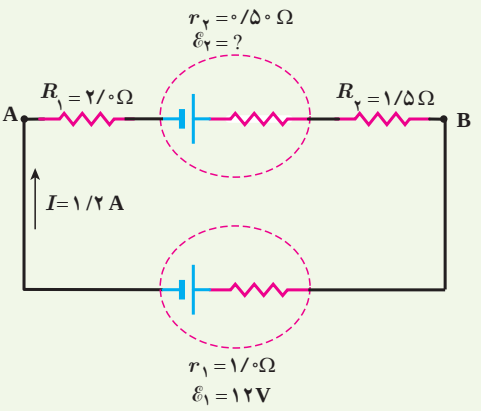




۲۷ در مدار شکل زیر جریان در جهت نشان‌داده شده $1/2\,A$ است.

الف) نیروی محرکهٔ $\mathscr{E}_2$ و $V_A - V_B$ چقدر است؟

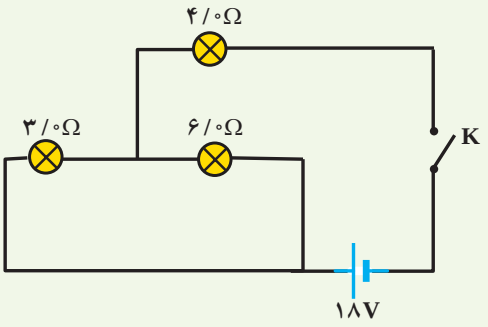
ب) انرژی مصرف‌شده در R_1 و R_2 در مدت ۵/۰ ثانیه چقدر است؟



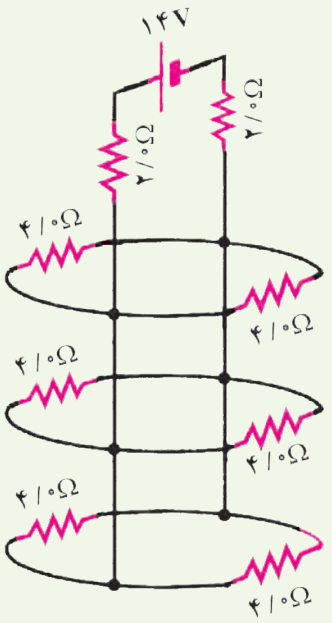
۲۸ سه مقاومت مشابه ۱۲ اُهمی را یک‌بار به‌طور متوالی و بار دیگر به‌طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۲۹ دو مقاومت موازی ۶/۰ اُهمی و ۱۲ اُهمی به‌طور متوالی به یک مقاومت ۲/۰ اُهمی وصل شده است. اکنون، مجموعهٔ مقاومت‌ها را به دو سر یک باتری آرمانی ۳۶ ولتی می‌بندیم. توان مصرفی در مقاومت ۶/۰ اُهمی را محاسبه کنید.

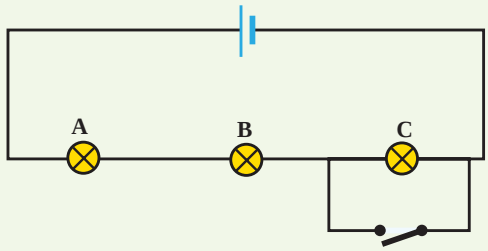
۳۰ در شکل زیر، وقتی کلید بسته شود چه جریانی از هر لامپ رشته‌ای می‌گذرد؟



۳۱ جریانی که از منبع نیروی محرکهٔ آرمانی و هر یک از مقاومت‌های شکل روبه‌رو می‌گذرد، چقدر است؟



۳۲ لامپ‌های A، B و C در شکل زیر همگی یکسان‌اند. با بستن کلید، کدام‌یک از تغییرات زیر در اختلاف‌پتانسیل رخ می‌دهد؟ (ممکن است بیش از یک پاسخ درست باشد).



الف) اختلاف‌پتانسیل دو سر A و B تغییر نمی‌کند.

ب) اختلاف‌پتانسیل دو سر C به اندازهٔ ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

پ) هریک از اختلاف‌پتانسیل‌های دو سر A و B به‌اندازهٔ ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

ت) اختلاف‌پتانسیل دو سر C به صفر کاهش می‌یابد.

۳۳ درسیم‌کشی منازل، همهٔ مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. یک اتوی ۱۱۰۰W، یک نان برشته‌کن (توستر) ۱۸۰۰W، پنج لامپ رشته‌ای ۱۰۰W و یک بخاری ۱۱۰۰W به پریزهای یک مدار سیم‌کشی خانگی ۲۲۰V که حداکثر می‌تواند جریان ۱۵A را تحمل کند وصل شده‌اند. آیا این ترکیب مصرف‌کننده‌ها باعث پریدن فیوز می‌شود یا خیر؟