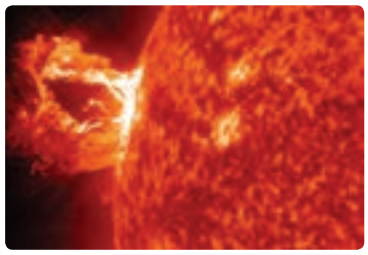
۲
جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

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.

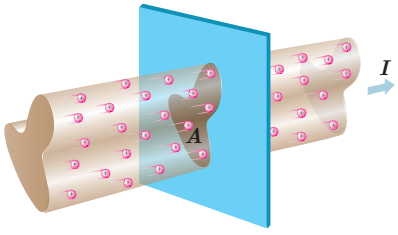
در فصل پیش با بار و میدان الکتریکی و همچنین اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در میدان الکتریکی آشنا شدیم و به بررسی بر هم‌کنش بارهای الکتریکی در حالت سکون پرداختیم. در این فصل به بررسی و مطالعهٔ جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم می‌پردازیم.

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.



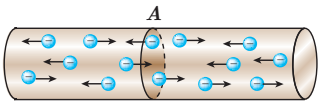
شکل ۲ــ۲ فوران عظیمی از الکترون‌ها و یون‌ها که از سطح خورشید پرتاب می‌شوند.

شکل ۲ــ۱ انرژی از باتری به صفحهٔ نمایشگر تلفن، توسط بارهایی که از سیم‌های رسانا می‌گذرند، منتقل می‌شود.



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

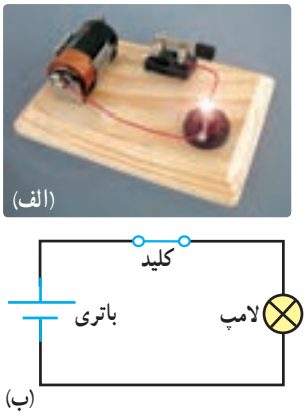
اکنون با این پرسش شروع می‌کنیم که چرا هر مجموعه‌ای از بارهای متحرک لزوماً جریان الکتریکی ایجاد نمی‌کنند؟ در واقع برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم، باید یک انتقال خالص بار از یک سطح مقطع معیّن رخ دهد (شکل ۲ــ۳) که به این منظور نیاز به ابزاری مانند باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را در جهت معیّنی به حرکت درآورد.



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

۲ــ۱ جریان الکتریکی

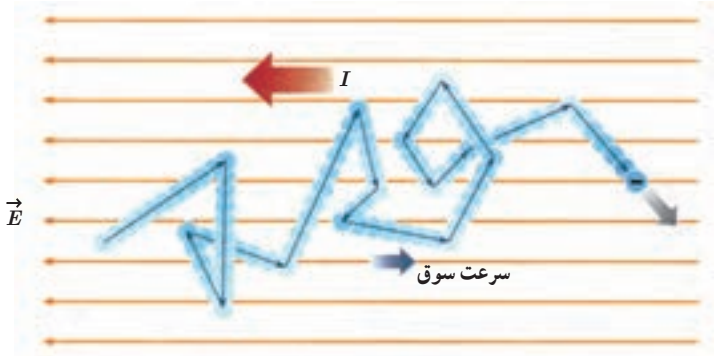
جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همهٔ بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. برای داشتن جریان الکتریکی باید یک شارش خالص بار از یک سطح مقطع معیّن داشته باشیم. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. الکترون‌های آزاد در طول این سیم با تندی‌هایی از مرتبهٔ $10^6 m/s$ در حرکت‌اند، ولی این 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



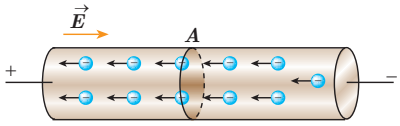
شکل ۲ــ۵ الف) یک مدار الکتریکی ساده که از لامپ، باتری، کلید و سیم‌های رابط تشکیل شده است. ب) معمولاً برای رسم مدار از نمادهای استاندارد شده‌ای برای نشان دادن اجزای مدار استفاده می‌شود.

۱ــ drift velocity

برقراری جریان الکتریکی در رسانا می‌شود (شکل ۲ــ۷). سرعت سوق در یک رسانای فلزی معمولاً از مرتبهٔ ۱mm/s است.



شکل ۲ــ۷ مسیر زیگ‌زاگ یک الکترون آزاد در یک رسانای فلزی. در حضور میدان الکتریکی، این مسیر زیگ‌زاگ در خلاف جهت میدان سوق می‌یابد. توجه کنید که جهت قراردادی جریان الکتریکی I، برخلاف جهت سوق الکترون‌هاست.



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

آندره ماری آمپر (۱۸۳۶ــ ۱۷۱۵م)

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 و قدردانی از زحمات او، دانشمندان یکای جریان را به‌نام آمپر نام‌گذاری کردند.

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

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad (۱ــ۲)$$

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 ۱۰۰W، 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[۱].

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

۱ــ به‌خاطر سپردن این مقادیر ضرورتی ندارد.

۲ــ Direct Current (DC)

مثال ۲ــ۱

ولتاژ باتری یک نوع ماشین‌حساب ۳/۰V است و 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) بار Δq هنگام عبور از باتری انرژی پتانسیل الکتریکی به دست می‌آورد و هنگام عبور از مدار این انرژی را از دست می‌دهد. بنابراین

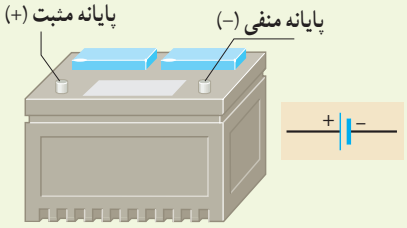
$$\text{انرژی داده شده به مدار} = \Delta U = q\Delta V = (۰/۶۱\mathrm{C})(۳/۰\mathrm{V}) = ۱/۸\mathrm{J}$$

تمرین ۲ــ۱

در رابطهٔ $\Delta q = I(\Delta t)$ اگر I برحسب آمپر و Δt برحسب ساعت باشد، یکای Δq، *آمپر ـ ساعت* می‌شود. باتری خودروها با آمپر ــ ساعت (Ah) و باتری گوشی‌های همراه باميلی‌آمپرــساعت (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) آمپر ـ ساعت نوعی از باتری‌های قلمی (AA)، برابر ۱۰۰۰mAh است. اگر این باتری جریان متوسط ۱۰۰μA را فراهم سازد، چه مدت طول می‌کشد تا خالی شود؟



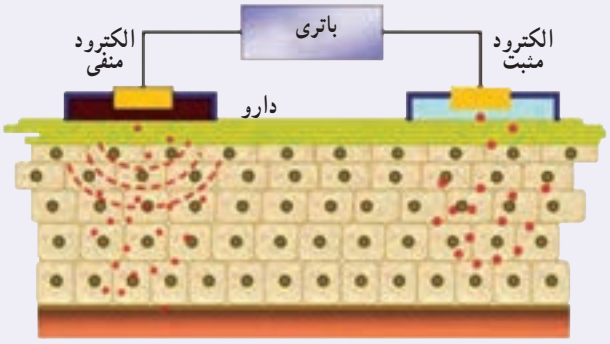
خوب است بدانید: یون‌رانی[۱]

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. بنابراین، 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.

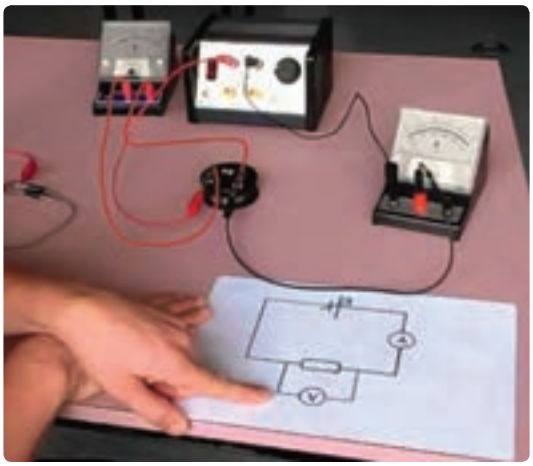
جورج سیمون اُهم (۱۸۵۴ــ ۱۷۸۷م)

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.

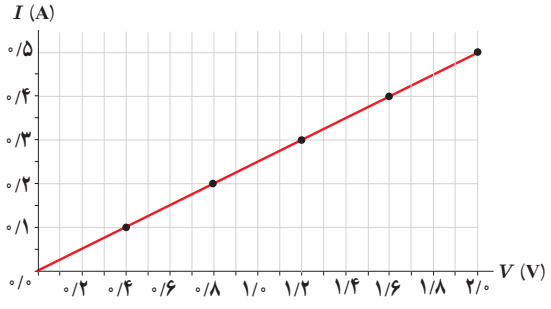
وسیله‌هایی که جریان الکتریکی را از خود عبور می‌دهند ممکن است با تغییر اختلاف پتانسیل اعمال‌شده و در نتیجه تغییر جریان عبوری، مقاومت ثابتی از خود بروز دهند و یا با تغییر اختلاف پتانسیل، مقاومت‌شان تغییر کند. برای تشخیص چنین وسایلی از هم، آزمایشی را تدارک می‌بینیم؛ به‌این ترتیب که وسیله را مانند شکل ۲ــ۸ 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 اغلب 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.

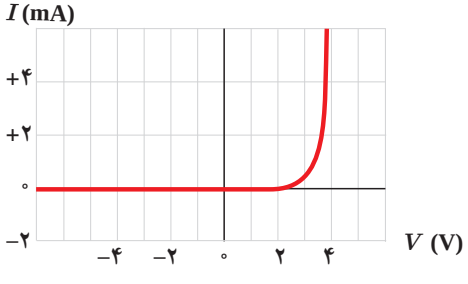
با این حال وسیله‌های زیادی نیز یافت می‌شود که از این قانون پیروی نمی‌کنند. یکی از این وسیله‌های غیراهمی، دیود نورگسیل (LED) است که با آن بعداً آشنا می‌شویم. نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل چنین دیودی تقریباً شبیه شکل ۲ــ۱۰ است.

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

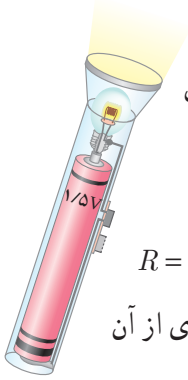


شکل ۲ــ۹ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل نشان می‌دهد که برای این رسانای اُهمی، جریان به‌طور مستقیم با ولتاژ افزایش می‌یابد.



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؟

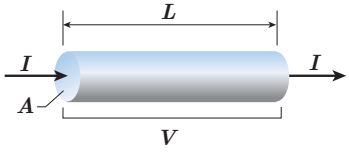
پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۲ برای مقاومت رشتهٔ لامپ داریم :

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

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



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

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

آزمایش و محاسبات نظری 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 ($\Omega.\text{m}$) 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 ۲۰°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.

مقاومت ویژهٔ رساناهای فلزی با افزایش دما زیاد می‌شود در حالی که مقاومت ویژهٔ نیم‌رساناها با افزایش دما کاهش می‌یابد. در برخی مواد، مانند جیوه و قلع با کاهش دما، مقاومت ویژه در دمای خاصی به صورت ناگهانی به صفر افت می‌کند و در دماهای پایین‌تر، همچنان صفر می‌ماند. این پدیده را **ابررسانایی** می‌گویند.

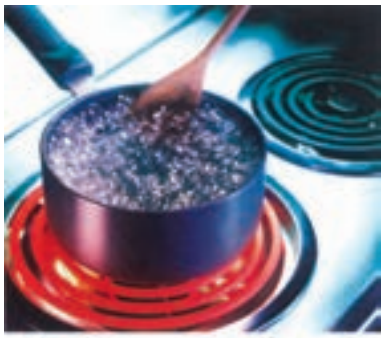
جدول ۲ــ۲ــ مقاومت ویژه در دمای $20^{\circ}C$ برخی از رساناها و نیم‌رساناها

ماده	مقاومت ویژه ρ $(\Omega.m)$
رسانای فلزی	
نقره	$1/6\times10^{-8}$
مس	$1/7\times10^{-8}$
طلا	$2/4\times10^{-8}$
آلومینیم	$2/8\times10^{-8}$
تنگستن	$5/5\times10^{-8}$
آهن	$9/7\times10^{-8}$
پلاتین	10×10^{-8}
سرب	22×10^{-8}
کُنستانتان [1]	44×10^{-8}
نیکروم [2]	100×10^{-8}
نیم‌رسانا	
گرافیت	$3/5\times10^{-5}$
ژرمانیُم	$0/46$
سیلیسیم خالص	$2/5\times10^{3}$
عایق	
انواع شیشه	10^{10}ــ10^{14}
لاستیک سخت	10^{13}
کوارتز (ذوب شده)	10^{16}

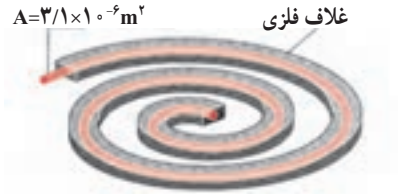
۱ــ ۶۰ درصد مس، ۴۰ درصد نیکل

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

مثال ۲ــ۳



شکل روبه‌رو، المنت یک اجاق برقی را نشان می‌دهد. این المنت شامل سیمی به طول $1/1m$ و سطح مقطع $3/1\times10^{-6}m^2$ 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 $T_0 = 320^{\circ}C$ برابر با $\rho_0 = 6/8\times10^{-5}\Omega.m$ است. با افزایش دمای سیم مقاومت ویژهٔ آن افزایش می‌یابد و در دمای $420^{\circ}C$ به $8/2\times10^{-5}\Omega.m$ می‌رسد. مقاومت سیم در دماهای $320^{\circ}C$ و $420^{\circ}C$ چقدر است؟



یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

پاسخ :

با استفاده از رابطهٔ ۲ــ ۳ مقاومت سیم در دمای $320^{\circ}C$ برابر است با [1]

$$R=\rho\frac{L}{A}=(6/8\times10^{-5}\Omega.m)\frac{(1/1m)}{(3/1\times10^{-6}m^2)}=24\Omega$$

و در دمای $420^{\circ}C$ برابر است با

$$R=\rho\frac{L}{A}=(8/2\times10^{-5}\Omega.m)\frac{(1/1m)}{(3/1\times10^{-6}m^2)}=29\Omega$$

تمرین ۲ــ۲

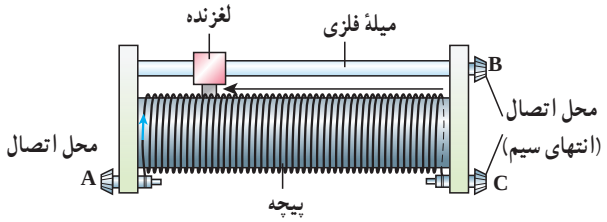
سیم کشی خانه‌ها معمولاً با سیم‌های مسی‌ای صورت می‌گیرد که قطری برابر با $2/032\ mm$ دارد. مقاومت $100m$ از این سیم‌ها در دمای اتاق چقدر است؟

رئوستا : رئوستا [2] نوعی مقاومت متغیر است که از سیمی با مقاومت ویژهٔ نسبتاً زیاد ساخته شده است. این سیم روی استوانه‌ای نارسانا پیچیده شده و با استفاده از دکمه‌ای لغزنده که روی ریلی در بالای استوانه قرار دارد و انتهای آن با سیم در تماس است می‌تواند قسمت دلخواهی از سیم را در مسیر جریان قرار دهد، و بنابراین مقدار مقاومت را تغییر دهد (شکل ۲ــ۱۲). در مدارهای الکترونیکی وسیله‌ای به نام پتانسیومتر [3] نقش رئوستا را دارد.

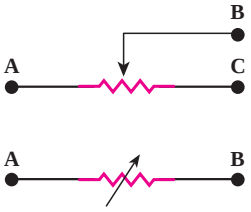
۱ــ از افزایش طول و مساحت سیم بر اثر افزایش دما چشم‌پوشی می‌شود.

۲ــ Rheostat

۳ــ Potentiometer

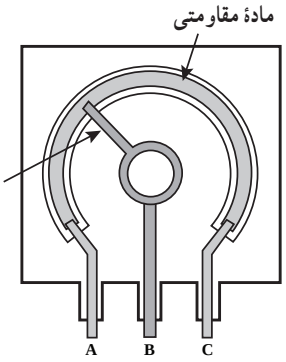


الف) طرحی از ساختار یک رئوستا



ب) نماد یک رئوستا یا پتانسیومتر در مدار الکتریکی

پ) تصویر واقعی یک رئوستا



ت) طرحی از یک پتانسیومتر

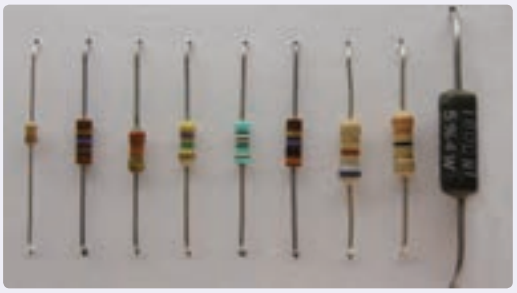
ث) تصویری واقعی از یک پتانسیومتر

شکل ۲ـ۱۲

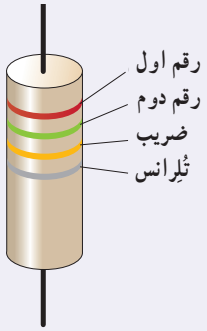
خوب است بدانید

مقاومت‌های ترکیبی

مقاومت‌ها با فنّاوری‌های مختلفی ساخته می‌شوند. نوعی از مقاومت‌ها، مقاومت‌های ترکیبی[۱] هستند. این مقاومت‌ها معمولاً از کربن، برخی نیم‌رساناها، و یا لایه‌های نازک فلزی ساخته شده‌اند. مقاومت‌های ترکیبی را در اندازه‌های خاص 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 الف). هر رنگ، معرّف عددی است که در جدول 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



الف تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی



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

جدول کد رنگی مقاومت‌ها

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

۱ـ composition resistors

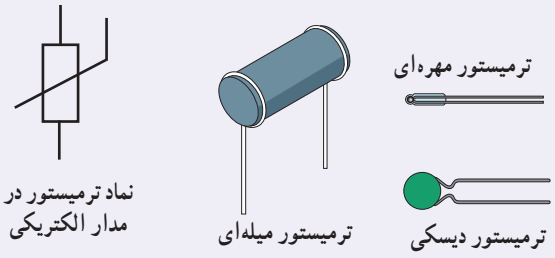
است به‌صورت 10^{n} که در ستون سوم جدول مشخص شده است. حلقهٔ چهارم یک حلقهٔ طلایی یا نقره‌ای رنگ است که تُلرانس[1] نامیده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت را برحسب درصد مشخص می‌کند (شکل ب). نبود نوار چهارم به معنای آن است که تلرانس ۲۰ درصد است. برای خواندن حلقه‌های رنگی، مقاومت را طوری به دست می‌گیریم که حلقهٔ تلرانس در سمت راست قرار گیرد و بقیهٔ حلقه‌ها را از سمت چپ به راست می‌خوانیم.

مقاومت‌های خاص و دیودها

۱ــ ترمیستور[2] : ترمیستور نوعی از مقاومت است که بستگی مقاومت الکتریکی آن به دما متفاوت از مقاومت‌های معمولی است. اغلب از ترمیستورها به عنوان حسگر دما در مدارهای حساس به دما مانند زنگ خطر آتش و دماپاها و نیز در دماسنج‌ها استفاده می‌شود.

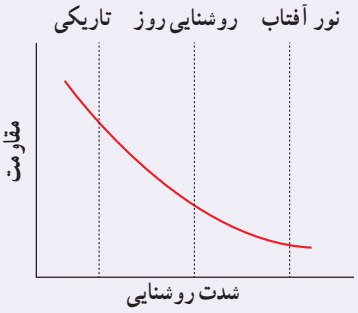
ترمیستورها در ابعاد کوچکی ساخته می‌شوند و شکل‌های متفاوتی دارند که رایج‌ترین آنها دیسکی، مهره‌ای، و میله‌ای است (شکل‌های الف و ب).

ب) تصویری از چند ترمیستور دیسکی واقعی



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

۲ــ مقاومت‌های نوری[3] **(LDR**[4]**)** : 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 حالی که 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 تابیده‌شده از مقاومت آنها کاسته می‌شود. مثلاً شکل پ مقاومت الکتریکی چنین LDRهایی را بر حسب شدت روشنایی[5] (که با یکای LUX سنجیده می‌شود) نشان می‌دهد. شکل ت تصویری از چند LDR و شکل ث دو نماد این مقاومت‌ها در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد.



پ) مقاومت بر حسب شدت روشنایی برای یک LDR نوعی

ت) تصویری از چند LDR

ث) نماد LDR در دو استاندارد متفاوت

۱ــ tolerance

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

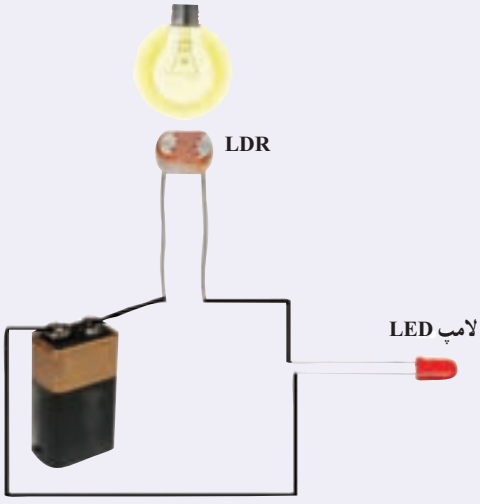
۳ــ Photoresistor

۴ــ Light Dependent Resistor

۵ــ Illumination

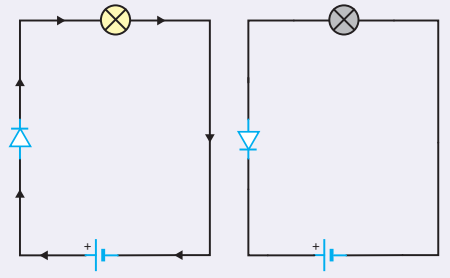
برای اینکه به درکی از ساز وکار این مقاومت‌ها برسید، شکل ج را در نظر بگیرید که در آن یک LDR در مداری ساده به یک لامپ LED متصل شده است. تا هنگامی که لامپِ روشناییِ شکل خاموش باشد، LDR مقاومت بالایی دارد و مانع از روشن شدن لامپ LED می‌شود. با روشن شدن لامپ روشنایی از مقاومت LDR کاسته می‌شود و لامپ LED روشن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

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



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

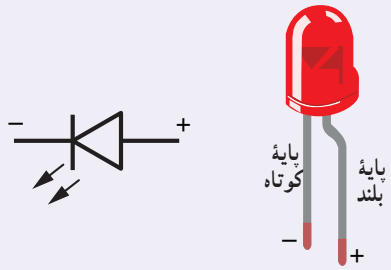
۳ــ دیودها[1] : دیود قطعه‌ای است که هرگاه در مداری قرار گیرد، جریان را تنها از یک سو عبور می‌دهد و مقاومت آن در برابر عبور جریان در این سو ناچیز است. به‌همین دلیل، دیود را اغلب به عنوان یک‌سوکنندهٔ جریان در نظر می‌گیرند و آن را با نماد ⊣▷⊢ در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهند. پیکان در این نماد جهتی را نشان می‌دهد که جریان می‌تواند از دیود عبور کند. مثلاً مدارهای سادهٔ شکل چ 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.



چ) 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[2] است (شکل ح). شکل خ تصویری واضح از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد. در این دیودها از نیم‌رساناهایی استفاده می‌شود که با عبور جریان از آنها LED از خود نورگسیل می‌کند و بنابراین، مقداری از انرژی الکتریکی به نور تبدیل می‌شود. بسته به نوع نیم‌رسانای به کاررفته، رنگ نورگسیل شده از LED می‌تواند از فروسرخ تا فرابنفش باشد.

ح) تصویری از چند دیود نورگسیل



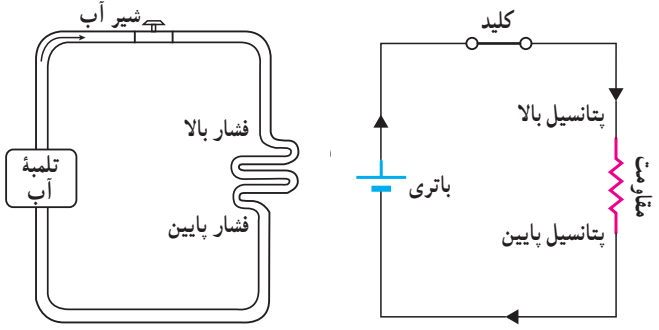
خ) تصویری از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی

۱ــ Diode
۲ــ Light Emitting Diode

۲ــ۴ نیروی محرکهٔ الکتریکی و مدارها

شکل ۲ــ ۱۳ 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.

برای بالا بردن آب از سطح زمین به یک تلمبهٔ آب نیاز است تا آب را به ارتفاع معیّنی برساند. بدین‌ترتیب، آب انرژی پتانسیل گرانشی لازم برای جریان یافتن و انجام کار معیّنی را کسب می‌کند (شکل ۲ــ۱۳). 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 (emf[1]) گفته می‌شود. منبع‌های نیروی محرکهٔ الکتریکی (مانند باتری‌ها) با افزایش انرژی پتانسیل بارهای الکتریکی هنگام عبور از منبع، جریان ثابتی را در مدار برقرار می‌کنند (شکل ۲ــ۱۴).

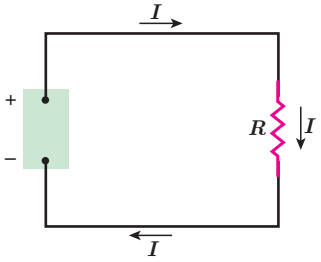


شکل ۲ــ ۱۴ همان‌طور که تلمبهٔ آب انرژی لازم برای شارش آب را فراهم می‌کند، باتری نیز انرژی لازم برای برقراری یک جریان را مهیا می‌سازد.

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.

مدار سادهٔ الکتریکی شکل ۲ــ۱۵ 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) نامیده و با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود[2] :

$$\mathscr{E} = \frac{\Delta W}{\Delta q} \qquad (۲ــ۴)$$



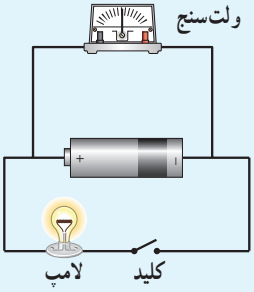
شکل ۲ــ۱۵ یک مدار سادهٔ الکتریکی شامل مقاومت R، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ و سیم‌های رابط

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.

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.

فعالیت ۲ــ۲



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؟

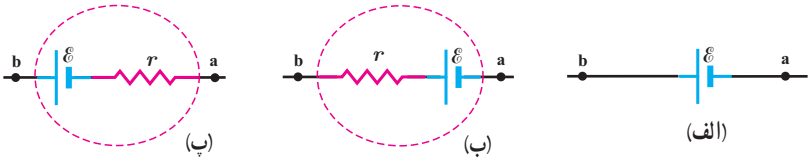
در ادامه با علت تفاوت این دو عدد آشنا خواهید شد.

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

$$\Delta V = \mathscr{E} \qquad (۵ــ۲)$$

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

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 ۲ــ۱۶ نماد منبع نیروی محرکه را در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهد.



شکل ۲ــ۱۶ در مدارهای الکتریکی، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی آرمانی را به‌صورت (الف) و منبع‌های واقعی را به صورت (ب) یا (پ) نمایش می‌دهند.

در یک مدار الکتریکی ساده که از یک منبع نیروی محرکهٔ واقعی با نیروی محرکهٔ $\mathscr{E}$ و مقاومت داخلی r و یک مقاومت R ساخته شده است (شکل ۲ــ۱۷) اختلاف پتانسیل پایانه‌های منبع از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$V = \mathscr{E} - Ir \qquad (۶ــ۲)$$

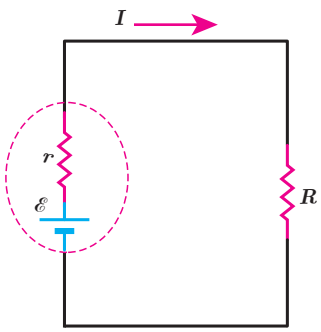
که در آن I جریان گذرنده از منبع است.

در مدار شکل ۲ــ۱۷ دو سر باتری به دو سر مقاومت R وصل شده است. بنابراین اختلاف پتانسیل دو سر باتری ($V = \mathscr{E} - Ir$) با اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت ($V = IR$) برابر است. در نتیجه داریم :

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

و بنابراین :

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R + r} \qquad (۷ــ۲)$$



شکل ۲ــ۱۷ مداری ساده شامل یک باتری واقعی و مقاومت R

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

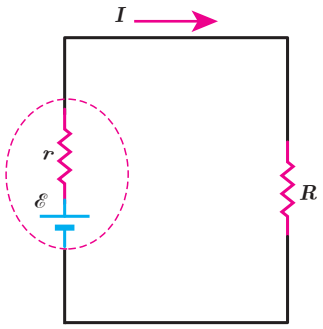
اگر بین دو نقطه از بدن ما اختلاف پتانسیلی برقرار شود، جریان الکتریکی از بدن می‌گذرد. مقدار این جریان به مقاومت الکتریکی بدن بستگی دارد که عمدتاً ناشی از پوست است. هرچه پوست خشک‌تر باشد، مقاومت بیشتری دارد، ولی اگر پوست خیس یا مرطوب باشد، زخمی سَر باز داشته باشد، و یا با کرمی پوشیده شده باشد، مقاومت کمتر 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.

مثال ۲ــ۴



در مدار شکل روبه‌رو فرض کنید $\mathscr{E} = ۱۲\text{V}$، $r = ۲/۰\Omega$ و $R = ۴/۰\Omega$ باشد.
الف) جریان عبوری از مدار چقدر است؟ ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری را محاسبه کنید.

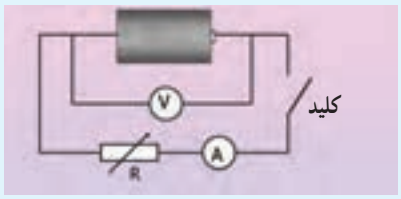
پاسخ : الف) بنا به رابطه ۲ــ۷ داریم :

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

ب) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۶ اختلاف پتانسیل دوسر باتری برابر است با

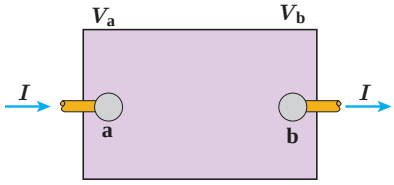
$$V = \mathscr{E} - Ir = ۱۲\text{V} - (۲/۰\text{A})(۲/۰\Omega) = ۸\text{V}$$

فعالیت ۲ــ۳ (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 ۲ــ۶ 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



شکل ۲ــ۱۸ یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی بین دو سر آن برقرار است.

اکنون می‌خواهیم رابطه‌هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به‌دست آوریم. جعبهٔ شکل ۲ــ۱۸ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که می‌تواند شامل باتری، مقاومت و یا هرچیز دیگری باشد که اختلاف پتانسیلی بین پایانه‌های آن برقرار است. فرض کنید بار q در مدت زمان t تحت اختلاف پتانسیل ΔV از پایانهٔ a به پایانهٔ b برود. در فصل پیش دیدیم تغییر انرژی پتانسیل بار q در این انتقال برابر با $\Delta U = q\Delta V$ است. از طرفی توان الکتریکی، آهنگ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار q هنگام عبور از این بخش از مدار است :

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

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

$$P = IV \qquad (۸ــ۲)$$

در این رابطه، توان (P) برحسب وات (W)، جریان (I) برحسب آمپر (A) و اختلاف پتانسیل (V) برحسب ولت (V) است. این رابطه را می‌توان برای منبع نیروی محرکه (مثلاً باتری)، یا برای 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 محاسبهٔ توان مصرفی مقاومت، کافی است در این رابطه به‌جای V از رابطهٔ تعریف مقاومت ($R = V/I$) استفاده کنیم :

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

در نتیجه :

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

مثال ۲ــ۵

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 :

$$P = IV = (۱۰/۰\text{A})(۲۲۰\text{V}) = ۲/۲۰\times۱۰^۳\text{W} = ۲/۲۰\text{kW}$$

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 ($۱\text{kWh} = (۱۰۰۰\frac{\text{J}}{\text{s}})(۳۶۰۰\text{s}) = ۳/۶\times۱۰^۶\text{J}$).

پس انرژی مصرفی بخاری در یک ماه، برابر است با

$$U = Pt = (۲/۲۰\text{kW})(۳۰\times۳/۰۰\text{h}) = ۱۹۸\text{kWh}$$

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

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

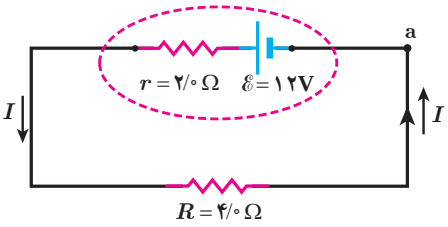
فعالیت ۲ــ۴

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

فعالیت ۲ــ۵

همانند شکل با یک اهم‌متر، مقاومت رشتهٔ سیم داخل لامپ ۱۰۰واتی را اندازه‌گیری کنید. سپس با استفاده از رابطهٔ $P_{\text{مصرفی}}=V^2/R$ ، و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. چرا مقدار اندازه‌گیری‌شده با مقدار محاسبه‌شده متفاوت است؟ نتیجه را پس از گفت‌وگوی گروهی، گزارش دهید.

مثال ۲ــ۶



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

پاسخ : الف) نخست، جریان را با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۷ به دست می‌آوریم :

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

اکنون توان مصرفی مقاومت R چنین می‌شود :

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

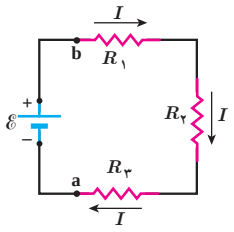
ب) با استفاده از پایستگی انرژی بدیهی است که توان الکتریکی خروجی باتری برابر با توان مصرفی مقاومت ۴ اهمی، یعنی ۱۶W می‌شود. با این حال، این را می‌توانیم به‌طور مستقیم نیز نشان دهیم :

$$V_{\text{باتری}}=\mathscr{E}-Ir=۱۲/۰\text{V}-(۲/۰\text{A})(۲/۰\Omega)=۸/۰\text{V}$$

$$P_{\text{خروجی باتری}}=IV_{\text{باتری}}=(۲/۰\text{A})(۸/۰\text{V})=۱۶\text{W}$$

۲ــ۶ ترکیب مقاومت‌ها

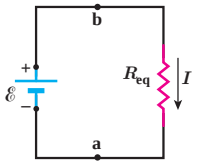
مقاومت‌ها در انواع وسایل الکتریکی دیده می‌شوند، از ساده‌ترین وسیله‌ها مانند بخاری‌های برقی و موخشک‌کن‌ها گرفته تا وسایل الکتریکی پیچیده‌تری مانند تلویزیون و رایانه‌ها. مدارهای این وسیله‌ها اغلب چندین مقاومت دارند؛ در نتیجه لازم است که ترکیبی از مقاومت‌ها را در نظر بگیریم. رشته‌ای از لامپ‌ها که در چراغانی‌ها 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



شکل ۲ــ۱۹ سه مقاومت که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده‌اند.

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 ۲ــ۱۹ 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 ۲ــ۲۰ مدار معادل شکل ۲ــ۱۹ که در آن سه مقاومت با مقاومت R_{eq} جایگزین شده است.

اختلاف پتانسیل کلّ اعمال شده به دو سر مجموعهٔ مقاومت‌ها، برابر با جمع اختلاف پتانسیل‌های دو سر مقاومت‌هاست : $V = \mathscr{E} = V_۱ + V_۲ + V_۳$. اکنون به سراغ محاسبهٔ جریان I می‌رویم. با به‌کارگیری تعریف مقاومت الکتریکی $(R = V/I)$ برای هر یک از مقاومت‌ها و با توجه به برابر بودن جریان آنها داریم :

$$V = \mathscr{E} = IR_۱ + IR_۲ + IR_۳$$

و در نتیجه

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_۱ + R_۲ + R_۳}$$

با تعریف مقاومت معادل، به‌صورت

$$R_{eq} = R_۱ + R_۲ + R_۳$$

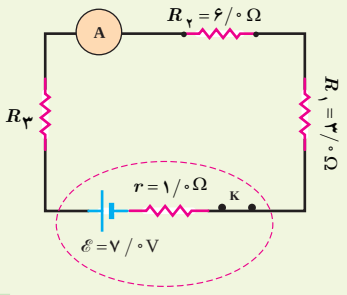
مدار شکل ۲ــ۱۹ را می‌توان با مدار معادل شکل ۲ــ۲۰ جایگزین کرد. بدیهی است که اگر به‌جای سه مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آنها از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$R_{eq} = R_۱ + R_۲ + R_۳ + \cdots + R_n \qquad (۱۰ــ۲)$$

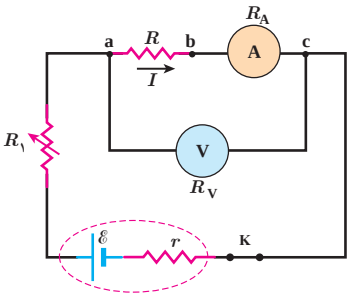
توجه کنید وقتی مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند، مقاومت معادل آنها بزرگ‌تر از مقاومت هریک از آنهاست.

تمرین ۲ــ۳

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 $R_۱$ ، $R_۲$ و $R_۳$ برابر با $۱۳/۰\Omega$ باشد : الف) مقاومت $R_۳$ چقدر است؟ ب) جریانی را که آمپرسنج نشان می‌دهد به‌دست آورید. پ) توان خروجی باتری چقدر است؟



مثال ۲ــ۷



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 $R_V = 1/00\times10^4\Omega$ و مقاومت آمپرسنج $R_A = 1/00\Omega$ است. مقاومت R را به‌دست آورید.

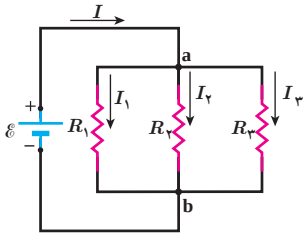
پاسخ : مقاومت‌های R و R_A به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند و اختلاف پتانسیل دوسر آنها برابر با $24/0\ V$ است. با توجه به اینکه آمپرسنج جریان $0/200\ A$ را نشان می‌دهد و به‌طور متوالی به مقاومت R بسته شده است، جریان عبوری از این دو مقاومت نیز برابر $0/200\ A$ است :

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

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.

بستن مقاومت‌ها به‌صورت موازی : شکل ۲ــ۲۱ 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 :



شکل ۲ــ۲۱ مداری شامل سه مقاومت که به‌صورت موازی به نقطه‌های a و b بسته شده‌اند.

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

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 رابطهٔ بین جریان‌های I، I_1، I_2، و I_3 را بررسی می‌کنیم. با توجه به پایستگی بار الکتریکی و اینکه هیچ باری نمی‌تواند در یک نقطهٔ مدار جمع گردد، بار ورودی به نقطهٔ a در واحد زمان با مجموع بارهای خروجی از نقطهٔ a در واحد زمان برابر است. همان‌طور که می‌دانیم بار عبوری در واحد زمان همان جریان است. بنابراین داریم :

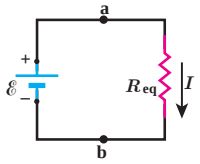
$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

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

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

با قرار دادن این جریان‌ها در معادلهٔ قبلی خواهیم داشت :

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



شکل ۲ـ۲۲ مدار معادل شکل ۲ـ۲۱ که در آن مقاومت معادل، R_{eq} جایگزین مقاومت‌های $R_۱$، $R_۲$ و $R_۳$ شده است.

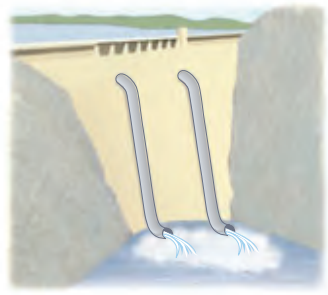
اگر ترکیب موازی مقاومت‌ها را با مقاومت R_{eq} جایگزین کنیم $I=\frac{V}{R_{eq}}$ می‌شود و از آنجا خواهیم داشت :

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

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

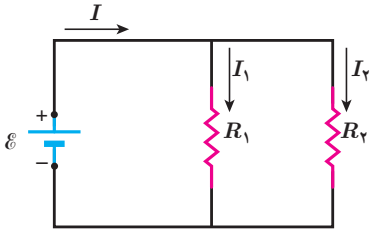
$$\frac{۱}{R_{eq}}=\frac{۱}{R_۱}+\frac{۱}{R_۲}+\frac{۱}{R_۳}+\cdots+\frac{۱}{R_n} \qquad (۱۱ـ۲)$$

مدار شکل ۲ـ۲۱ به مدار معادل شکل ۲ـ۲۲ 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، مشابهت‌سازی با لوله‌های آب می‌تواند راه‌گشا باشد. اگر دو لولهٔ آب یکسان در نزدیکی بالای یک سد را در نظر بگیرید که آب را مطابق شکل ۲ـ۲۳ به پایین منتقل می‌کنند، درمی‌یابیم اگر هر دو لوله باز باشند، نسبت به وضعیتی که فقط یک لوله باز باشد، آب، دو برابر بیشتر جریان می‌یابد. این موضوع یعنی اینکه مقاومت کل در برابر جریان آب به نصف کاهش پیدا می‌کند. درست مانند دو مقاومت الکتریکی یکسان که به‌طور موازی بسته شده‌اند.



شکل ۲ـ۲۳ مقاومت‌الکتریکی معادل دو مقاومت یکسان را می‌توان با دو لولهٔ آب یکسان که از آنها جریان‌های آبی مطابق شکل می‌گذرد، مشابهت‌سازی کرد.

مثال ۲ـ۸



در شکل روبه‌رو، یک باتری آرمانی اختلاف پتانسیل $\mathcal{E}=۱۲\,V$ را به دو سر مقاومت‌های $R_۱=۴/۰\,\Omega$ و $R_۲=۶/۰\,\Omega$ 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 $R_۱$، و مقاومت $R_۲$ را به ترتیب با I، $I_۱$ و $I_۲$ نشان داده‌ایم.

الف) بدیهی است که اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ برابر با اختلاف پتانسیل باتری است. بنابراین داریم :

$$V_۱=\mathcal{E}=I_۱R_۱\Rightarrow I_۱=\frac{\mathcal{E}}{R_۱}=\frac{۱۲\,V}{۴/۰\,\Omega}=۳/۰\,A$$

$$V_۲=\mathcal{E}=I_۲R_۲\Rightarrow I_۲=\frac{\mathcal{E}}{R_۲}=\frac{۱۲\,V}{۶/۰\,\Omega}=۲/۰\,A$$

ب) و برای جریان عبوری از باتری داریم :

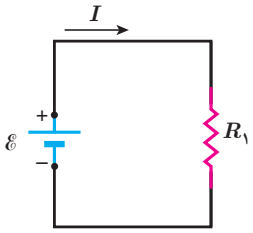
$$I=I_۱+I_۲=۳/۰\,A+۲/۰\,A=۵/۰\,A$$

فعالیت ۲ـ۶

مداری مانند مدار مثال ۲ـ۸ ببندید و در هر شاخهٔ آن، یک آمپرسنج قرار دهید. با خواندن آمپرسنج‌ها، رابطهٔ بین جریان‌ها را بررسی کنید.

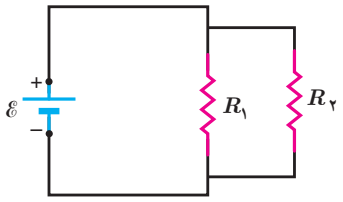
مثال ۲ــ۹

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



الف) جریان عبوری از منبع را به‌دست آورید.

ب) اگر مقاومت $R_۲ = ۱۰/۰\,M\Omega$ 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 :

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

ب) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ داریم :

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

در نتیجه

$$R_{eq} = \frac{R_۱R_۲}{R_۱ + R_۲} = \frac{(۱۰۰\times۱۰^{۷}\,\Omega)(۱۰/۰\times۱۰^{۶}\,\Omega)}{۱۰۰\times۱۰^{۷}\,\Omega + ۱۰۰\times۱۰^{۶}\,\Omega} = ۹۹/۰\,k\Omega$$

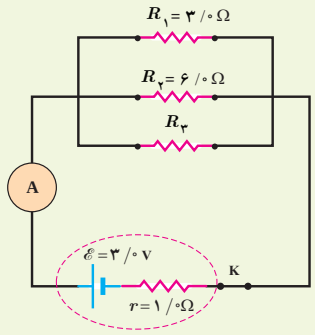
و بنابراین، جریان عبوری از منبع برابر است با

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

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.

تمرین ۲ــ۴

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) توان خروجی باتری چقدر است؟

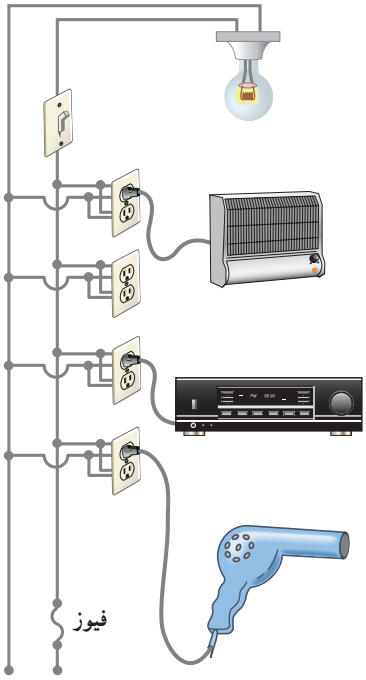


مثال ۲ــ۱۰

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 ۲ــ۱۱ 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 :

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

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

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

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

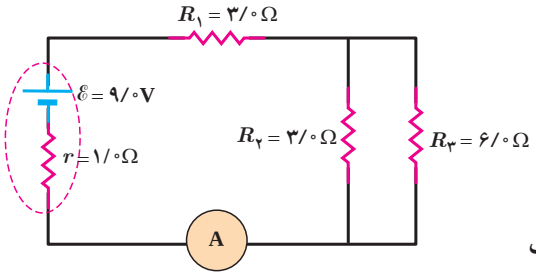
اکنون می‌خواهیم این نتیجه را با مجموع توان‌های هریک از مصرف‌کننده‌ها مقایسه کنیم.

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.

مثال ۲ــ۱۱



در مدار شکل روبه‌رو

الف) مقاومت معادل،

ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد، و

پ) جریان گذرنده از مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ را محاسبه کنید.

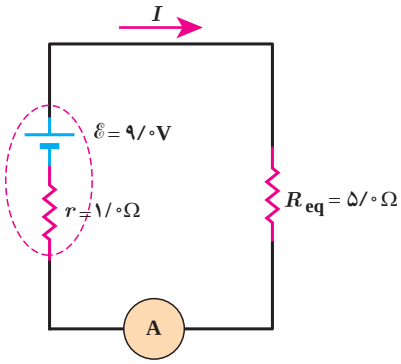
پاسخ : الف) مقاومت‌های $R_۲$ و $R_۳$ موازی با هم وصل شده‌اند، مقاومت معادل آنها را $R_{۲۳}$ می‌نامیم.

$$\frac{۱}{R_{۲۳}} = \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳} \Rightarrow R_{۲۳} = \frac{R_۲ R_۳}{R_۲ + R_۳} = \frac{(۳/۰\,\Omega)(۶/۰\,\Omega)}{۳/۰\,\Omega + ۶/۰\,\Omega} = ۲/۰\,\Omega$$

مقاومت معادلِ $R_{۲۳}$ و مقاومت $R_۱$ متوالی با هم وصل شده‌اند. مقاومت معادل آنها را با R_{eq} نشان می‌دهیم :

$$R_{\text{eq}} = R_۱ + R_{۲۳} = ۳/۰\,\Omega + ۲/۰\,\Omega = ۵/۰\,\Omega$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۷ برای شکل روبه‌رو داریم :



$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_{\text{eq}} + r} = \frac{۹/۰\,\text{V}}{۵/۰\,\Omega + ۱/۰\,\Omega} = ۱/۵\,\text{A}$$

جریان گذرنده از باتری، مقاومت معادلِ R_{eq} و آمپرسنج یکسان است. بنابراین آمپرسنج جریان ۱/۵A را نشان می‌دهد.

پ) می‌دانیم جریان گذرنده از مقاومت‌های متوالی با جریان مقاومت معادل آنها برابر است. پس،

$$I_۱ = I_{۲۳} = I \Rightarrow I_۱ = I_{۲۳} = ۱/۵\,\text{A}$$

برای به‌دست آوردن $I_۲$، نخست $V_۲$ را به دست می آوریم. می‌دانیم در مقاومت‌های موازی، ولتاژ هر مقاومت با ولتاژ مقاومت معادل برابر است. پس $V_{۲۳} = V_۲$ ، و بنابراین کافی است $V_{۲۳}$ را بیابیم :

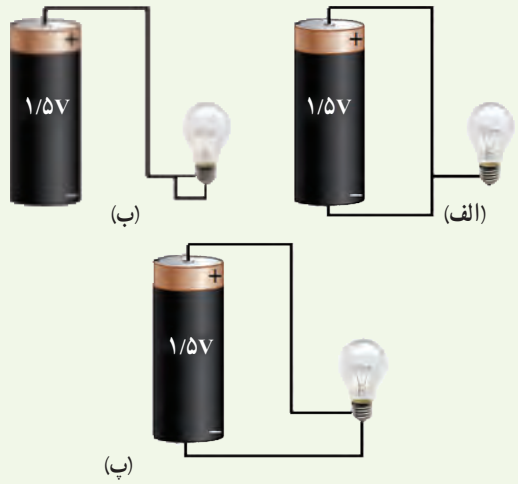
$$V_{۲۳} = R_{۲۳} I_{۲۳} = (۲/۰\,\Omega)(۱/۵\,\text{A}) = ۳/۰\,\text{V}$$

در نتیجه برای جریان $I_۲$ داریم :

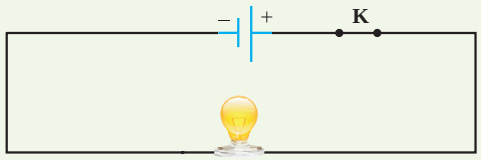
$$I_۲ = \frac{V_۲}{R_۲} = \frac{V_{۲۳}}{R_۲} = \frac{۳/۰\,\text{V}}{۳/۰\,\Omega} = ۱/۰\,\text{A}$$

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

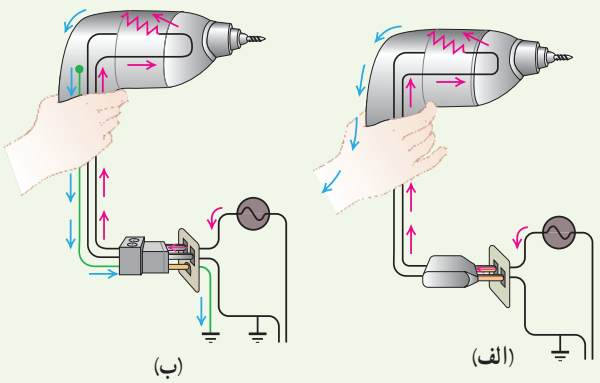
۱ در کدام یک از شکل‌های زیر، لامپ روشن می‌شود؟



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؟



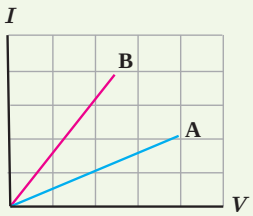
۴ آذرخش مثالی جالب از جریان الکتریکی در پدیده‌های طبیعی است. در یک آذرخش نوعی $۱/۰\times۱۰^{۹}\,J$ انرژی تحت اختلاف‌پتانسیل $۵/۰\times۱۰^{۷}\,V$ در بازهٔ زمانی ۰/۲۰s آزاد می‌شود. با استفاده از این اطلاعات الف) مقدار بار کل منتقل‌شده بین ابر و زمین، ب) جریان متوسط در یک یورش آذرخش و پ) توان الکتریکی آزادشده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

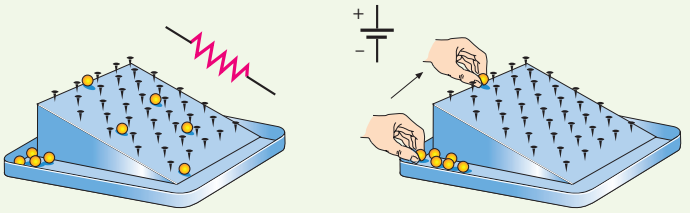
۷ دو رسانای فلزی از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توپری به‌قطر ۱/۰ mm است. رسانای B لوله‌ای توخالی به شعاع خارجی ۲/۰ mm و شعاع داخلی ۱/۰ mm است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟

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.)

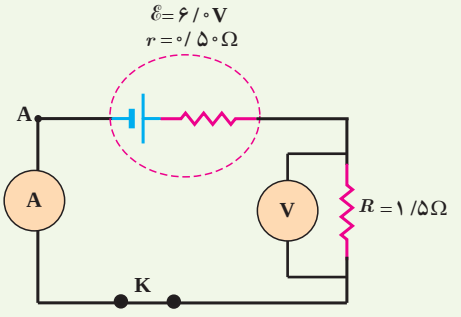
۲ــ۴ نیروی محرکهٔ الکتریکی و مدارها

۹ 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.



۱۰ یک باتری را در نظر بگیرید که وقتی به مدار بسته نیست پتانسیل دو سرش برابر ۱۲/۰V است. وقتی یک مقاومت ۱۰/۰Ω به این باتری بسته شود، اختلاف پتانسیل دو سر باتری به ۱۰/۹V کاهش می‌یابد. مقاومت داخلی باتری چقدر است؟

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



۲ــ۵ توان در مدارهای الکتریکی

۱۲ 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؟

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

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

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

۸۵۰W، ۲۲۰V، اتوی برقی

۲۴۰۰W، ۲۲۰V، کتری برقی

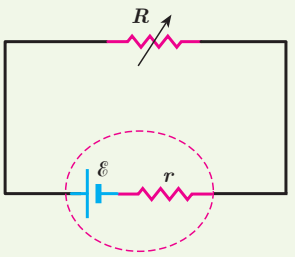
۱۴ تلویزیون و یکی از لامپ‌های خانهٔ خود را درنظر بگیرید و فرض کنید که هرکدام روزی ۸ ساعت با اختلاف پتانسیل ۲۲۰ولت روشن باشد.

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؟

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



داخلی منبع را که توان خروجی آن به ازای $I_1 = ۵/۰۰\,A$ برابر $۹/۵۰\,W$ و به ازای $I_2 = ۷/۰۰\,A$ برابر $۱۲/۶\,W$ است، محاسبه کنید.

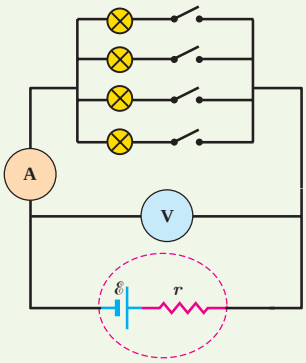
ب) نمودار اختلاف پتانسیل دو سر باتری برحسب جریان گذرنده از آن را رسم کنید.

۲ـ۶ ترکیب مقاومت‌ها

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

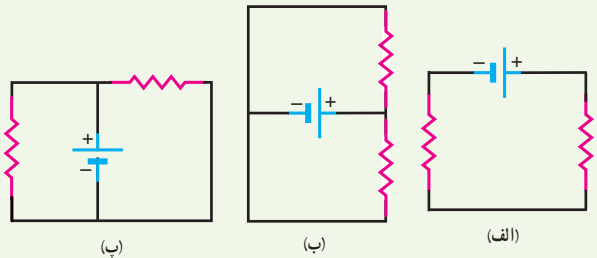
۱۷ مقاومت یک آمپرسنج برای اندازه‌گیری جریان در یک مدار باید چگونه باشد تا جریان اندازه‌گیری‌شده توسط آمپرسنج با جریان قبل از قرار دادن آمپرسنج، نزدیک به هم باشد؟

۱۸ 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؟



۱۹ 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؟

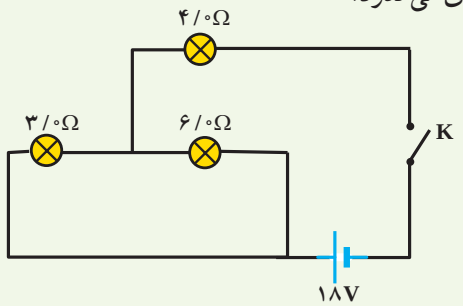
۲۰ در شکل‌های زیر، آیا مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند یا موازی و یا هیچ کدام؟



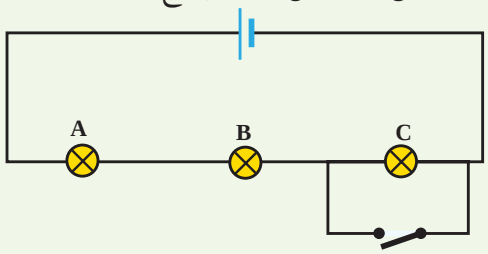
۲۱ سه مقاومت مشابه ۱۲ اُهمی را یک‌بار به‌طور متوالی و بار دیگر به‌طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ولت وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۲۲ 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.

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



۲۴ 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 A و B به‌اندازهٔ ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

ت) اختلاف‌پتانسیل دو سر C به صفر کاهش می‌یابد.

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