

جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



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

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

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

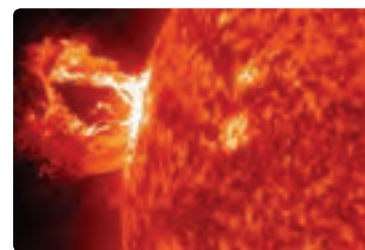


شکل ۱-۲ انرژی از باتری به صفحه نمایشگر تلفن، توسط بارهایی که از سیم‌های رسانا می‌گذرند، منتقل می‌شود.

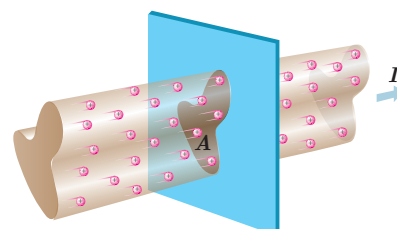
اکنون با این پرسش شروع می‌کنیم که چرا هر مجموعه‌ای از بارهای متحرک لزوماً جریان الکتریکی ایجاد نمی‌کنند؟ در واقع برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم، باید یک انتقال خالص بار از یک سطح مقطع معین رخ دهد (شکل ۲-۳) که به این منظور نیاز به ابزاری مانند باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را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

۱-۲ جریان الکتریکی

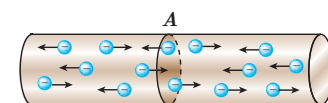
جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همه بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. برای داشتن جریان الکتریکی باید یک شارش خالص بار از یک سطح مقطع معین داشته باشیم. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. الکترون‌های آزاد در طول این سیم با تندی‌هایی از مرتبه 10^6 m/s در حرکت‌اند، ولی این حرکت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



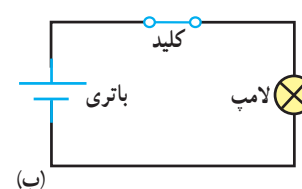
شکل ۲-۲ فوران عظیمی از الکترون‌ها و یون‌ها که از سطح خورشید پرتاب می‌شوند.



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

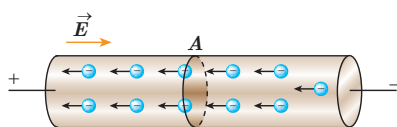


شکل ۲-۴ در نبود اختلاف پتانسیل، شارش بار خالصی از مقطع معین A سیم، نداریم.



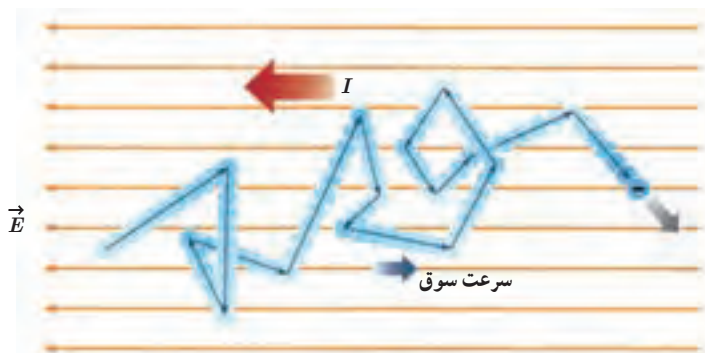
شکل ۲-۵ یک مدار الکتریکی ساده که از لامپ، باتری، کلید و سیم‌های رابط تشکیل شده است. (ب) معمولاً برای رسم مدار از نمادهای استاندارد شده‌ای برای نشان دادن اجزای مدار استفاده می‌شود.

^۱ - drift velocity



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

برقراری جریان الکتریکی در رسانا می‌شود (شکل ۲-۷). سرعت سوق در یک رسانای فلزی معمولاً از مرتبه 1 mm/s است.



شکل ۲-۷ 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.



آندره ماری آمپر (۱۸۳۶-۱۷۱۵م)

آندره ماری آمپر در حومه شهر لیون فرانسه به دنیا آمد. در کودکی و نوجوانی عشق و علاقه فراوانی به ریاضیات داشت و پیوسته اطلاعاتش در زمینه علوم ریاضی را تکمیل 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 به عنوان معلم ریاضی و نجوم در مدرسه لیون تدریس کند. دو سال در مدرسه لیون تدریس کرد و در سال ۱۸۰۵ به پاریس سفر کرد تا در کالج پلی تکنیک مشغول به کار شود. در سال ۱۸۰۹ به سمت استاد ریاضی و مکانیک این کالج برگزیده شد. در سال ۱۸۱۹ دانشمند دانمارکی، یوهان ارستد کشف کرد که عبور جریان از یک سیم رسانا منحرف می‌شود. آمپر با تکمیل آزمایش او، تأثیر دو سیم رسانای حامل جریان بر یکدیگر را بررسی کرد و نتیجه گرفت وقتی جهت جریان در رساناها یکسان باشد یکدیگر را جذب می‌کنند و چنان‌که جهت جریان‌ها برعکس باشد همدیگر را دفع می‌کنند. خلاصه‌ای از این تجربیات بعدها تحت عنوان کتابی به نام «مغناطیس و الکتریسیته» از آمپر به چاپ رسید.

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

۱-۲ فعالیت

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

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

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

در رابطه ۱-۲ بار الکتریکی (Δq) برحسب کولن (C)، مدت زمان (Δt) برحسب ثانیه (s) و جریان (I) برحسب آمپر (A) است. برخی از مقادیر تقریبی جریان‌های متداول عبارت‌اند از ۱A برای لامپ‌های حبابی 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.

۱- به خاطر سپردن این مقادیر ضرورتی ندارد.

۲- Direct Current (DC)

مثال ۲-۱



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

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

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

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

ب) انرژی‌ای که باتری به مدار می‌دهد، بنابه رابطه $1-13$ $(W_{\text{خارجی}} = q \Delta V)$ چنین می‌شود:

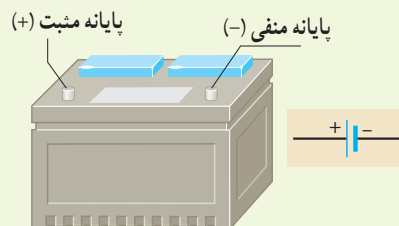
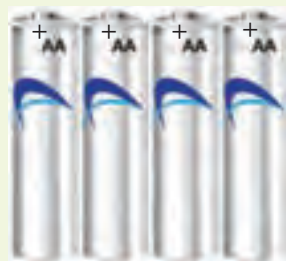
$$q \Delta V = (0/61 C)(3/0 V) = 1/8 J$$

تمرین ۲-۱

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

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

ب) آمپر-ساعت نوعی از باتری‌های قلمی (AA)، برابر $1000 mAh$ است. اگر این باتری جریان متوسط $100 \mu A$ را فراهم سازد، چه مدت طول می‌کشد تا خالی شود؟

خوب است بدانید: یون‌رانی^۱

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

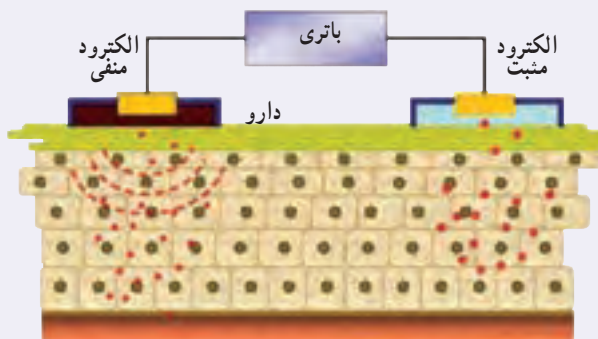
۱- Iontophoresis

۲- Dexamethasone

قرار می‌دهند. جریان از طریق پوست عبور می‌کند و دارو را به بافت آسیب‌دیده تا عمق حداکثر ۱/۷cm می‌رساند (شکل الف). اگر پرستاری بخواهد مثلاً ۸۰µg دارو را با جریان متداول ۱۴mA/۰ به پای آسیب‌دیده برساند (شکل ب)، محاسبه نشان می‌دهد که این عمل ۱۵ دقیقه به طول خواهد انجامید.



(ب)



(الف)

۲-۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم

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

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

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



جورج سیمون اهم (۱۸۵۴-۱۷۸۷م)

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

۱- Resistance

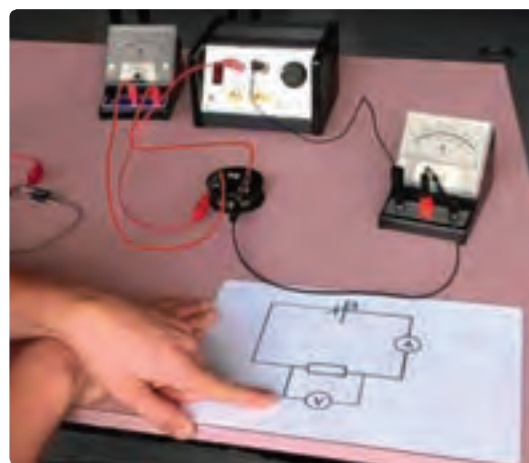
۲- Resistor

۲- از حروف الفبای یونانی که اُمگا خوانده می‌شود.

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

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

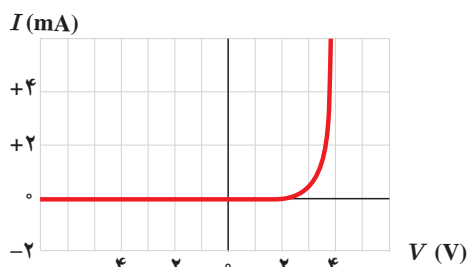
با این حال وسیله‌های زیادی نیز یافت می‌شود که از این قانون پیروی نمی‌کنند. یکی از این وسیله‌های غیر اهمی، دیود نورگسیل (LED) است که با آن بعداً آشنا می‌شویم. نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل چنین دیودی تقریباً شبیه شکل ۲-۱۰ است.



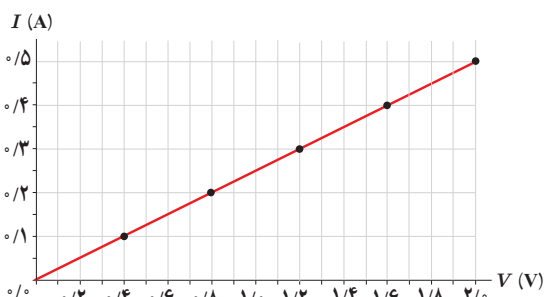
شکل ۲-۸ اسباب تحقیق قانون اهم. توجه کنید که آمپرسنج در مدار به‌صورت متوالی و ولت‌سنج به‌صورت موازی بسته شده است.

جدول ۲-۱ مقادیری نوعی برای یک رسانای اهمی

اختلاف پتانسیل $V(V)$	جریان $I(A)$	مقاومت $R(\Omega)$
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

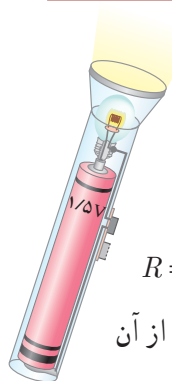


شکل ۲-۱۰ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل برای یک دیود نورگسیل



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

مثال ۲-۲



یک لامپ چراغ قوه کوچک از یک باتری ۱/۵V، جریانی برابر 30mA می‌کشد. با فرض آنکه رشته لامپ، یک رسانای اهمی 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 رابطه ۲-۲ برای مقاومت رشته لامپ داریم:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1.5\text{V}}{0.03\text{A}} = 50\Omega$$

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

چنین می‌شود:

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

۳-۲ 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.

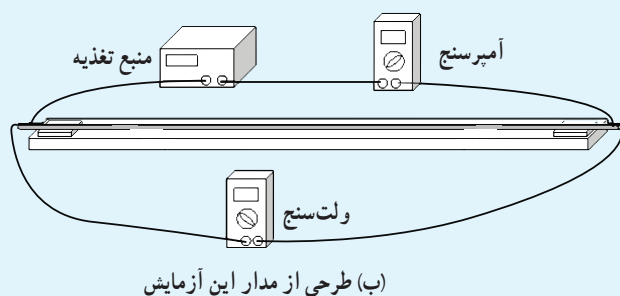
فعالیت ۲-۲

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

۱- قطعه سیم‌هایی از جنس یکسان، مثلاً کنستانتان (یا نیکروم) با قطر برابر ولی طول‌های متفاوت را در مدار قرار دهید و با استفاده 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. به نظر شما چه رابطه‌ای بین مقاومت سیم‌ها و طول آنها وجود دارد؟

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

۳- آزمایش را با دو قطعه سیم هم طول 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

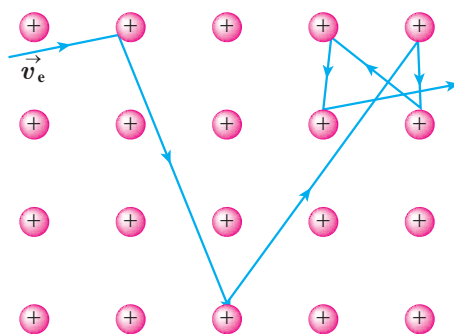
با انجام فعالیت بالا درمی‌یابیم که مقاومت جسم در دمای ثابت به طول، مساحت مقطع، و جنس آن بستگی دارد. این آزمایش‌ها که با محاسبات نظری نیز تأیید شده‌اند نشان می‌دهد اگر سطح مقطع جسم در تمام طول آن یکسان باشد (شکل ۲-۱۱)، مقاومت آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

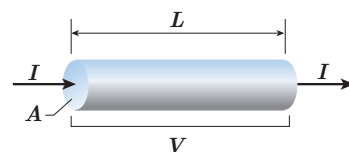
که در آن طول رسانا (L) برحسب متر (m)، مساحت مقطع جسم (A) برحسب متر مربع (m^2)، و مقاومت جسم (R) برحسب اهم (Ω) است، و بنابراین، کمیت ρ که به آن **مقاومت ویژه** گفته می‌شود برحسب اهم-متر ($\Omega \cdot m$) می‌شود. این بستگی مقاومت به طول و مساحت مقطع جسم را می‌توان با شبیه‌سازی‌های ساده‌ای نیز درک کرد. 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 به معنای افزایش مقاومت در برابر عبور شاره است.

مقاومت ویژه یک ماده به ساختار اتمی و دمای آن بستگی دارد. رساناهای الکتریکی خوب مقاومت ویژه بسیار کم و عایق‌های خوب مقاومت ویژه بسیار زیادی دارند. جدول ۲-۲ مقاومت ویژه 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 ویژه آنها بین مقاومت ویژه رساناها و نارساناهاست. به این 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 شبکه اتمی رسانای فلزی می‌شود (شکل ۲-۱۲) و به این ترتیب، مقاومت رسانا در برابر



شکل ۲-۱۲ حرکت الکترون در داخل شبکه بلوری فلز. با افزایش دما، ارتعاشات شبکه و در نتیجه برخورد الکترون‌ها با شبکه افزایش می‌یابد.



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

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

ماده	مقاومت ویژه ρ ($\Omega \cdot m$)	ضریب دمایی مقاومت ویژه α (K^{-1})
رسانای فلزی		
نقره	1.6×10^{-8}	4.1×10^{-3}
مس	1.7×10^{-8}	4.3×10^{-3}
طلا	2.4×10^{-8}	3.4×10^{-3}
آلمینیم	2.8×10^{-8}	4.4×10^{-3}
تنگستن	5.5×10^{-8}	4.5×10^{-3}
آهن	9.7×10^{-8}	6.5×10^{-3}
پلاتین	1.0×10^{-7}	3.9×10^{-3}
سرب	22×10^{-8}	4.3×10^{-3}
کُنستانتان ^۱	44×10^{-8}	2.0×10^{-6}
نیکروم ^۲	1.0×10^{-6}	4.0×10^{-4}

نیم‌رسانا		
گرافیت	3.5×10^{-5}	-5×10^{-4}
ژرمانیم	0.46	-5×10^{-2}
سیلیسیم خالص	2.5×10^3	-7×10^{-2}

عایق		
انواع شیشه	$10^{12} - 10^{14}$	
لاستیک سخت	10^{13}	
کوارتز (ذوب شده)	10^{16}	

۱- ۶۰ درصد مس، ۴۰ درصد نیکل
۲- ۵۹ درصد نیکل، ۲۳ درصد مس، ۱۶ درصد کروم و ...



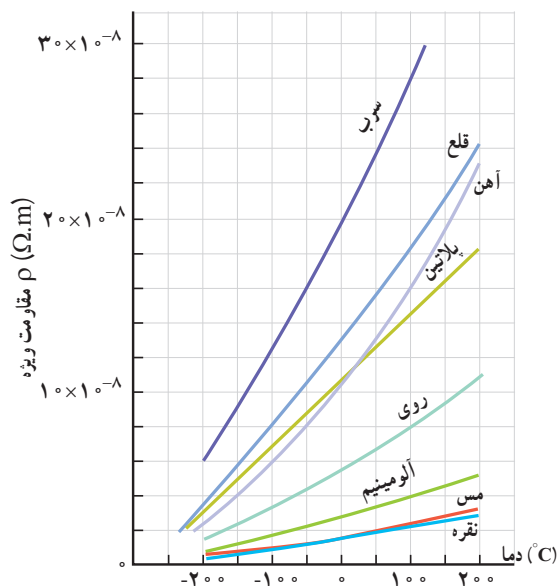
عبور جریان زیاد می‌شود؛ مثلاً در یک لامپ رشته‌ای حبایی (شکل ۲-۱۳) مقاومت آن با افزایش دمای رشته به شدت افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت ویژه فلزات در یک گستره دمایی نسبتاً بزرگ با دما تقریباً به طور خطی تغییر می‌کند. شکل ۲-۱۴، مقاومت ویژه برخی از فلزات را در محدوده‌ای از دما نشان می‌دهد. یک تقریب تجربی خوب که برای اغلب مقاصد، به حد کافی مناسب است توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2-4)$$

شکل ۲-۱۳ عبور جریان از رشته (فیلامان) تنگستنی موجب درخشش لامپ حبایی شده است.

که در آن T_0 دمای مرجع و ρ مقاومت ویژه در آن دماست (معمولاً T_0 را دمای اتاق $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293\text{K}$ می‌گیرند) و α ثابتی موسوم به ضریب دمایی مقاومت ویژه و T دمای رسانا (برحسب $^\circ\text{C}$ یا K) است. یکای α در این رابطه K^{-1} (یا $1/^\circ\text{C}$) است.

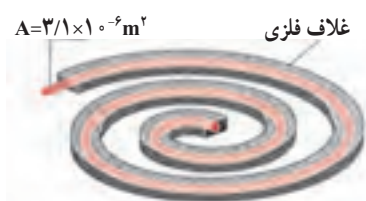
اگر یک نیم‌رسانا داشته باشیم، در دماهای پایین تعداد حامل‌های بار^۱ ناچیز است و نیم‌رسانا مانند یک نارسانا رفتار می‌کند. با افزایش دما، نشان داده می‌شود بر تعداد این حامل‌های بار افزوده می‌گردد. گرچه با افزایش دما تعداد برخوردهای کاتوره‌ای حامل‌های بار با شبکه اتمی افزایش می‌یابد، اما تأثیر افزایش تعداد حامل‌های بار بیشتر از افزایش این برخوردهای کاتوره‌ای است. به این ترتیب، مقاومت ویژه نیم‌رساناها با افزایش دما کاهش می‌یابد. ضریب دمایی مقاومت ویژه برخی از مواد در جدول ۲-۲ داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید این ضریب برای نیم‌رساناها منفی است که به معنی کاهش مقاومت ویژه این مواد با افزایش دما است.



شکل ۲-۱۴ نمودار مقاومت ویژه چند فلز در یک گستره دمایی

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

مثال ۲-۳



یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

شکل روبه‌رو، المنت یک اجاق برقی را نشان می‌دهد. این المنت شامل سیمی به طول $1/1\text{ m}$ و سطح مقطع $3/1 \times 10^{-6}\text{ m}^2$ است که داخل ماده‌ای عایقی قرار گرفته است که خود، درون یک غلاف فلزی است. با عبور جریان، المنت داغ می‌شود. مقاومت ویژه ماده‌ی سازنده سیم در دمای $T_0 = 32^\circ\text{C}$ برابر با $\rho_0 = 6/8 \times 10^{-5}\Omega\cdot\text{m}$ است و ضریب دمایی مقاومت ویژه آن $\alpha = 2/0 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ است. مقاومت سیم در دمای 42°C چقدر است؟

پاسخ: مقاومت ویژه ρ را از رابطه $\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$ حساب می‌کنیم:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] = (6/8 \times 10^{-5}\Omega\cdot\text{m})[1 + (2/0 \times 10^{-3}\text{K}^{-1})(10^\circ\text{K})] = 8/2 \times 10^{-5}\Omega\cdot\text{m}$$

حال از رابطه ۲-۳ مقاومت سیم در دمای 42°C برابر است با

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

مثال ۲-۴: دماسنج مقاومت پلاتینی



تصویری از یک 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 گستره‌ی دمایی حدوداً از 14K تا 1235K استفاده کرد. اساس کار دماسنج‌های مقاومت پلاتینی مبتنی بر تغییر مقاومت الکتریکی با دماست. در این دماسنج‌ها از پلاتین استفاده می‌کنند که تقریباً دچار خوردگی نمی‌شود و نقطه‌ی ذوب بالایی دارد.

فرض کنید در دمای 20°C مقاومت پلاتین یک دماسنج برابر با 164Ω باشد.

وقتی این دماسنج در محلول خاصی قرار گیرد، مقاومت آن 187Ω می‌شود. دمای این محلول چقدر است؟ (مقدار دقیق α برای پلاتین برابر $3/92 \times 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ است.)

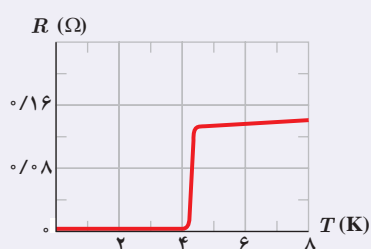
پاسخ: چون مقاومت R رابطه‌ی مستقیمی با مقاومت ویژه ρ دارد ($R = \rho L / A$)، آن‌گاه از رابطه ۲-۴ نتیجه می‌گیریم:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

که در آن $R_0 = \rho_0 \frac{L}{A}$ مقاومت سیم در دمای $T_0 = 20^\circ\text{C}$ است. با جایگذاری مقادیر معلوم در معادله بالا خواهیم داشت:

$$187\Omega = (164\Omega)[1 + (3/92 \times 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1})(T - 20^\circ\text{C})] \Rightarrow T = 55/8^\circ\text{C}$$

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



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

عنصر	دمای بحرانی (K)
تنگستن	۰/۰۱۵۴
بریلیم	۰/۰۲۶
تیتان	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

در اوایل قرن بیستم میلادی پدیده شگفت‌انگیزی برای برخی از فلزات در دمای خیلی پایین مشاهده شد و دریافتند با کاهش دما، مقاومت ویژه این فلزات در دمای خاصی موسوم به دمای بحرانی^۲، ناگهان به صفر افت می‌کند و از آن دما پایین‌تر همچنان صفر باقی می‌ماند. به این پدیده ابررسانایی می‌گویند. فیزیک‌دان هلندی کامرلینگ/ونتر^۳ در سال ۱۹۱۱ برای نخستین بار، این پدیده را برای جیوه مشاهده کرد و دریافت که در دمای حدود ۴K مقاومت ویژه جیوه به‌طور ناگهانی صفر می‌شود (شکل را ببینید). دمای بحرانی برای فلزات ابررسانای مختلف، متفاوت است، ولی برای اغلب آنها نزدیک به صفر کلون 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 نمونه 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.

برای اینکه به درکی از پدیده 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 محرکه شاره استفاده کنید؛ زیرا اگر اصطکاکی نباشد برای ادامه حرکت یکنواخت نیاز به هیچ نیروی خارجی‌ای نخواهد بود. مثلاً اگر این شاره را در لوله 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. کاپیتز^۴ فیزیک‌دان روسی در سال ۱۹۳۷ میلادی مشاهده کرد که هلیوم مایع اگر تا زیر ۲/۱۲K سرد شده باشد، چسبندگی بسیار ناچیزی خواهد داشت و در قیاس با ابررساناها به این هلیوم ابرشاره گفته می‌شود. پس شارش مایع بدون چسبندگی، مانند جریان الکتریکی در ابررساناهاست. به همین ترتیب اگر در یک حلقه ابررسانا جریانی الکتریکی ایجاد کنیم، پس از حذف نیروی محرکه الکتریکی جریان متوقف نخواهد شد و برای مدتی طولانی ادامه خواهد یافت. فیزیک‌دانی به نام کالینز^۵ در سال ۱۹۵۶ میلادی توانست

جریان ثابتی را در یک حلقه ابررسانا به مدت ۲/۵ سال حفظ کند. بنابراین، ابررسانایی اهمیت بالقوه زیادی در فناوری دارد؛ زیرا بدان معناست که بار می‌تواند بدون اتلاف انرژی در داخل یک ابررسانا جریان پیدا کند، و کشف مواد سرامیکی که می‌توانند در دمای بالا ابررسانا شوند وعده روزی را می‌دهد که وسایل ابررسانا در دمای اتاق به کار گرفته شوند.

۱— Super — Conductivity

۲— Critical Temperature

۳— Kamerlingh Onnes

۴— P. L. Kapitza

۵— T. Collins

خوب است بدانید: نمره بندی سیم‌ها

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

در صنعت تولید سیم، سیم‌ها را با ضخامت‌های معینی 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 معین کُد (نمره) مشخصی را اختصاص می‌دهند. جدول صفحه بعد، برخی از این نمره‌بندی‌ها با جریان مجاز بیشینه چند سیم را براساس استاندارد بین‌المللی SWG^۱ و استاندارد آمریکایی AWG^۲ نشان می‌دهد.

مثال ۲-۵

سیم کشی خانه‌ها معمولاً با سیم‌های مسی نمره ۱۴ براساس 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

$$A = \pi r^2 = \pi D^2 / 4 = (3/14)(2/0.32 \times 10^{-3} \text{ m})^2 / 4 = 3/24 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

از طرفی مقاومت ویژه سیم مسی در دمای ۲۰°C با استفاده از جدول ۲-۲، برابر $1/69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ و طول سیم مسی ۱۰۰ m است. بنابراین، با استفاده از رابطه $R = \rho L / A$ برای مقاومت سیم مسی خواهیم داشت:

$$R = \rho \frac{L}{A} = (1/69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \frac{(100 \text{ m})}{(3/24 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} = 0.522 \Omega$$

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.

۱- **مقاومت‌های پیچ‌ای**^۳ شامل پیچ‌های از یک سیم نازک‌اند که معمولاً جنس آنها از آلیاژهایی مانند

۱- Standard Wire Gauge

۲- American Wire Gauge

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

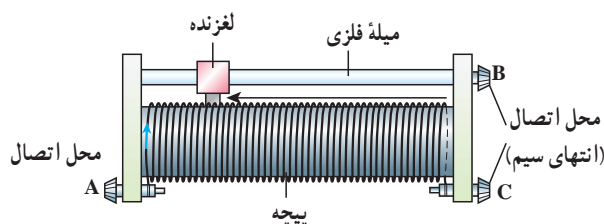


(ب) تصویری از یک مقاومت پیچهای

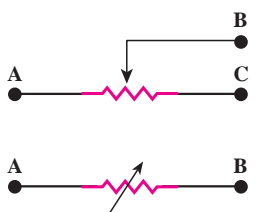
شکل ۲-۱۵

نیکروم^۱ یا منگانه^۲ است. شکل ۲-۱۵ الف نمونه‌ای از ساختار چنین مقاومت‌هایی را نشان می‌دهد. این مقاومت‌ها برای به دست آوردن مقاومت‌های پایین بسیار دقیق و همچنین توان‌های بالا ساخته می‌شوند. بیشینه توان الکتریکی که این مقاومت‌ها می‌توانند تحمل کنند، بی‌آنکه بسوزند روی آنها نوشته شده است (شکل ۲-۱۵ ب).

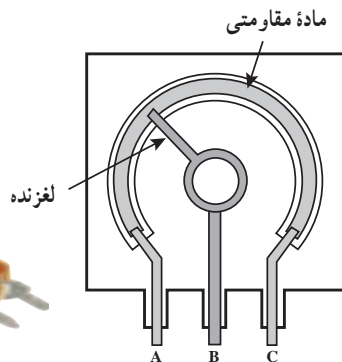
یکی از انواع مشهور مقاومت‌های پیچهای، **رئوستا**^۳ نام دارد که یک نوع مقاومت متغیر است. در مدارهای الکترونیکی وسیله‌ای به نام **پتانسیومتر**^۴ به نوعی همان نقش را انجام می‌دهد. این نوع مقاومت‌ها، متغیرند. یک رئوستا از سیمی با مقاومت ویژه نسبتاً زیاد ساخته شده است. در یکی از انواع رئوستا (رئوستای خطی)، 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 دهد (شکل ۲-۱۶).



الف) طرحی از ساختار یک رئوستای خطی



ب) نماد یک رئوستا یا پتانسیومتر در مدار الکتریکی



ث) تصویری واقعی از یک پتانسیومتر

ت) طرحی از یک پتانسیومتر



پ) تصویر واقعی یک رئوستای خطی

شکل ۲-۱۶

۲- **مقاومت‌های ترکیبی**^۵ معمولاً از کربن، برخی نیم‌رساناها، و یا لایه‌های نازک فلزی ساخته شده‌اند. مقاومت‌های ترکیبی را در اندازه‌های خاص استاندارد تولید می‌کنند. مقدار این مقاومت‌ها یا روی آنها نوشته می‌شود، یا عمدتاً به صورت کدی رنگی نشان داده می‌شود که با ۳ یا ۴ حلقه رنگی روی آنها مشخص شده است (شکل ۲-۱۷). هر رنگ، معرّف عددی است که در جدول ۲-۳

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

۱- Nichrome (آلیاژ نیکل و کرم)

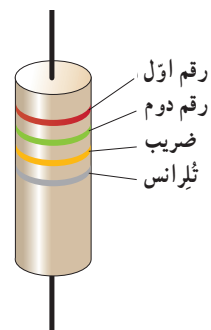
۲- Manganin (نیکل و منگنز)

۳- Rheostat

۴- 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.

۵- composition resistors

داده شده است. دو حلقهٔ اول (از آن طرفی که به یک سر مقاومت نزدیک تر است) به ترتیب، رقم اول و رقم دوم مقاومت را نشان می‌دهند. رقم حلقهٔ سوم ضربی است به صورت 10^n که در ستون سوم جدول مشخص شده است. حلقهٔ چهارم یک حلقهٔ طلایی یا نقره‌ای رنگ است که **تولرانس**^۱ نامیده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت را برحسب درصد مشخص می‌کند (شکل ۲-۱۸). نبود نوار چهارم به معنای آن است که تولرانس ۲۰ درصد است. برای خواندن حلقه‌های رنگی، مقاومت را طوری به دست می‌گیریم که حلقهٔ تولرانس در سمت راست قرار گیرد و بقیهٔ حلقه‌ها را از سمت چپ به راست می‌خوانیم.



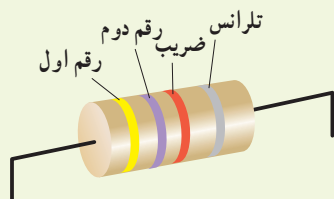
شکل ۲-۱۸ مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل $25k\Omega$ با تولرانس ۱۰ درصد است.



شکل ۲-۱۷ تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی

تمرین ۲-۲

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

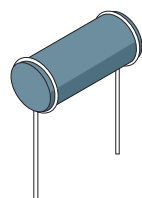


مقاومت‌های خاص و دیودها :

۱- **ترمیستور**^۲: 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 (شکل ۲-۱۹).

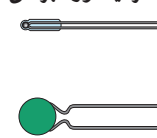


(ب)

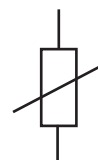


ترمیستور میله‌ای

ترمیستور مهره‌ای



ترمیستور دیسکی



نماد ترمیستور در مدار الکتریکی

شکل ۲-۱۹ الف) طرحی از چند ترمیستور و نماد آن در مدارهای الکتریکی و ب) تصویری از چند ترمیستور دیسکی واقعی

^۱ - tolerance

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

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

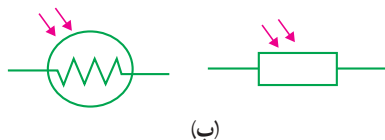


۲- مقاومت‌های نوری^۱ (LDR): مقاومت نوری، نوعی مقاومت است که مقاومت الکتریکی آن به نور تابیده شده به آن بستگی دارد، به طوری که با افزایش شدت نور، از مقاومت آن کاسته می‌شود. مثلاً یک LDR نوعی در تاریکی مقاومتی چند مگا اهمی دارد، در حالی که در یک نور مناسب، مقاومت آن به چند صد اهم می‌رسد. نوعی از این مقاومت‌ها از جنس نیم‌رسانای خالص، مانند سیلیسیم هستند که با افزایش شدت نور تابیده شده، بر تعداد حامل‌های بار الکتریکی آنها افزوده شده و در نتیجه از مقاومت آنها کاسته می‌شود. مثلاً شکل ۲-۲۰ مقاومت الکتریکی چنین LDRهایی را بر حسب شدت روشنایی^۲ (که با یکای LUX سنجیده می‌شود) نشان می‌دهد. شکل ۲-۲۱ الف تصویری از چند LDR و شکل ۲-۲۱ ب دو نماد این مقاومت‌ها در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد.

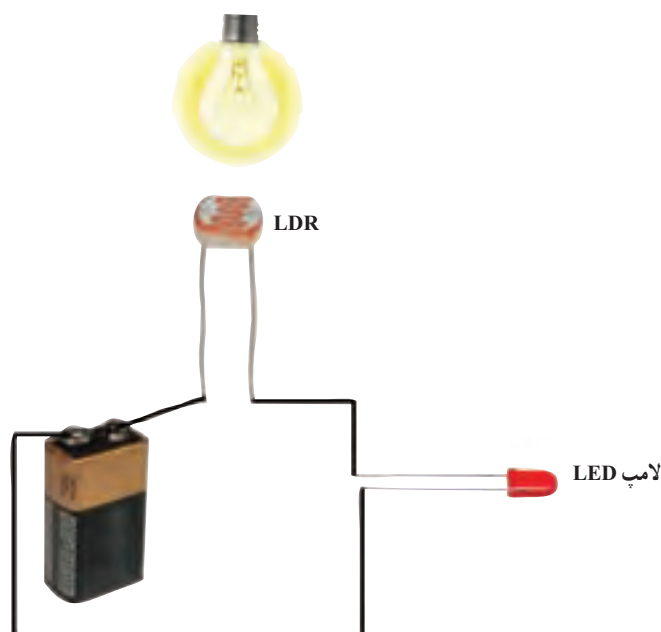
برای اینکه به درکی از ساز و کار این مقاومت‌ها برسید، شکل ۲-۲۲ را در نظر بگیرید که در آن یک LDR در مداری ساده به یک لامپ LED متصل شده است. تا هنگامی که لامپ روشنایی شکل خاموش باشد، LDR مقاومت بالایی دارد و مانع از روشن شدن لامپ LED می‌شود. با روشن شدن لامپ روشنایی از مقاومت LDR کاسته می‌شود و لامپ LED روشن می‌گردد. با تنظیم 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، کنترل‌کننده‌های خودکار، و چراغ‌های روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شود.



(الف)



شکل ۲-۲۱ الف) تصویری از چند LDR
ب) نماد LDR در دو استاندارد متفاوت



شکل ۲-۲۲ یک مدار ساده متشکل از یک LDR، یک باتری، و یک لامپ LED. با روشن شدن چراغ روشنایی لامپ LED روشن می‌شود.

^۱ Photoresistor

^۲ Light Dependent Resistor

^۳ Illumination

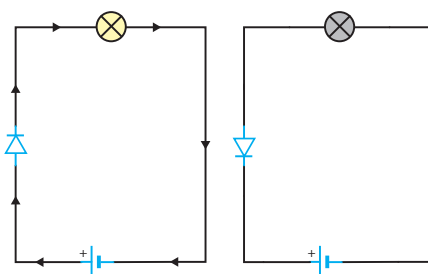
فناوری و کاربرد



شکل ۲-۲۳ اجزای داخلی یک مدار کنترل کننده نوری، که در نوعی از چراغ‌های روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شود.

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، اتصال‌های لامپ‌های روشنایی به منبع اصلی جریان را قطع می‌کند. در شب که نوری به LDR برخورد نمی‌کند، گرم‌کن خاموش می‌ماند و بدین ترتیب، اتصال‌های لامپ‌های روشنایی برقرار مانده و لامپ‌ها روشن می‌مانند (شکل ۲-۲۳).

۳- دیودها^۱: دیود قطعه‌ای است که هرگاه در مداری قرار گیرد، جریان را تنها از یک سو عبور می‌دهد و مقاومت آن در برابر عبور جریان در این سو ناچیز است. به همین دلیل، دیود را اغلب به عنوان یک سوکننده جریان در نظر می‌گیرند و آن را با نماد $\rightarrow|$ در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهند. پیکان در این نماد جهتی را نشان می‌دهد که جریان می‌تواند از دیود عبور کند. مثلاً مدارهای ساده شکل ۲-۲۴ 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.

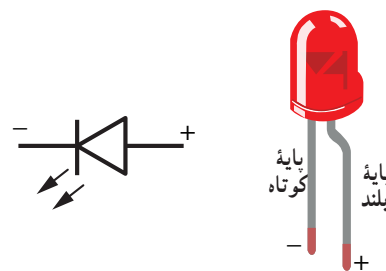


شکل ۲-۲۴ دیود در یک جهت جریان را عبور می‌دهد و در جهت مخالف مانع عبور جریان می‌شود.

دیودها انواع متفاوتی دارند که یکی از معروف‌ترین آنها دیودهای نورگسیل یا LED^۲ است (شکل ۲-۲۵). شکل ۲-۲۶ 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. فناوری LED در دهه ۹۰ میلادی با تولید LEDهایی که قابلیت تولید نور آبی و سفید داشتند، دستخوش تحول بزرگی شد. LED 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 به دلیل نداشتن رشته به هنگام تولید نور انرژی گرمایی زیادی تولید نمی‌کنند.

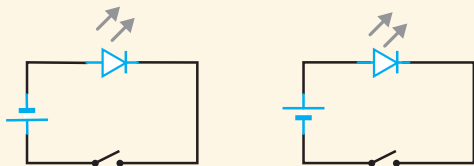


شکل ۲-۲۵ تصویری از چند دیود نورگسیل



شکل ۲-۲۶ تصویری از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی

در کدام شکل با بستن کلید، LED روشن می‌شود؟

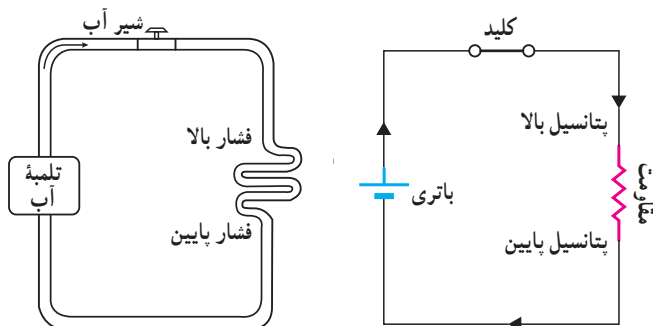


۲-۴ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

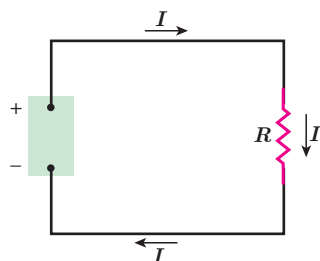
برای بالا بردن آب از سطح زمین به یک تلمبه آب نیاز است تا آب را به ارتفاع معینی برساند. بدین ترتیب، آب انرژی پتانسیل گرانشی لازم برای جریان یافتن و انجام کار معینی را کسب می‌کند (شکل ۲-۲۷). برای اینکه بارهای الکتریکی را نیز از یک مقاومت الکتریکی عبور دهیم تا جریان ثابتی برقرار شود، لازم است بین دو سر مقاومت اختلاف پتانسیلی برقرار کنیم. این کار می‌تواند توسط وسیله‌هایی مانند باتری انجام شود. به چنین وسیله‌هایی که با انجام کار روی بار الکتریکی، جریان ثابتی از بارهای الکتریکی در یک مدار ایجاد می‌کند، منبع نیروی محرکه الکتریکی (\mathcal{E}) گفته می‌شود. منبع‌های نیروی محرکه 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 ۲-۲۸).



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



شکل ۲-۲۸ همان‌طور که تلمبه آب انرژی لازم برای شارش آب را فراهم می‌کند، باتری نیز انرژی لازم برای برقراری یک جریان را مهیا می‌سازد.



شکل ۲-۲۹ یک مدار ساده الکتریکی شامل مقاومت R . منبع نیروی محرکه الکتریکی و سیم‌های رابط

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

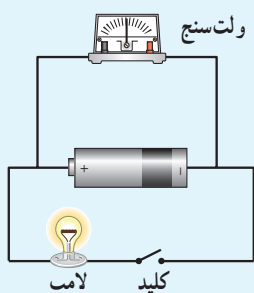
مدار ساده الکتریکی شکل ۲-۲۹ را در نظر بگیرید. منبع نیروی محرکه هنگام عبور بار Δq از منبع کاری به اندازه ΔW روی آن انجام می‌دهد تا آن را در مدار به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی محرکه الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا آن را از پایانه با پتانسیل کمتر به پایانه

با پتانسیل بیشتر ببرد، اصطلاحاً نیروی محرکه الکتریکی (emf) نامیده و با رابطه زیر تعریف می‌شود^۱:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta W}{\Delta q} \quad (۵-۲)$$

یکای کمیت نیروی محرکه الکتریکی همان یکای اختلاف پتانسیل الکتریکی، یعنی ولت (V) است (۱V=۱J/۱C). پس اگر نیروی محرکه 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 ۲-۴



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

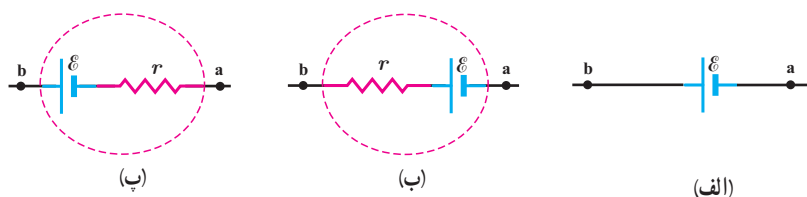
منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی، یا آرمانی هستند و یا واقعی. اگر پایانه‌های منفی و مثبت یک منبع نیروی محرکه را به ترتیب با a و b نمایش دهیم، اختلاف پتانسیل میان این دو پایانه برای یک منبع آرمانی برابر با نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} آن است:

$$V_b - V_a = \mathcal{E} \quad (۶-۲)$$

فعالیت ۲-۵

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

منبع آرمانی در واقعیت وجود ندارد و منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی همواره دارای مقاومتی داخلی (r) هستند؛ یعنی درون آنها مقاومتی در برابر حرکت بارها وجود دارد. بنابراین، وقتی جریان از این منابع بگذرد، اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های آنها برخلاف منابع آرمانی، متفاوت از نیروی محرکه الکتریکی خواهد شد. شکل ۲-۳ نماد منبع نیروی محرکه را در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ در مدارهای الکتریکی، منبع نیروی محرکه الکتریکی آرمانی را به صورت (الف) و منبع‌های واقعی را به صورت (ب) یا (پ) نمایش می‌دهند.

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

خوب است بدانید: ماهی الکتریکی



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

خوب است بدانید: آثار تخریبی الکتریسته بر بدن انسان

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

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

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

مدار تک حلقه‌ای و افت پتانسیل در مقاومت : مدار ساده‌ی تک حلقه‌ای شکل ۲-۳۱ را در

نظر بگیرید. این مدار شامل باتری آرمانی B با نیروی محرکه \mathcal{E} ، مقاومت R ، و دو سیم رابط است. فرض کنید می‌خواهیم از نقطه 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 نقطه a مثلاً به‌طور ساعتگرد شروع کنیم، نخست با باتری B مواجه می‌شویم. همان‌طور که دیدیم با حرکت از پایانه منفی باتری به سمت پایانه مثبت آن پتانسیل الکتریکی به اندازه $\mathcal{E} +$ 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 رابطه $\Delta V = IR$ تغییر می‌کند، ولی توجه کنید پتانسیل باید کاهش یابد؛ زیرا ما از طرف پتانسیل بالاتر به سمت پتانسیل پایین‌تر حرکت کرده‌ایم (شکل ۲-۳۲). 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 نقطه a بازگردیم چون مقاومت این سیم نیز ناچیز فرض شده است باز تغییر پتانسیل نخواهیم داشت. با بازگشت به نقطه a، پتانسیل دوباره برابر با پتانسیل نقطه a می‌شود؛ یعنی می‌توان نوشت :

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

و با حذف V_a از دو طرف معادله بالا به رابطه زیر می‌رسیم :

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

این رابطه نشان می‌دهد که جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در مدار ما برابر با صفر است. توجه کنید که اگر حلقه را در خلاف جهت نشان داده شده در شکل دور می‌زدیم به رابطه $-\mathcal{E} + IR = 0$ می‌رسیدیم که همان رابطه بالاست. در حالت کلی جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در هر حلقه صفر است. به این قاعده، **قاعده حلقه** می‌گویند. قاعده 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 قاعده حلقه چیزی جز پایداری انرژی نیست (تمرین ۲-۴ را ببینید). اکنون اگر باتری آرمانی مدار شکل ۲-۳۱ را با یک باتری واقعی که مقاومت داخلی r دارد جایگزین کنیم (شکل ۲-۳۳)، با به کار بستن قاعده حلقه به رابطه زیر می‌رسیم :

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

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

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

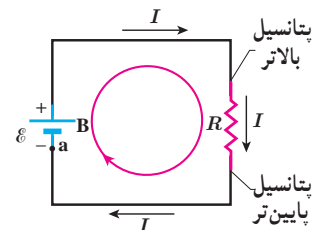
و یا

$$V_b - V_a = \mathcal{E} - Ir$$

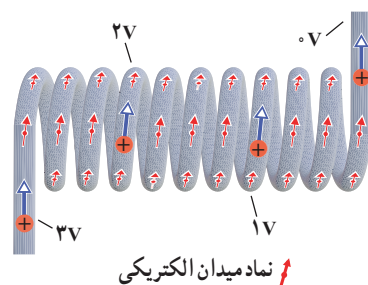
(۷-۲)

در حل مسئله‌های مدار تک حلقه‌ای همواره دو دستورالعمل ساده زیر را به کار می‌بندیم :

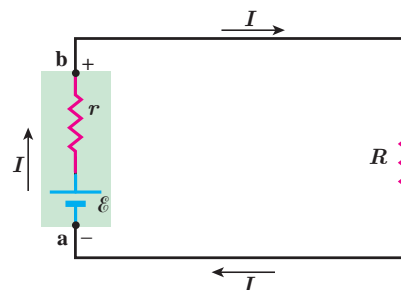
- ۱- هرگاه در مدار در جهت جریان از مقاومت مثلاً R بگذریم، پتانسیل به اندازه IR کاهش می‌یابد و اگر در خلاف جهت جریان حرکت کنیم پتانسیل به همان اندازه افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۳۱ مداری تک حلقه‌ای که در آن مقاومت R به دو سر باتری آرمانی B با نیروی محرکه \mathcal{E} بسته شده است. جریان I در کل مدار یکسان است.



شکل ۲-۳۲ با حرکت در جهت جریان در این مقاومت، پتانسیل پیوسته کاهش پیدا می‌کند.

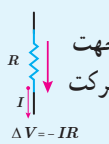
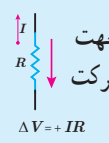
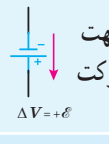
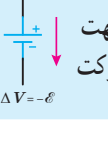


شکل ۲-۳۳ مدار تک حلقه‌ای شکل ۲-۳۱ که باتری آرمانی آن با یک باتری واقعی جایگزین شده است.



گوستاو کیرشهوف (۱۸۲۴-۱۸۸۷ م.)
گوستاو رابرت کیرشهوف^۱ در غرب آلمان کنونی به دنیا آمد. کیرشهوف سهمی اساسی در درک مدارهای الکتریکی، طیف‌نگاری، ترمودینامیک و تابش اجسام گرم داشته است. در واقع او نخستین کسی بود که واژه جسم سیاه را در سال ۱۸۶۲ به کار برد و دو قانون مهم در نظریه مدارهای الکتریکی (قاعده‌های حلقه و انشعاب) و ترمودینامیک به افتخار او نام‌گذاری شده است. کیرشهوف قانون مدارهای الکتریکی خود را در سال ۱۸۴۵ در حالی بی‌ریزی 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.

۲- هرگاه از پایانه منفی به طرف پایانه مثبت یک منبع نیروی محرکه حرکت کنیم، پتانسیل به اندازه \mathcal{E} افزایش می‌یابد و اگر در خلاف این جهت (یعنی از پایانه مثبت به طرف پایانه منفی) حرکت کنیم پتانسیل به اندازه \mathcal{E} کاهش می‌یابد. در جدول ۲-۴ این دستورالعمل‌ها خلاصه شده‌اند.

جدول ۲-۴ جدول قرارداد تعیین علامت اختلاف پتانسیل‌ها در یک مدار تک حلقه‌ای، شامل مقاومت و منبع نیروی محرکه الکتریکی			
عناصر مدار	جهت حرکت	تغییر پتانسیل	
مقاومت	در جهت جریان	$-IR$	جهت حرکت 
مقاومت	در خلاف جهت جریان	$+IR$	جهت حرکت 
منبع نیروی محرکه	از پایانه منفی به پایانه مثبت	$+\mathcal{E}$	جهت حرکت 
منبع نیروی محرکه	از پایانه مثبت به پایانه منفی	$-\mathcal{E}$	جهت حرکت 

مثال ۲-۶

در مدار شکل ۲-۳۳ فرض کنید $\mathcal{E} = 12\text{V}$ ، $r = 2/\Omega$ و $R = 4/\Omega$ باشد.
الف) جریان عبوری از مدار چقدر است؟ ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری را محاسبه کنید.
پاسخ: الف) اگر مدار را در جهت جریان نشان داده شده دور بزنیم براساس آنچه گفته شد، در یک حلقه کامل با استفاده از قاعده حلقه داریم:

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

و در نتیجه

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

ب) با استفاده از رابطه ۲-۷ اختلاف پتانسیل دوسر باتری برابر است با

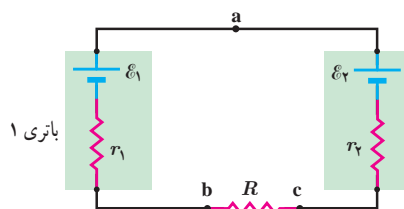
$$V_b - V_a = \mathcal{E} - Ir = 12\text{V} - (2/\text{A})(2/\Omega) = 8\text{V}$$

تمرین ۲-۳

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

^۱ - Gustav Robert Kirchhoff

مثال ۲-۷



مدار شکل روبه‌رو را در نظر بگیرید. مقادیر نیروهای محرکه الکتریکی و مقاومت‌های مدار عبارت‌اند از:

$$\mathcal{E}_1 = 8/0 \text{ V}, \mathcal{E}_2 = 2/0 \text{ V}, r_1 = 2/0 \Omega, r_2 = 1/5 \Omega \text{ و } R = 8/5 \Omega$$

(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 حل مدارهای تک حلقه‌ای، مسئله را حل می‌کنیم. گرچه لازم نیست که جهت جریان I را بدانیم، ولی می‌توانیم آن را با مقایسه نیروهای محرکه الکتریکی دو باتری تعیین کنیم؛ چون $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$ است جهت جریان را باتری ۱ تعیین می‌کند. بنابراین، جهت جریان، ساعتگرد است. در نتیجه با حرکت پادساعتگرد از نقطه a داریم:

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

و از آنجا

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{r_1 + R + r_2} = \frac{8/0 \text{ V} - 2/0 \text{ V}}{2/0 \Omega + 8/5 \Omega + 1/5 \Omega} = 0/5 \text{ A}$$

(ب) اختلاف پتانسیل بین دوسر باتری ۱ را با حرکت از نقطه b به سمت نقطه a به دست می‌آوریم:

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

در نتیجه

$$V_a - V_b = \mathcal{E}_1 - Ir_1 = 8/0 \text{ V} - (0/5 \text{ A})(2/0 \Omega) = 7/0 \text{ V}$$

که این نتیجه را می‌توانستیم به‌طور مستقیم از رابطه ۲-۷ نیز به دست 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.

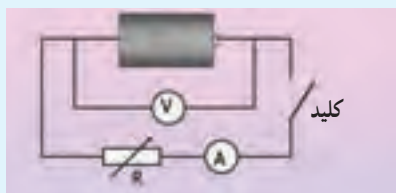
برای محاسبه اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ حتماً باید مسئله را از نو حل کرد. به این منظور، از نقطه c به سمت نقطه a حرکت می‌کنیم:

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

و در نتیجه:

$$V_a - V_c = \mathcal{E}_2 + Ir_2 = 2/0 \text{ V} + (0/5 \text{ A})(1/5 \Omega) = 2/8 \text{ V}$$

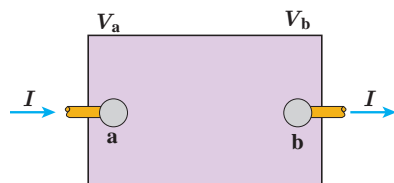
فعالیت ۲-۶ (کار در کلاس)



تفاوت یک باتری نو و فرسوده عمدتاً در مقدار مقاومت داخلی آن است که می‌تواند کمتر از یک اهم برای باتری نو تا چند هزار اهم برای باتری فرسوده باشد. برای اندازه‌گیری مقاومت داخلی یک باتری مدار ساده‌ای متشکل از یک باتری، یک کلید قطع و وصل، و یک مقاومت یا لامپ کوچک را سوار کنید. نخست درحالی که کلید

قطع است، ولتاژ دو سر باتری را با یک ولت‌سنج اندازه بگیرید و آن‌گاه پس از بستن کلید، دوباره ولتاژ دو سر باتری را اندازه بگیرید. همچنین در این حالت، جریان عبوری از مدار را نیز باید به کمک یک آمپرسنج اندازه بگیرید. اکنون با استفاده از رابطه ۲-۷ مقاومت داخلی باتری را محاسبه کنید (البته در یک اندازه‌گیری دقیق‌تر معمولاً از یک مقاومت متغیر استفاده می‌شود و مقاومت داخلی پس از چندین اندازه‌گیری محاسبه می‌شود). آزمایش را یک بار برای باتری نو و یک بار برای باتری فرسوده انجام دهید.

۵-۲ توان در مدارهای الکتریکی



شکل ۵-۲ یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی بین دوسر آن برقرار است.

$$P = I(V_b - V_a)$$

این جز، به بقیه مدار انرژی می دهد $\Rightarrow P > 0$ اگر
این جز، از بقیه مدار انرژی می گیرد $\Rightarrow P < 0$ اگر

اکنون می خواهیم رابطه هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به دست آوریم. جعبه شکل ۵-۲ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می دهد که می تواند شامل باتری، مقاومت و یا هر چیز دیگری باشد که اختلاف پتانسیلی بین پایانه های آن برقرار است. فرض کنید بار q در مدت زمان t تحت اختلاف پتانسیل $\Delta V = V_b - V_a$ از پایانه a به پایانه 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:

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

$$P = I \Delta V \quad (۸-۲)$$

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

توان الکتریکی مصرفی در یک مقاومت: همان طور که گفتیم رابطه ۵-۲ برای مقاومت های الکتریکی نیز برقرار است. برای یک مقاومت، همان طور که پیش از این دیدیم ΔV را با V نشان می دهیم. برای محاسبه مقدار توان مصرفی، کافی است در این رابطه به جای V از رابطه تعریف مقاومت ($R = V/I$) استفاده کنیم:

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

در نتیجه:

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

$$P_{\text{مصرفی}} = \frac{V^2}{R} \quad (۱۰-۲)$$

مثال ۵-۲

وقتی دو سر یک بخاری برقی را به اختلاف پتانسیل 220 V وصل کنیم، جریان 10 A از آن می گذرد. الف) توان این بخاری چقدر است؟ ب) اگر این بخاری به مدت 3 h در روز کار کند و قیمت برق مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت 50 تومان باشد، هزینه یک ماه مصرف این بخاری چقدر می شود؟

پاسخ: الف) بنا به رابطه ۵-۲ توان مورد نیاز بخاری چنین می شود:

$$P = I \Delta V = (10\text{ A})(220\text{ V}) = 2200\text{ W} = 2.2\text{ kW}$$

ب) انرژی مصرفی بخاری برابر Pt می شود که بر حسب یکاهای SI، P بر حسب وات (W)، t بر حسب ثانیه (s) است و انرژی مصرفی بر حسب ژول (J) می شود. اما برای محاسبه مصرف برق، P را بر حسب کیلووات (kW) و t را بر حسب ساعت (h) می گیرند. بنابراین، انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت (kWh) می شود ($1\text{ kWh} = (1000\text{ J/s})(3600\text{ s}) = 3.6 \times 10^6\text{ J}$).

پس انرژی مصرفی بخاری در یک ماه، برابر است با

$$U = Pt = (2/2 \text{ kW})(30 \times 24 \text{ h}) = 198 \text{ kWh}$$

در نتیجه بهای برق مصرفی این بخاری در یک ماه چنین می شود :

$$\text{تومان} = (198 \text{ kWh}) \left(\frac{50 \text{ تومان}}{\text{kWh}} \right) = 9900 \text{ تومان}$$

فعالیت ۲-۷



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

فعالیت ۲-۸



الف) همانند شکل با یک اهم متر، مقاومت رشته سیم داخل لامپ ۱۰۰ واتی را اندازه گیری کنید. سپس با استفاده از رابطه ۲-۱۰ و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. نتیجه محاسبه را با مقدار اندازه گیری شده مقایسه کنید و نتیجه را پس از گفت و گوی گروهی گزارش دهید.

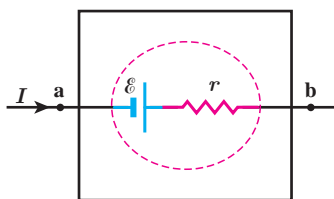
ب) اکنون با استفاده از نتیجه به دست آمده، دمای رشته سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشته سیم لامپ از جنس تنگستن و ضریب دمایی مقاومت ویژه آن $4/5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ است).

پرسش ۲-۲



اگر لامپ های رشته ای (التهابی) را با لامپ های LED جایگزین کنیم، درخواهیم یافت که در مصرف انرژی تفاوت چشمگیری حاصل می شود. مثلاً درحالی که لامپ هالوژن یک کلاه ایمنی چند باتری را در ۳ ساعت مصرف می کند، نوع LED همان لامپ، آن باتری ها را در ۳۰ ساعت به مصرف می رساند. دلیل این اختلاف را بیان کنید.

۱- مقاومت ویژه تنگستن در یک گستره بزرگ دمایی تا نزدیکی نقطه ذوبش در $3400 \text{ } ^\circ\text{C}$ رفتاری خطی دارد.



شکل ۳۵-۲ توان خروجی از باتری شکل، از رابطه $P = (V_b - V_a)I$ به دست می‌آید.

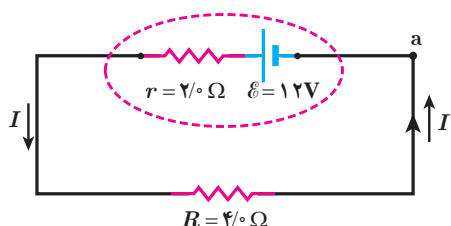
توان خروجی یک منبع نیروی محرکه واقعی: در بخش پیش اختلاف پتانسیل ΔV دو سر یک باتری واقعی را مانند شکل ۳۵-۲ به صورت $\mathcal{E} - Ir$ به دست آوردیم. با قرار دادن این اختلاف پتانسیل در رابطه توان الکتریکی خواهیم داشت:

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

$$P_{\text{خروجی}} = \mathcal{E}I - rI^2 \quad (۱۱-۲)$$

که این توان خروجی یک باتری واقعی است. همان طور که می‌بینیم این توان به اندازه rI^2 (توان مصرفی در مقاومت داخلی باتری) با توان تولیدی باتری ($\mathcal{E}I$) متفاوت است. اگر باتری آرمانی باشد ($r=0$) توان خروجی با توان تولیدی آن برابر است.

مثال ۹-۲



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 قاعده حلقه به دست می‌آوریم:

$$V_a + \mathcal{E} - Ir - IR = V_a \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{12V}{4\Omega + 2\Omega} = 2A$$

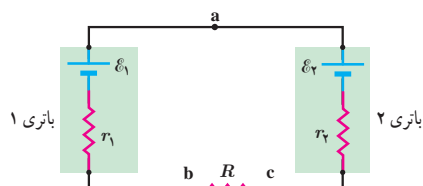
اکنون توان الکتریکی خروجی از باتری با استفاده از رابطه ۱۱-۲ چنین می‌شود:

$$P_{\text{خروجی}} = \mathcal{E}I - rI^2 = (12V)(2A) - (2\Omega)(2A)^2 = 16W$$

ب) با استفاده از پایداری 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 به طور مستقیم نیز نشان دهیم:

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

مثال ۱۰-۲



در مثال ۷-۲ توان هریک از اجزای مدار را محاسبه کنید.

پاسخ: توان مصرفی در مقاومت $R = 8\Omega$ با استفاده از رابطه ۹-۲ چنین می‌شود:

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (8\Omega)(0.5A)^2 = 2W$$

که در آن از $I = 0.5A$ استفاده کرده‌ایم.

توان خروجی باتری ۱ را با استفاده از رابطه ۱۱-۲ محاسبه می‌کنیم:

$$P_{\text{خروجی}} = \mathcal{E}_1 I - r_1 I^2 = (8V)(0.5A) - (2\Omega)(0.5A)^2 = 3.5W$$

اما توان باتری ۲ از رابطه ۱۱-۲ به دست نمی‌آید؛ زیرا همان طور که دیدیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ از رابطه

$V_a - V_c = \mathcal{E}_2 + Ir_2$ به دست می‌آید. اما طبق تعریف این کتاب، برای استفاده از رابطه ۸-۲، باید اختلاف

پتانسیل $V_c - V_a$ را در نظر بگیریم که $-(\mathcal{E}_2 + Ir_2)$ می‌شود. بنابراین، مقدار (قدر مطلق) توان ورودی به باتری ۲ چنین می‌شود:

$$P_{\text{ورودی}} = |P| = |I\Delta V| = I(\mathcal{E}_2 + Ir_2) = \mathcal{E}_2 I + r_2 I^2 \\ = (2V)(0.5A) + (1\Omega)(0.5A)^2 = 1.25W$$



این که باتری ۲ انرژی مصرفی خود را از باتری ۱ تأمین می کند، همان اتفاقی است که هنگام اتصال یک باتری به شارژکننده روی می دهد. شارژکننده به باتری انرژی الکتریکی می دهد. بخشی از این انرژی به انرژی شیمیایی تبدیل می شود و بقیه آن در مقاومت درون باتری تلف می شود و باتری را گرم می کند.

همان طور که انتظار داریم این نتیجه همچنین با پایداری انرژی سازگار است :

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

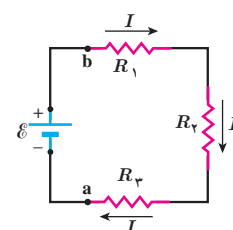
$$2/1W + 1/4W = 3/5W$$

تمرین ۲-۴

با توجه به قانون ژول (فعالیت ۲-۷) و تعریف نیروی محرکه الکتریکی، برای یک حلقه ساده، شامل یک باتری و یک مقاومت نشان دهید که قاعده حلقه یا قانون ولتاژها چیزی جز پایداری انرژی نیست.

۲-۶ ترکیب مقاومت ها

مقاومت ها در انواع وسایل الکتریکی دیده می شوند، از ساده ترین وسیله ها مانند بخاری های برقی و موخشک کن ها گرفته تا وسایل الکتریکی پیچیده تری مانند تلویزیون و رایانه ها. مدارهای این وسیله ها اغلب چندین مقاومت دارند؛ در نتیجه لازم است که ترکیبی از مقاومت ها را در نظر بگیریم. رشته ای از لامپ ها که در چراغانی ها به کار می رود، نمونه ساده ای از ترکیب مقاومت هاست که در آن هر لامپ به عنوان یک مقاومت عمل می کند و رشته لامپ ها از دیدگاه تحلیل مدار، ترکیبی است از مقاومت ها. ترکیب مقاومت ها ممکن است بسیار پیچیده باشد، اما کار کردن با دو نوع از این ترکیب ها بسیار ساده است : مقاومت های متوالی و مقاومت های موازی. وقتی مقاومت ها به طور متوالی، یا موازی یا ترکیبی از هر دو بسته شده باشند، آنها را می توانیم با یک مقاومت معادل جایگزین کنیم. در این بخش به این موضوع می پردازیم و اینکه چگونه می توان مقاومت معادل ترکیبی از مقاومت ها را تعیین کرد. به هم بستن متوالی مقاومت ها : شکل ۲-۳۶ سه مقاومت را نشان می دهد که به طور متوالی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} بسته شده اند. توجه کنید واژه «متوالی» ربط چندانی به چگونگی رسم مقاومت ها ندارد. «متوالی» به معنای بسته شدن مقاومت ها یکی پس از دیگری است، به طوری که هیچ انشعابی بین آنها وجود نداشته باشد و اختلاف پتانسیل V به دوسر این مجموعه از مقاومت ها اعمال شده باشد. در بستن متوالی مقاومت ها از همه مقاومت ها جریان یکسان I عبور می کند. به عبارتی اگر آمپرسنج هایی را در نقطه های مختلفی از این مدار قرار دهیم، همگی جریان یکسانی را نشان می دهند. مقاومت هایی را که به طور متوالی بسته شده اند می توان با یک مقاومت معادل R_{eq} جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دو سر مجموعه مقاومت ها و همان جریان I است. با به کارگیری قاعده حلقه، مثلاً با حرکت در جهت جریان I و با شروع از نقطه a و بازگشت دوباره



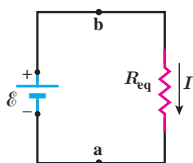
شکل ۲-۳۶ سه مقاومت که به طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده اند.

به آن، داریم :

$$V_a + \mathcal{E} - IR_1 - IR_2 - IR_3 = V_a$$

و در نتیجه

$$\mathcal{E} = IR_1 + IR_2 + IR_3$$



به عبارتی اختلاف پتانسیل کل اعمال شده، برابر با جمع اختلاف پتانسیل‌های دو سر مقاومت هاست:

$$V = \mathcal{E} = V_1 + V_r + V_r$$

اکنون به سراغ محاسبه جریان I می‌رویم. از رابطه بالا داریم:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_r + R_r}$$

با تعریف مقاومت معادل، به صورت

$$R_{eq} = R_1 + R_r + R_r$$

شکل ۳۷-۲ مدار معادل شکل ۳۶-۲

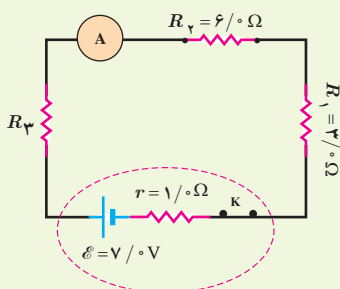
که در آن سه مقاومت با مقاومت R_{eq} جایگزین شده است.

مدار شکل ۳۶-۲ را می‌توان با مدار معادل شکل ۳۷-۲ جایگزین کرد. بدیهی است که اگر به جای سه مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آنها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (۱۲-۲)$$

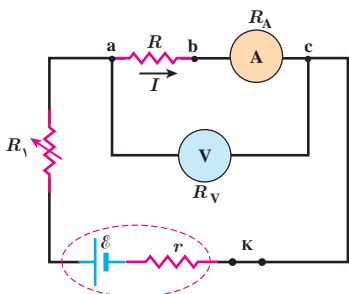
توجه کنید وقتی مقاومت‌ها به طور متوالی بسته شده‌اند، مقاومت معادل آنها بزرگ‌تر از مقاومت هر یک از آنهاست.

تمرین ۵-۲



در شکل روبه‌رو، سه مقاومت به همراه یک آمپرسنج به صورت 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 13Ω باشد (الف) مقاومت R_3 چقدر است؟ (ب) جریانی را که آمپرسنج نشان می‌دهد به دست آورید. (پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان‌های مصرفی مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_3 در مدار برابر است.

مثال ۱۱-۲



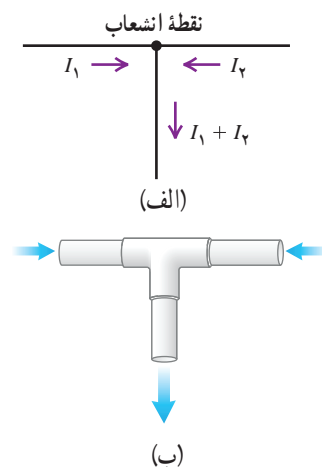
شکل روبه‌رو مداری را برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول R نشان می‌دهد. فرض کنید در این مدار ولت‌سنج $24V$ و آمپرسنج $200mA$ را نشان دهد. مقاومت ولت‌سنج $R_V = 10 \times 10^4 \Omega$ و مقاومت آمپرسنج $R_A = 10 \Omega$ است. مقاومت R را به دست آورید. **پاسخ:** مقاومت‌های R و R_A به طور متوالی به هم بسته شده‌اند و اختلاف پتانسیل دوسر آنها برابر با $24V$ است. با توجه به اینکه آمپرسنج جریان $200mA$ را نشان می‌دهد و به طور متوالی به مقاومت R بسته شده است، جریان عبوری از این دو مقاومت نیز برابر $200mA$ است:

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{24V}{0.2A} = 120\Omega$$

با توجه به اینکه $R_{eq} = R + R_A$ و $R_A = 10\Omega$ است مقاومت مجهول برابر با $R = 110\Omega$ می‌شود.

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

قاعده انشعاب و به هم بستن موازی مقاومت ها : یک نقطه انشعاب (گره) در مدار، نقطه ای است که در آن سه یا چند سیم به یکدیگر متصل شده اند. هر اتصالی بین دو نقطه انشعاب در مدار، شاخه نامیده می شود. یک شاخه می تواند شامل هر تعدادی از اجزای مختلف مدار و سیم های بین آنها باشد. از هر شاخه یک جریان می گذرد. در هر نقطه انشعاب از مدار قاعده ای برای جریان ها برقرار است که به صورت زیر بیان شده است و به آن قاعده انشعاب گفته می شود :



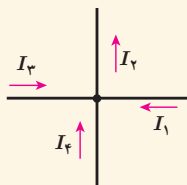
شکل ۲-۳۸ الف) طرحی از قاعده انشعاب. ب) مشابهت سازی اتصال لوله آب برای قاعده انشعاب

مجموع جریان هایی که به هر نقطه انشعاب وارد می شود برابر با مجموع جریان هایی است که از آن نقطه انشعاب خارج می شود.

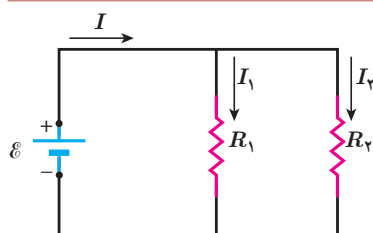
قاعده انشعاب در واقع مبتنی بر پایداری بار الکتریکی است و اینکه هیچ باری نمی تواند در یک نقطه انشعاب جمع گردد. بنابراین، مجموع بار وارد شده به هر نقطه انشعاب در واحد زمان باید برابر با مجموع بار خارج شده از آن نقطه در واحد زمان باشد (شکل ۲-۳۸ الف). همان طور که می دانیم بار عبوری در واحد زمان همان جریان است. بنابراین، پایداری بار، به قاعده انشعاب جریان می انجامد. این مشابهت یک اتصال سه راهی لوله های آب است (شکل ۲-۳۸ 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.

پرسش ۲-۲

برای نقطه انشعاب نشان داده شده در شکل، رابطه بین جریان ها را بنویسید.



مثال ۲-۱۲ *



در شکل روبه رو، یک باتری آرمانی اختلاف پتانسیل $\mathcal{E} = 12\text{V}$ را به دو سر مقاومت های $R_1 = 4\Omega$ و $R_2 = 6\Omega$ اعمال می کند. الف) جریان عبوری از هر مقاومت و ب) جریانی که از باتری می گذرد چقدر است؟

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

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

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

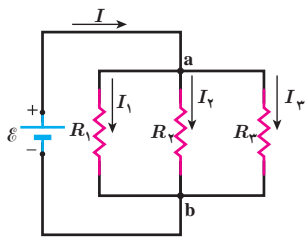
$$V_2 = \mathcal{E} = I_2 R_2 \Rightarrow I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} = \frac{12\text{V}}{6\Omega} = 2\text{A}$$

ب) اکنون با استفاده از قاعده انشعاب، جریان عبوری از باتری را می یابیم :

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

* حل مدارهای چندحلقه ای که در حلقه های مختلف از باتری استفاده می شود و همچنین سایر به هم بستن های مقاومت ها به غیر از به هم بستن متوالی و موازی جزء برنامه درسی این کتاب نبوده و نباید در آموزش و ارزشیابی ها مدنظر قرار گیرد.

مداری مانند مدار مثال ۲-۱۲ ببینید و در هر شاخه آن، یک آمپرسنج قرار دهید. با خواندن آمپرسنج‌ها، رابطه بین جریان‌ها را بررسی کنید.



شکل ۲-۳۹ مداری شامل سه مقاومت که به صورت موازی به نقطه‌های a و b بسته شده‌اند.

بستن مقاومت‌ها به صورت موازی: شکل ۲-۳۹ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که سه مقاومت به صورت موازی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} بسته شده‌اند. توجه کنید واژه «موازی» ارتباط چندانی به چگونگی رسم مقاومت‌ها ندارد؛ بلکه «به صورت موازی» به معنای آن است که یک سر مقاومت‌ها مستقیماً به یکدیگر و سر دیگر آنها نیز مستقیماً به هم وصل شده است و اختلاف پتانسیل یکسان V به دوسر این مقاومت‌ها اعمال شده است. بنابراین، هریک از مقاومت‌ها اختلاف پتانسیل یکسان V در دوسر خود دارد؛ یعنی:

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

مجموعه مقاومت‌هایی که به این روش متصل شده‌اند را می‌توان با یک مقاومت معادل R_{eq} جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل V و جریان کلی است که از مقاومت‌ها می‌گذرد. برای یافتن عبارتی برای R_{eq} نخست از قاعده انشعاب استفاده می‌کنیم. اگر این قاعده را برای نقطه a شکل ۲-۴۰ به کار ببریم خواهیم داشت:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

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

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

با قرار دادن این جریان‌ها در معادله حاصل از قاعده انشعاب خواهیم داشت:

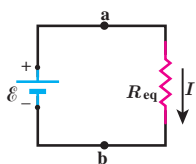
$$I = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

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

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

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

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2-13)$$



شکل ۲-۴۰ مدار معادل شکل ۲-۳۹ که در آن مقاومت معادل، R_{eq} جایگزین مقاومت‌های R_1, R_2, R_3 شده است.

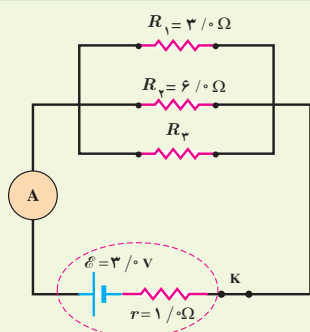
مدار شکل ۲-۳۹ به مدار معادل شکل ۲-۴۰ تبدیل می‌شود. توجه کنید هرگاه چند مقاومت به صورت موازی به هم بسته شوند، مقاومت معادل آنها کوچک‌تر از هریک از مقاومت‌های موجود در آن ترکیب است. برای اینکه به درکی از این نتیجه برسیم، دوباره مشابَه‌سازی با لوله‌های آب می‌تواند راه‌گشا باشد. اگر دو لوله آب یکسان در نزدیکی بالای یک سد را در نظر بگیرید که آب

را مطابق شکل ۲-۴۱ 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.



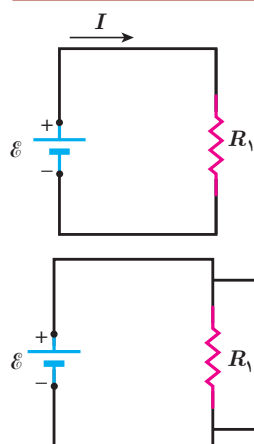
شکل ۲-۴۱ مقاومت الکتریکی معادل دو مقاومت یکسان را می‌توان با دو لوله آب یکسان که از آنها جریان‌های آبی مطابق شکل می‌گذرد، مشابهت‌سازی کرد.

تمرین ۲-۶



در شکل روبه‌رو سه مقاومت موازی به همراه یک آمپرسنج آرمانی به دو سر یک باتری وصل شده‌اند. اگر مقاومت معادل این ترکیب $1/6 \Omega$ باشد، الف) مقاومت R_3 چقدر است؟ ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد را به دست آورید. پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان‌های مصرفی مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_3 برابر است.

مثال ۲-۱۳



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

الف) جریان عبوری از منبع را به دست آورید.

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

مدار چقدر می‌شود و چه جریانی از منبع می‌گذرد؟

پاسخ: الف) با استفاده از تعریف مقاومت داریم:

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

ب) با استفاده از رابطه ۲-۱۳ داریم:

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

در نتیجه

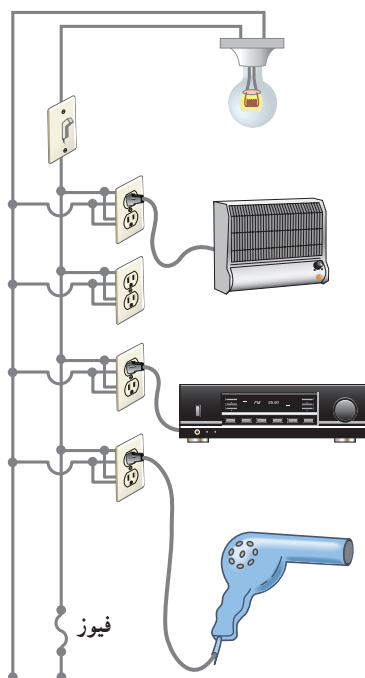
$$R_{\text{eq}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(100 \times 10^3 \Omega)(100 \times 10^6 \Omega)}{100 \times 10^3 \Omega + 100 \times 10^6 \Omega} = 99.9 \text{ k}\Omega$$

و بنابراین، جریان عبوری از منبع برابر است با

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{eq}}} = \frac{150 \text{ V}}{99.9 \times 10^3 \Omega} = 1.52 \times 10^{-3} \text{ A} = 1.52 \text{ mA}$$

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

تقریباً برابر با مقاومت کوچک‌تر (R_1) است.



یک لامپ رشته‌ای 100W ، یک بخاری برقی 2000W ، یک دستگاه پخش صوت 200W ، و یک سشوار (موخشک کن) 2200W مطابق شکل به پریزهای یک مدار سیم کشی خانگی 220V وصل شده است.

الف) اگر فیوز شکل 15A باشد، یعنی حداکثر بتواند جریان 15A 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 سیم کشی منازل همه مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر با مجموع جریان‌های عبوری از هریک از مصرف‌کننده‌هاست. با استفاده از رابطه $I = P/V$ به جریان عبوری از این چهار مصرف‌کننده را به‌دست می‌آوریم. بنابراین، به ترتیب داریم:

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

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

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

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

بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر است با:

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

چون فیوز 15A است. بنابراین، فیوز خواهد پرید. در اغلب منازل چند مدار سیم کشی جداگانه داریم که هریک فیوز مربوط به خود را دارد. برای اینکه بتوانیم به‌طور هم‌زمان از چند وسیله برقی استفاده کنیم، باید وسایل برقی را به‌طور هم‌زمان به یک مدار وصل نکنیم و مدارهای دیگر را نیز به کار گیریم.

ب) دیدیم که همه مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، مقاومت معادل مصرف‌کننده‌های شکل از رابطه ۲-۱۳ به‌دست می‌آید. بنابراین، برای محاسبه مقاومت لازم است مقاومت هریک از وسیله‌ها را به‌طور جداگانه محاسبه کنیم. مقاومت هر مصرف‌کننده با استفاده از رابطه $P = \frac{V^2}{R}$ به‌دست می‌آید. بنابراین، به ترتیب داریم:

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

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

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

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

پس مقاومت معادل چنین محاسبه می شود :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{\text{لامپ}}} + \frac{1}{R_{\text{بخاری}}} + \frac{1}{R_{\text{بخش}}} + \frac{1}{R_{\text{سشوار}}} =$$

$$= \frac{1}{484 \Omega} + \frac{1}{24/2 \Omega} + \frac{1}{242 \Omega} + \frac{1}{22/0 \Omega} = 0.093 \Omega^{-1}$$

و در نتیجه $R_{eq} = 10/75 \Omega \approx 10/8 \Omega$. بنابراین، توان مصرفی مقاومت معادل چنین می شود :

$$P_{R_{eq}} = \frac{V^2}{R_{eq}} = \frac{(220V)^2}{10/75 \Omega} = 4/50 \text{ kW}$$

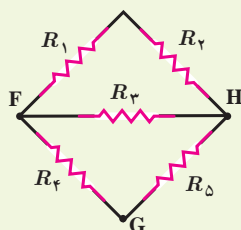
اکنون می خواهیم این نتیجه را با مجموع توان های هریک از مصرف کننده ها مقایسه کنیم.

مجموع توان مصرف کننده ها برابر است با :

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

که همان توان مصرفی مقاومت معادل است.

تمرین ۲-۷

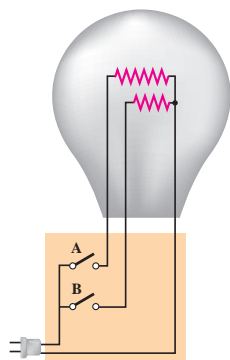


شکل روبه رو پنج مقاومت $8/00$ اهمی را نشان می دهد.

الف) مقاومت معادل بین نقطه های F و H چقدر است؟

ب) مقاومت معادل بین نقطه های F و G چقدر است؟

مثال ۲-۱۵



یک لامپ سه راهه $220V$ که دو رشته دارد مطابق شکل برای کار در سه توان مختلف ساخته شده است. کمترین و بیشترین توان مصرفی این لامپ به ترتیب $500W$ و $150W$ است. مقاومت هریک از رشته ها را بیابید.

پاسخ: همان طور که می دانیم توان الکتریکی مصرفی از رابطه $P = V^2/R$ به دست می آید. بنابراین، بیشترین توان مربوط به کمترین مقاومت و کمترین توان مربوط به بیشترین مقاومت است. در بستن موازی مقاومت ها دیدیم مقاومت معادل کوچک تر از هریک از مقاومت هاست. بنابراین، بیشترین توان مربوط به وقتی است که کلیدهای a و b هر دو بسته اند؛ یعنی :

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

که در آن R_1 و R_2 مقاومت های دو رشته لامپ اند. بنابراین، برای مقاومت معادل داریم :

$$R_{eq} = R_{\min} = \frac{V^2}{P_{\max}} = \frac{(220V)^2}{150W} = 323 \Omega$$

از طرفی کمترین توان مربوط به وقتی است که کلید مربوط به رشته با مقاومت بیشتر بسته شده است. اگر این مقاومت را با

$$R_1 = R_{\max} = \frac{V^2}{P_{\min}} = \frac{(220\text{V})^2}{50/100\text{W}} = 968\Omega$$

R_1 نمایش دهیم، داریم:

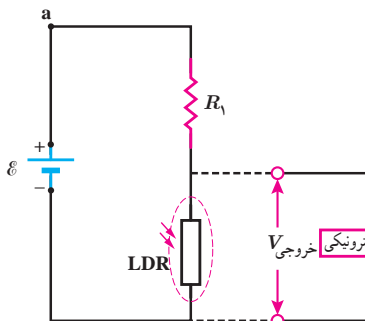
بنابراین، مقاومت مجهول R_2 از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{\text{eq}}} - \frac{1}{R_1} = \frac{1}{323\Omega} - \frac{1}{968\Omega} = 2/06 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$$

$$R_2 = \frac{1}{2/06 \times 10^{-3} \Omega^{-1}} = 485\Omega$$

در نتیجه

مثال ۲-۱۶



در بسیاری از مدارهای الکتریکی از تغییر مقاومت برای تقسیم ولتاژ استفاده می کنند. از این ویژگی در برخی از تجهیزات الکتریکی به عنوان کلید الکترونیکی بهره برداری می شود. آژیر خطر، کلید خودکار روشن شدن چراغ ها و ... مثال هایی از این دست هستند. شکل روبه رو چنین مداری را که در چراغ روشنایی خودروها به کار می رود، نشان می دهد. در این مدار از دو مقاومت R_1 و مقاومت متغیر LDR استفاده شده است که به طور متوالی به هم وصل اند. همان طور که می دانیم وقتی تابش نور به LDR قطع می شود، مقاومت آن

افزایش می یابد. در نتیجه ولتاژ خروجی ($V_{\text{خروجی}}$) زیاد می شود. این افزایش ولتاژ سبب فعال شدن کلید الکترونیکی می شود که به چراغ وصل است و بدین ترتیب چراغ روشن می شود. بنابراین تا زمانی که نور به اندازه کافی بتابد، کلید فعال نمی شود. فرض کنید در شکل بالا، منبع نیروی محرکه، آرمانی و ولتاژ آن $12/0\text{V}$ باشد و ولتاژ مورد نیاز برای فعال شدن کلید الکترونیکی $5/0\text{V}$ باشد. وقتی مقاومت LDR به $20\text{k}\Omega$ می رسد، کلید الکترونیکی فعال می شود. مقاومت R_1 چقدر است؟ (مقاومت کلید الکترونیکی آنقدر زیاد است که جریان قابل ملاحظه ای از آن عبور نمی کند. بنابراین می توانیم R_1 و LDR را متوالی در نظر بگیریم.)

پاسخ: با استفاده از قاعده حلقه داریم:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_{\text{LDR}}}$$

از طرفی بدیهی است

$$V_{\text{خروجی}} = R_{\text{LDR}} I$$

از ترکیب دو معادله بالا خواهیم داشت:

$$V_{\text{خروجی}} = R_{\text{LDR}} \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_{\text{LDR}}}$$

و از آنجا برای R_1 چنین به دست می آوریم:

$$R_1 = \frac{R_{\text{LDR}} (\mathcal{E} - V_{\text{خروجی}})}{V_{\text{خروجی}}} = \frac{(20\text{k}\Omega)(12/0\text{V} - 5/0\text{V})}{5/0\text{V}} = 28\text{k}\Omega$$

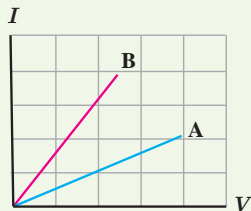
با استفاده از این اطلاعات الف) مقدار بار کل منتقل شده بین ابر و زمین، ب) جریان متوسط در یک یورش آذرخش و پ) توان الکتریکی آزادشده در 0.2 s را به دست آورید.

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

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

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

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



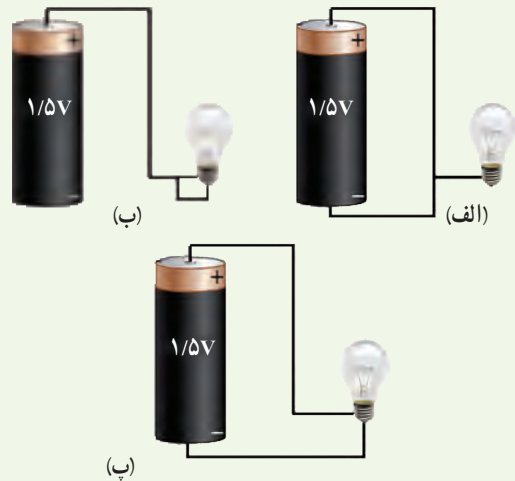
۲-۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

۷ دو رسانای فلزی از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توپری به قطر 1 mm است. رسانای B لوله‌ای توخالی به شعاع خارجی 2 mm و شعاع داخلی 1 mm است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟

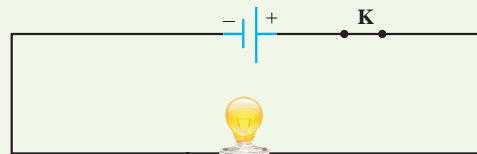
۸ در ماشین‌های چمن‌زنی برقی برای مسافت‌های حداکثر تا 35 m از سیم‌های مسی نمره ۲۰ (قطر 0.8 mm) و برای مسافت‌های طولانی‌تر از سیم‌های ضخیم‌تر نمره ۱۶ (قطر 1.3 mm) استفاده می‌کنند تا بدین ترتیب مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. الف) مقاومت یک

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

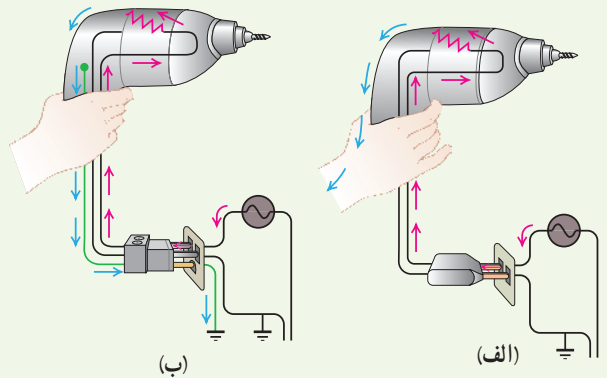
۱ در کدام یک از شکل‌های زیر، لامپ روشن می‌شود؟



۲ در مدار شکل زیر اختلاف پتانسیل دو سر لامپ 4 V و مقاومت آن $5\text{ }\Omega$ است. در مدت ۵ دقیقه چه تعداد الکترون از لامپ می‌گذرد؟

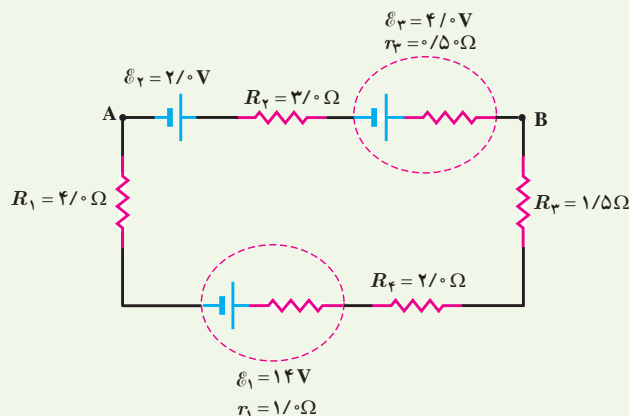


۳ بررسی کنید اگر مت‌برقی (دریل) معیوب شکل‌های زیر را با دوشاخه (شکل الف) یا سه‌شاخه (شکل ب) به پریز وصل کنیم، چه رخ می‌دهد؟



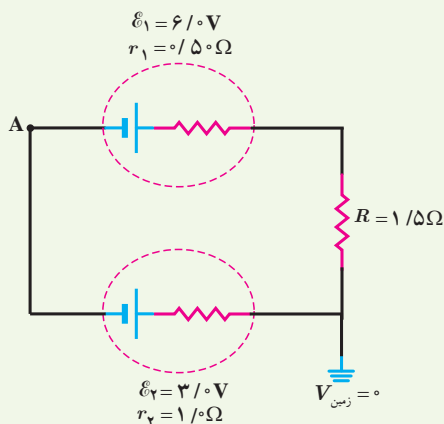
۴ آذرخش مثالی جالب از جریان الکتریکی در پدیده‌های طبیعی است. در یک آذرخش نوعی 10^9 J انرژی تحت اختلاف پتانسیل 10^7 V در بازه زمانی 0.2 s آزاد می‌شود.

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



۱۴ در شکل زیر

الف) اختلاف پتانسیل دو سر مولدها را به دست آورید.
ب) پتانسیل نقطه A را تعیین کنید.



۲-۵ توان در مدارهای الکتریکی

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

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



۲۴۰۰ W، ۲۲۰ V، کتری برقی

۸۵۰ W، ۲۲۰ V، اتوی برقی

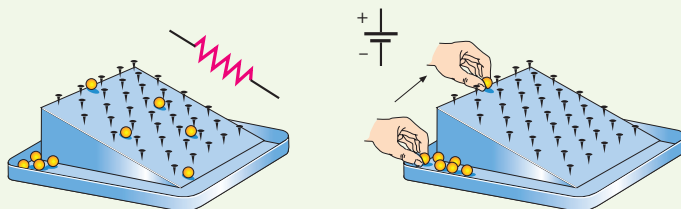
سیم ۳۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ ب) مقاومت یک سیم ۷۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ (دمای سیم‌ها را 20°C در نظر بگیرید.)



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

۲-۴ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

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



۱۱ اختلاف پتانسیل دو سر باتری خودروهای سواری برابر ۱۲ ولت است. اگر هشت باتری قلمی $1/5$ ولتی را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه آنها نیز برابر ۱۲ ولت می‌شود. 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 پتانسیل دو سرش برابر $12/0\text{V}$ است. وقتی یک مقاومت $10/0\Omega$ به این باتری بسته شود، اختلاف پتانسیل دو سر باتری به $9/0\text{V}$ کاهش می‌یابد. مقاومت داخلی باتری چقدر است؟

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

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

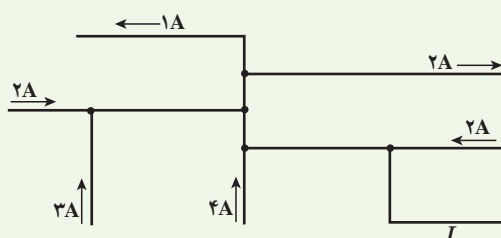
۲-۶ ترکیب مقاومت ها

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

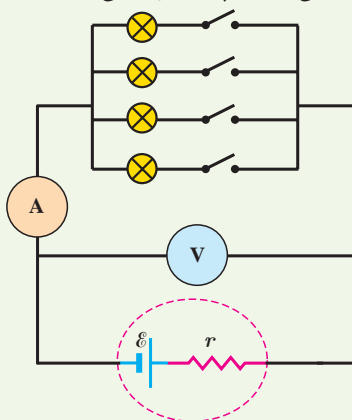
۲۲ مقاومت یک آمپرسنج برای اندازه گیری جریان در یک مدار باید چگونه باشد تا جریان اندازه گیری شده توسط آمپرسنج با

جریان قبل از قرار دادن آمپرسنج، نزدیک به هم باشد؟

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



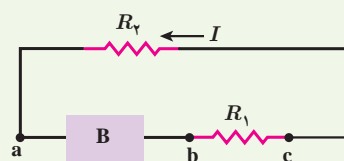
۲۴ در شکل زیر، تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، عددهایی که آمپرسنج و ولت سنج نشان می دهند، چه تغییری می کند؟



الف) سیم های 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 قوه معمولی با ولتاژ $2/9 \text{ V}$ کار می کند و در این حالت جریان $3/0 \text{ A}$ از آن می گذرد. اگر مقاومت رشته تنگستنی این لامپ در دمای اتاق (20°C) برابر $1/1 \Omega$ باشد، دمای این رشته وقتی که لامپ روشن است، چقدر می شود؟

۱۸ شکل زیر جریان I را در یک مدار تک حلقه ای با باتری B و مقاومت های R_1 و R_2 (و سیم هایی با مقاومت ناچیز) نشان می دهد. الف) قطب های پایانه های B را مشخص کنید. در نقاط a، b و c، ب) بزرگی جریان، پ) پتانسیل الکتریکی و ت) انرژی پتانسیل الکتریکی حامل های بار مثبت را به گونه ای مرتب کنید که بیشترین مقدار در ابتدا باشد.

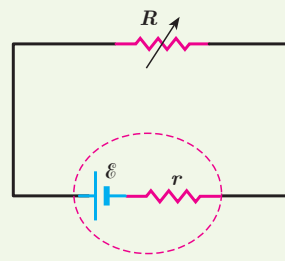


۱۹ تلویزیون و یکی از لامپ های خانه خود را در نظر بگیرید و فرض کنید که هر کدام روزی ۸ ساعت با اختلاف پتانسیل 220 V روشن باشد.

الف) انرژی الکتریکی مصرفی هر کدام در یک دوره یک ماهه (30 روز) چند kWh است؟ (توان مصرفی هر وسیله را از روی آن بخوانید.)

ب) بهای برق مصرفی هر کدام از قرار هر کیلووات ساعت 50 تومان در یک دوره یک ماهه چقدر می شود؟

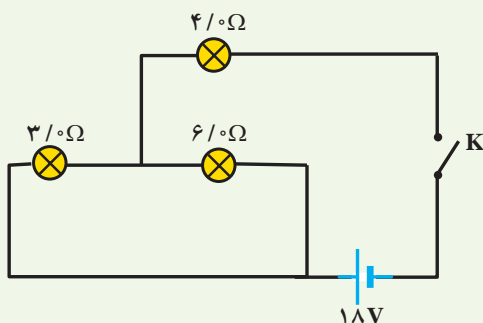
پ) اگر در شهر شما هر خانه یک لامپ 100 وات اضافی را به مدت 3 ساعت در شب روشن کند، در طول یک ماه تقریباً چند کیلووات ساعت انرژی الکتریکی اضافی مصرف می شود؟
۲۰ در شکل زیر، الف) نیروی محرکه الکتریکی و مقاومت



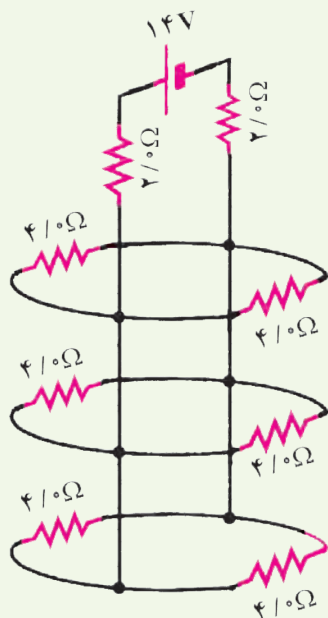
۲۸ سه مقاومت مشابه ۱۲ اهمی را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۲۹ دو مقاومت موازی $۶/۰$ اهمی و ۱۲ اهمی به طور متوالی به یک مقاومت $۲/۰$ اهمی وصل شده است. اکنون، مجموعه مقاومت‌ها را به دو سریک باتری آرمانی ۳۶ ولتی می‌بندیم. توان مصرفی در مقاومت $۶/۰$ اهمی را محاسبه کنید.

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

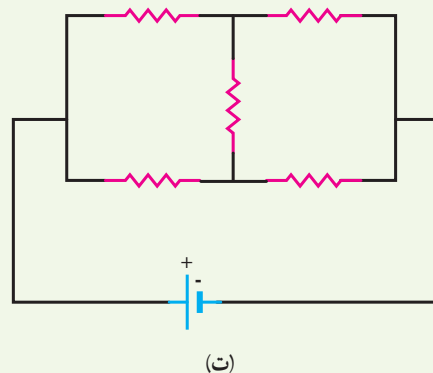
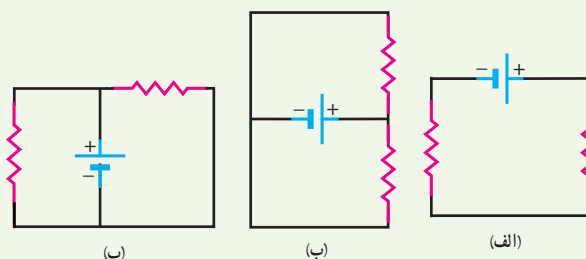


۳۱ جریانی که از منبع نیروی محرکه آرمانی و هر یک از مقاومت‌های شکل روبه‌رو می‌گذرد، چقدر است؟



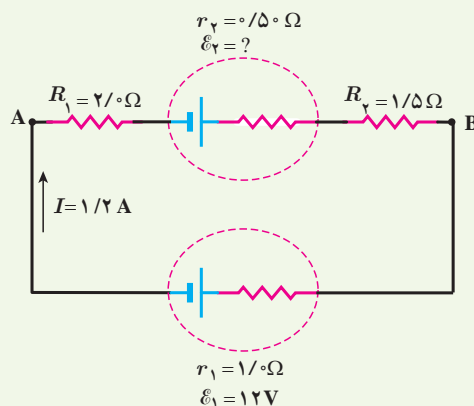
۲۵ دو لامپ با مقاومت مساوی R را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و آنها را هر بار به ولتاژ V وصل می‌کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متوالی چقدر است؟

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



۲۷ در مدار شکل زیر جریان در جهت نشان داده شده $۱/۲$ A است.

(الف) نیروی محرکه \mathcal{E}_1 و $V_A - V_B$ چقدر است؟
(ب) انرژی مصرف شده در R_1 و R_2 در مدت $۵/۰$ ثانیه چقدر است؟

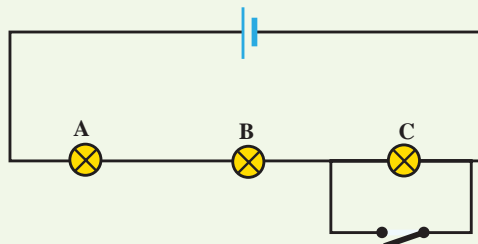


ب) هریک از اختلاف پتانسیل‌های A و B به اندازه ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

ت) اختلاف پتانسیل دو سر C به صفر کاهش می‌یابد.

۳۳ درسیم‌کشی منازل، همه 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 ۱۵ A را تحمل کند وصل شده‌اند. آیا این ترکیب مصرف‌کننده‌ها باعث پریدن فیوز می‌شود یا خیر؟

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



الف) اختلاف پتانسیل دو سر A و B تغییر نمی‌کند.

ب) اختلاف پتانسیل دو سر C به اندازه ۵۰٪ کاهش می‌یابد.