

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# مبانی برق

رشته‌ی الکترونیک

زمینه‌ی صنعت

شاخه‌ی متوسطه‌ی فنی و حرفه‌ای

این کتاب در سال تحصیلی ۹۱ - ۹۰ به طور آزمایشی اجرا می‌شود از هنرآموزان محترم و سرگروه‌های آموزشی رشته‌های مربوطه تقاضا می‌شود ضمن توجه به نقاط قوت و ضعف کتاب درسی نظرها و پیشنهادهای خود را از طریق گروه بررسی محتوای آموزشی استان‌ها به این دفتر منعکس نمایند.

عنوان و نام پدیدآور: مبانی برق [کتاب‌های درسی] رشته‌ی الکترونیک، زمینه‌ی صنعت شاخه‌ی فنی حرفه‌ای/برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف: دفتر برنامه‌ریزی و تألیف آموزش‌های فنی و حرفه‌ای و کاردانش. مؤلف: روح الله خلیلی بروجنی؛ [برای] وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی.  
مشخصات نشر: تهران: گویش نو، ۱۳۹۰.  
مشخصات ظاهری: ۳۱۳ص؛ مصور (رنگی).  
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۰۸۴-۷۹-۵  
وضعیت فهرست‌نویسی: فیا  
موضوع: برق  
شناسه افزوده: خلیلی، روح الله ۱۳۵۰-  
شناسه افزوده: ایران، وزارت آموزش و پرورش، دفتر تألیف و برنامه‌ریزی درسی آموزش متوسطه (فنی و حرفه‌ای)  
شناسه افزوده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی  
رده‌بندی کنگره: ۱۳۹۰/م۲ ۵۲۰/ QC  
رده‌بندی دیویی: ۵۳۷/۰۷۶  
شماره کتابشناسی ملی: ۲۲۲۳۶۲۰

جمهوری اسلامی ایران  
وزارت آموزش و پرورش  
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

**همکاران محترم و دانش‌آموزان عزیز:**

پیشنهادهای و نظرهای خود را درباره‌ی محتوای این کتاب به نشانی  
تهران - صندوق پستی شماره‌ی ۴۸۷۴/۱۵ دفتر برنامه‌ریزی و تألیف  
آموزش‌های فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایند.

پیام‌نگار (ایمیل) [tvoccd@roshd.ir](mailto:tvoccd@roshd.ir)  
وب‌گاه (وب‌سایت) [www.tvoccd.medu.ir](http://www.tvoccd.medu.ir)

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

عنوان و کد کتاب: مبانی برق، ۳۵۸/۱۲

مجری: انتشارات گویش نو

مؤلف: روح الله خلیلی بروجنی ([khalily@gmail.com](mailto:khalily@gmail.com))

ویراستار: ناصر مقبلی

صفحه‌آرا: توفیق علایی

طراح جلد: محمدحسن معماری

نوبت و سال چاپ: اول، ۱۳۹۰

ناشر: انتشارات گویش نو (تهران: خیابان انقلاب - خیابان فخر رازی - خیابان نظری شرقی - پلاک ۶۱ تلفن: ۵۰ - ۶۶۹۵۶۰۴۹ - ۶۶۴۸۴۵۳۴)

وب‌سایت [www.bookgno.ir](http://www.bookgno.ir)

چاپ: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران

(تهران - کیلومتر ۱۷ جاده‌ی مخصوص کرج - خیابان ۶۱ "داروپخش" تلفن: ۵ - ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۴۴۵/۶۸۴)

نظارت بر چاپ و توزیع: اداره‌ی کل چاپ و توزیع کتاب‌های درسی، سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

تهران - ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره‌ی ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی) تلفن: ۹ - ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وب‌سایت [www.chap.sch.ir](http://www.chap.sch.ir)

حق چاپ محفوظ است.

ISBN 978-600-5084-79-5

شابک ۹۷۸-۶۰۰-۵۰۸۴-۷۹-۵



از شماست که مردان و زنان بزرگ تربیت می شود. شما باید تحصیل کوشش کنید که برای فضایل اخلاقی،  
فضایل اعلیٰ مجز شوید. شما برای آتیه مملکت ما جوانان نیرومند تربیت کنید. دامن شما یکت مدرسه ای است که  
در آن جوانان بزرگ تربیت شود. شما فضایل تحصیل کنید تا که دکان شما در دامن شما به فضیلت برسند.  
امام خمینی (ره)

## فصل اول بار الکتریکی

- ۱-۱ بار الکتریکی ۳
- ۲-۱ ساختمان اتم ۵
- ۳-۱ بار الکتریکی کوانتیده است ۸
- ۴-۱ بار الکتریکی پایسته است ۸
- ۵-۱ خواص الکتریکی مواد ۹
- ۶-۱ روش های باردار کردن اجسام ۱۰
- ارزشیابی فصل اول ۱۲

## بار الکتریکی



رعد و برق یا آذرخش یکی از پدیده های ترن جویه های پر هیول کنش بارهای مثبت و منفی در طبیعت است. آذرخش معمولاً بیش از چند کیلو متر طول دارد و سر از توده های الکتریکی بین بعضی از ابرها و زمین یا بین خود ابرها اتفاق می افتد.

## فصل دوم نیروی الکتریکی، میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی

- ۱-۲ قانون کولن ۱۷
- ۲-۲ میدان الکتریکی ۲۰
- ۳-۲ انرژی پتانسیل الکتریکی ۲۳
- ۴-۲ آشنایی با برخی از روش های تولید الکتریسیته ۲۸
- ارزشیابی فصل دوم ۳۱

## نیروی الکتریکی، میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی



یک مولد وان دوگراف معمولی قادر است در سطح کیند رسانای خود تا چند صد هزار وات، پتانسیل الکتریکی تولید کند. این پتانسیل بالا می تواند هوای پیرامون را یونیزه و سبب تخلیه الکتریکی کافی است در یک حلقه فلزی (قفسی فارادی) باشد.

## فصل سوم جریان الکتریکی

- ۱-۳ ایجاد جریان الکتریکی ۳۷
- ۲-۳ شدت جریان الکتریکی ۳۹
- ۳-۳ مدارهای بسته و باز ۴۲
- ۴-۳ الکتریسیته در خانه ۴۳
- ارزشیابی فصل سوم ۴۵

## جریان الکتریکی



انرژی های تجدیدپذیر و پاک بهترین گزینه برای تولید انرژی الکتریکی و تأمین جریان الکتریکی مورد نیاز برای به کار انداختن وسایل مختلف الکتریکی هستند.



## فصل چهارم مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی

- ۵۱ ۱-۴ مقاومت الکتریکی
- ۵۳ ۲-۴ عامل‌های مؤثر بر مقاومت الکتریکی یک رسانا
- ۵۶ ۳-۴ رسانندگی الکتریکی
- ۵۷ ۴-۴ تغییر مقاومت الکتریکی با دما
- ۶۱ ۵-۴ مقاومت‌های الکتریکی یک مدار
- ۶۱ ۶-۴ ابررساناها و کاربرد آن‌ها
- ۶۴ ارزشیابی فصل چهارم



## فصل پنجم قانون اهم، انرژی و توان الکتریکی

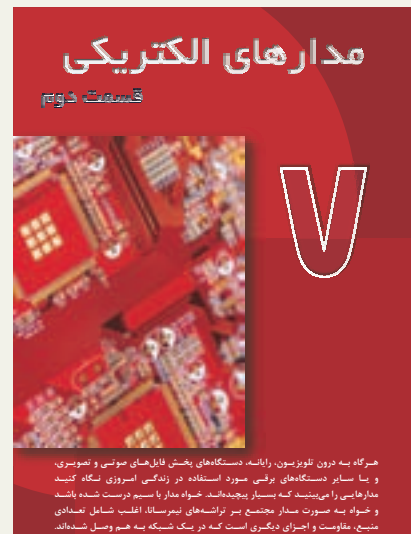
- ۷۱ ۱-۵ قانون اهم
- ۷۴ ۲-۵ دیودها
- ۷۷ ۳-۵ انرژی الکتریکی مصرفی در یک مقاومت
- ۷۹ ۴-۵ توان الکتریکی
- ۸۳ ۵-۵ توان مفید و بازده در وسایل برقی
- ۸۵ ۶-۵ بهای انرژی الکتریکی مصرفی
- ۸۶ ارزشیابی فصل پنجم



## فصل ششم مدارهای الکتریکی (قسمت اول)

- ۹۳ ۱-۶ قطعه‌ها و نمودارهای مدار الکتریکی
- ۹۴ ۲-۶ اتصال مقاومت‌ها به یکدیگر
- ۹۵ ۳-۶ اتصال متوالی مقاومت‌ها
- ۹۹ ۴-۶ مقاومت معادل در مدارهای متوالی
- ۱۰۴ ۵-۶ نقش رنوستا و پتانسیومتر در مدارهای متوالی
- ۱۱۰ ۶-۶ اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار
- ۱۱۳ ۷-۶ قانون ولتاژ کیرشهف
- ۱۱۵ ۸-۶ توان مصرفی در مدارهای متوالی
- ۱۱۸ ارزشیابی فصل ششم





## فصل هفتم مدارهای الکتریکی (قسمت دوم)

- ۱۲۵ ۷-۱ اتصال موازی مقاومت‌ها
- ۱۲۷ ۷-۲ مقاومت معادل در مدارهای موازی
- ۱۳۲ ۷-۳ قانون جریان کیرشهف
- ۱۳۴ ۷-۴ توان مصرفی در مدارهای موازی
- ۱۳۷ ۷-۵ مدارهای ترکیبی (اتصال‌های متوالی - موازی)
- ۱۴۴ ارزشیابی فصل هفتم



## فصل هشتم خازن، ظرفیت و دی الکتریک‌ها

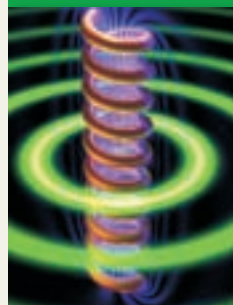
- ۱۵۲ ۸-۱ خازن
- ۱۵۲ ۸-۲ باردار کردن (شارژ) خازن
- ۱۵۴ ۸-۳ تخلیه‌ی (دشارژ) خازن
- ۱۵۴ ۸-۴ ظرفیت خازن
- ۱۵۶ ۸-۵ ظرفیت خازن تخت
- ۱۵۹ ۸-۶ خازن با دی الکتریک
- ۱۶۳ ۸-۷ ثابت زمانی خازنی
- ۱۶۴ ۸-۸ انرژی ذخیره شده در خازن
- ۱۶۵ ۸-۹ اتصال متوالی و موازی خازن‌ها
- ۱۷۴ ارزشیابی فصل هشتم



## فصل نهم پیل‌ها و باتری‌ها

- ۱۸۲ ۹-۱ پیل‌ها و باتری‌ها
- ۱۸۳ ۹-۲ انواع پیل‌ها
- ۱۸۵ ۹-۳ اتصال پیل‌ها
- ۱۹۱ ۹-۴ مقاومت داخلی پیل‌ها
- ۱۹۴ ارزشیابی فصل نهم

## مغناطیس



خواه سیمه راست باشد و خواه به صورت پیچ یا سیم‌لوله‌ای بلند  
در آمده باشد با عبور جریان از آن، میدان‌های مغناطیسی در اطراف  
خود به وجود می‌آورند. این میدان‌ها که بر اثر حرکت بارهای الکتریکی  
پدید می‌آیند، می‌توانند بر هر ذره‌ی باردار محرکی نیرو وارد کنند.

## فصل دهم مغناطیس

- ۱۰-۱ تاریخچه‌ی مغناطیس ۱۹۹
- ۱۰-۲ قطب‌های مغناطیسی ۲۰۰
- ۱۰-۳ القای مغناطیسی ۲۰۱
- ۱۰-۴ میدان مغناطیسی ۲۰۲
- ۱۰-۵ میدان مغناطیسی زمین ۲۰۴
- ۱۰-۶ خواص مغناطیسی مواد ۲۰۶
- ۱۰-۷ الکترومغناطیس ۲۰۹
- ۱۰-۸ نیروی محرکه‌ی القایی و تولید برق ۲۱۹
- ارزشیابی فصل دهم ۲۲۲

## القاگرها، خودالقایی و القای متقابل



القاگر یک مولد تولید برق در مقیاس تجاری، از تعداد بسیار زیادی حلقه  
تشکیل شده که دور چوبی شش‌به‌شش‌پهلو شده و از سیم‌پارچه‌ای  
می‌شود. در حالی که آهنربای الکتریکی روی شفت که از مرکز آرمیچر  
می‌گذرد (در شکل دیده نمی‌شود) می‌چرخد. آرمیچر و حلقه‌ها ساکن‌اند.

## فصل یازدهم القاگرها، خودالقایی و القای متقابل

- ۱۱-۱ شار مغناطیسی ۲۲۷
- ۱۱-۲ قانون القای فارادی ۲۲۸
- ۱۱-۳ قانون لنز ۲۲۹
- ۱۱-۴ القاگرها ۲۳۱
- ۱۱-۵ ثابت زمانی در یک مدار R-L ۲۳۴
- ۱۱-۶ انرژی ذخیره شده در القاگر ۲۳۶
- ۱۱-۷ القای متقابل ۲۳۷
- ارزشیابی فصل یازدهم ۲۳۸

## فصل دوازدهم جریان متناوب

- ۱۲-۱ مقایسه‌ی جریان‌های متناوب و مستقیم با یکدیگر ۲۴۵
- ۱۲-۲ شکل‌های جریان متناوب ۲۴۶
- ۱۲-۳ ویژگی‌های موج سینوسی ۲۴۷
- ۱۲-۴ تولید جریان متناوب ۲۵۴
- ۱۲-۵ معادله‌های ولتاژ و جریان سینوسی بر حسب زمان ۲۵۷
- ۱۲-۶ مقدارهای میانگین و مؤثر ولتاژ و جریان یک منبع ac سینوسی ۲۵۸
- ۱۲-۷ مقاومت در یک مدار ac سینوسی ۲۶۱
- ۱۲-۸ خازن در یک مدار ac سینوسی ۲۶۴
- ۱۲-۹ القاگر در یک مدار ac سینوسی ۲۶۶
- ارزشیابی فصل دوازدهم ۲۷۱

## جریان متناوب



در تمام دنیا، تقریباً همگی انرژی الکتریکی نه به صورت جریان‌های  
مستقیم، بلکه به صورت جریان‌های متناوب تولید، منتقل و توزیع  
می‌شوند. چالش مهم مهندسان برق، طراحی دستگاه‌های برای جریان  
متناوب است که انرژی الکتریکی را به طور مؤثر و با اتلاف کم انتقال دهند.

## سخنی با هنرجویان عزیز

درباره‌ی کتاب: همان‌طور که از نام کتاب مبانی برق نیز بر می‌آید، هدف اصلی این کتاب آموزش مفاهیم بنیادی و توجه به برخی از کاربردهای این موضوع درسی است. در برنامه‌ریزی و تألیف این کتاب کوشش فراوان شده است تا از یک سو نیاز واقعی و آینده‌ی تحصیلی و شغلی شما و از سوی دیگر استانداردهای امروزی آموزش این درس مورد توجه قرار گیرد.

این کتاب که به همراه یک نرم‌افزار تعاملی به شما تقدیم شده است، در واقع اجزای یک بسته‌ی آموزشی را تشکیل می‌دهند که بستر مناسبی را برای یادگیری شوق‌انگیز این درس فراهم می‌کنند. از آن‌جا که مبانی برق، علمی تجربی است، تلاش شده است که بسیاری از پدیده‌های مهم آن در قالب فیلم، به صورت فعالیت‌های عملی مبتنی بر وسیله‌های ساده و در دسترس، در نرم‌افزار ضمیمه‌ی کتاب درسی در اختیار شما قرار داده شود.

یادگیری را بیاموزیم: هر یک از ما شیوه‌های یادگیری متفاوت و ابزار یادگیری برگزیده‌ی خود را داریم. درک شیوه‌ی یادگیری خودتان به شما کمک می‌کند که روی جنبه‌هایی از مفاهیم مبانی برق که می‌توانند برای شما دشوار باشند تمرکز کنید و آن مؤلفه‌هایی را به کار گیرید که شما را در غلبه بر مشکل یاری می‌دهند. روشن است که شما می‌خواهید وقت بیش‌تری را صرف آن جنبه‌هایی کنید که بیش‌ترین زحمت را برای شما فراهم می‌کنند. اگر شما با شنیدن یاد می‌گیرید، حضور فعال در کلاس‌های درس بسیار مهم هستند. اگر با توضیح دادن یاد می‌گیرید، آن‌گاه علاوه بر حضور فعال در کلاس‌های درس، کار کردن با دانش‌آموزان دیگر برای شما بسیار مهم است. اگر مسئله حل کردن برای شما مشکل است وقت بیش‌تری را صرف یادگیری روش حل مسئله‌ها کنید. درک و گسترش شیوه‌های عادی خوب نیز اهمیت دارد. شاید مهم‌ترین کاری که می‌توانید برای خودتان انجام دهید آن باشد که زمان‌های مطالعه‌ای با برنامه‌ی زمان‌بندی منظم و کافی در محیطی خالی از عامل‌های برهم‌زننده‌ی تمرکز برای خود در نظر بگیرید. سعی کنید پرسش‌های زیر را برای خود پاسخ دهید:

- آیا من توانایی به کار بردن مفهوم‌های ریاضی را در حل مسائل مبانی دارم؟ (اگر پاسخ منفی است به کتاب ریاضیات سال اول خود و همچنین پیوست الف کتاب مراجعه کنید و افزون بر این‌ها از معلم خود نیز راهنمایی‌های لازم را بخواهید.)

- آسان‌ترین فعالیت‌ها در مبانی برق برای من کدام‌ها بوده‌اند؟ (نخست این فعالیت‌ها را انجام دهید؛ این کار به ایجاد اعتماد به نفس در شما کمک می‌کند).
- آیا اگر کتاب را پیش از کلاس خوانده باشم مطلب را بهتر می‌فهمم یا پس از آن؟ (ممکن است شما به این روال بهتر یاد بگیرید که نخست مطلب را با ورق زدن کتاب بخوانید، سپس به کلاس درس بروید و پس از آن به خواندن دقیق موضوع بپردازید).
- آیا زمانی که صرف مطالعه‌ی درس مبانی برق می‌کنم کافی است؟ (تجربه نشان می‌دهد که به ازای هر یک ساعت کلاس باید به طور متوسط ۲ ساعت خارج از کلاس به آن اختصاص داده شود.
- برای من بهترین ساعت روز برای مطالعه‌ی این درس کدام است؟ (زمان خاصی از روز را برگزینید و آن را تغییر ندهید. همچنین زمان مطالعه‌ی خود را در طول هفته پخش کنید!)
- آیا در جای آرامی که بتوانم تمرکز خود را حفظ کنم کار می‌کنم؟ (مزاحمت‌ها روال کار شما را برهم می‌زند و موجب می‌شود نکته‌های مهم را از قلم بیندازید).

## کار کردن با دیگران

دانشمندان و مهندسان به ندرت در انزوا از یکدیگر کار می‌کنند، بلکه بیش‌تر با یکدیگر همکاری دارند. اگر با دیگر دوستانتان کار کنید هم مفاهیم درس‌تان بیش‌تر یاد خواهید گرفت و هم از این یادگیری بیش‌تر لذت خواهید برد. امروزه بسیاری از معلمان و هنرآموزان به این همکاری و مشارکت در یادگیری در کلاس‌های درس رسمیت بخشیده‌اند و افزون بر این زمینه‌ی تشکیل گروه‌های مطالعه را فراهم می‌سازند. گروه مطالعه‌ی شما به هنگام مرور درس‌ها برای آزمون‌ها، پشتوانه‌ی گرانبه‌تری است.

کلاس درس و یادداشت برداری: یک مؤلفه‌ی بسیار مهم در هر درس، حضور در کلاس آن درس است. درخصوص مبانی برق، کلاس درس اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا معلم شما در فرایند آموزش فعالیت‌هایی را انجام می‌دهد که شما را یاری می‌دهند مفاهیم اصلی مبانی برق را بفهمید. در کلاس‌ها حضور فعال داشته باشید و اگر به دلیلی نتوانستید در کلاسی شرکت کنید از دوستی یا یکی از عضوهای گروه مطالعه‌ی خود درخواست کنید که شما را در جریان آن چه گذشته است قرار دهد.

مسیر آموزش و یادگیری: دانش‌آموزان عزیز! مسیر آموزش و یادگیری، مسیری سراسر و مستقیم نیست که بتوان با تلاشی اندک، هدف‌های آن را تحقق بخشید! ابتدا باید به خود باور و ایمان داشته باشید و یقین بدانید که مفاهیمی را که در هر سال تحصیلی می‌خوانید در سطح درک و فهم شما هستند و برای بهبود و ارتقاء زندگی فردی و اجتماعی شما فراهم آمده‌اند. در فرایند آموزش جدی و پرتلاش باشید و تا جایی که

امکان دارد به طور فعال و با انگیزه در فرایند آموزش مشارکت داشته باشید. چرا که اگر امروز نتوانید دانش، مهارت و نگرش خود را و بهبود دهید به طور حتم فردا دیر است! برای تعامل موثر و سازنده با دنیای پر حجم و پر شتاب امروز، راهی جز «کسب خرد» ندارید و این خرد به تدریج و به تبع باور، تلاش و مشارکت شما در فرایند آموزش به دست می‌آید.

### سخنی با هنرآموزان ارجمند

امروزه بسیاری از متخصصان امر آموزش که تجربه‌ای ممتد در این خصوص دارند بیان می‌دارند که درک ایده‌های نهفته در پشت بیش‌تر مفاهیم علمی و کاربرد آن‌ها در زندگی برای اغلب دانش‌آموزان میسر است. آنچه در این راه در میزان موفقیت دانش‌آموزان موثر است، شیوه‌های آموزش معلمان در کلاس درس است. این شیوه‌ها می‌توانند درک و فهم مفاهیم علمی را برای همه‌ی دانش‌آموزان، بدون توجه به توانایی علمی آنان، باز یا بسته کند.

به عبارت دیگر شیوه‌های آموزش کارآمد کلید موفقیت نسبی هر برنامه‌ی درسی است. بنابراین انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربه‌ی خود و به کارگیری شیوه‌های آموزشی موثر، بستر مناسبی برای یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش و همچنین شوق انگیزتر شدن فضای کلاس فراهم نمایند. در این راه توجه به موارد زیر در هر فصل می‌تواند راهگشا باشد.

همان‌طور که بیش از این گفته شد، مبانی برق، درسی است مبتنی بر مفاهیم تجربی. بنابراین انجام فعالیت‌های ساده در کلاس درس می‌تواند در ساده کردن شوق انگیز کردن یادگیری مفاهیم این درس کمک ارزنده‌ای نماید. افزون بر این‌ها، استفاده از شبیه‌سازی‌ها و به خصوص آزمایشگاه‌های مجازی در نرم‌افزار ضمیمه‌ی کتاب می‌تواند شرایط مناسبی برای درک عمیق‌تر مفاهیم فراهم نماید.

### قدردانی

اینک که پس از نزدیک به یک سال کوشش و جوشش این کتاب جامه‌ی طبع به خود می‌پوشد و صورت انتشار می‌پذیرد پس از سپاس از خدای منان، از همه‌ی عزیزانی که بدون عنایت و اهتمامشان این خدمت خُرد صورت تحقق نمی‌پذیرفت سپاس‌گزاری می‌کنم. از آقای ناصر مقبلی به جهت ویرایش کتاب و همچنین آقای دکتر عبدالله زرافشان به جهت تألیف زندگی‌نامه‌ی دانشمندان مسلمان که در میان برخی از فصل‌های کتاب آمده است تشکر ویژه می‌شود.

روح الله خلیلی بروجنی

سال تحصیلی ۹۱-۱۳۹۰

# بار الکتریکی



رعد و برق یا آذرخش یکی از تماشایی ترین جلوه های برهم کنش بارهای مثبت و منفی در طبیعت است. آذرخش معمولاً بیش از چند کیلومتر طول دارد و بر اثر تخلیه ی الکتریکی بین بعضی از ابرها و زمین یا بین خود ابرها اتفاق می افتد.



## سیمای فصل اول

- ۱-۱ بار الکتریکی
- ۲-۱ ساختمان اتم
- ۳-۱ بار الکتریکی کوانتیده است
- ۴-۱ بار الکتریکی پایسته است
- ۵-۱ خواص الکتریکی مواد
- ۶-۱ روش‌های باردار کردن اجسام
- ارزشیابی فصل اول

# بار الکتریکی

## هدفهای آموزشی

با مطالعه این فصل، شما فرا می‌گیرید:

○ مفهوم بار الکتریکی و ارتباط آن با کوچک‌ترین جزء سازنده‌ی ماده، یعنی اتم، چیست.

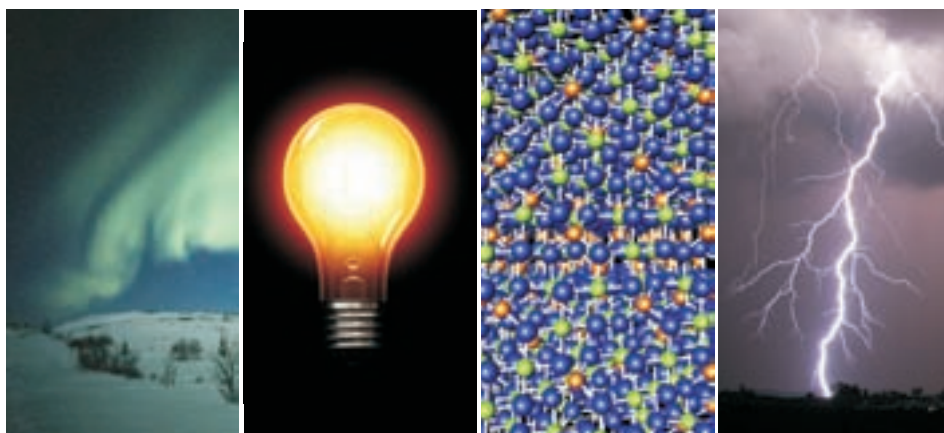
○ به چند روش می‌توان اجسام را باردار کرد.

○ چگونه می‌دانیم که بار الکتریکی کوانتیده و پایسته است.

○ مواد از نظر ویژگی‌های الکتریکی به چند رده تقسیم می‌شوند.

همه‌ی ما با وسایلی احاطه شده‌ایم که ترکیبی از پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند. این پدیده‌ها مبنای کار رایانه‌ها، تلویزیون‌ها، رادیوها، وسایل مخابراتی، لامپ‌های روشنایی و بسیاری از وسایل دیگرند. همچنین بنیاد جهان طبیعی نیز مبتنی بر همین پدیده‌هاست.

پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی نه تنها همه‌ی اتم‌ها و مولکول‌های جهان را در کنار هم نگه می‌دارد، بلکه منجر به ایجاد آذرخش، شفق‌های قطبی، رنگین کمان و صدها جلوه‌ی طبیعی دیگر می‌شوند (شکل ۱-۱). موضوع این فصل بارهای الکتریکی است که منشاء تمام این پدیده‌هاست.

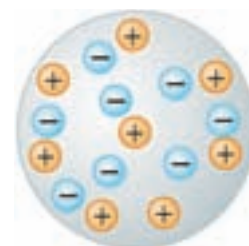


شکل ۱-۱ از آنچه اتم‌ها را به شکل مولکول به هم می‌پیوندند گرفته تا آذرخش در آسمان، از درخشش لامپ تا شفق‌های قطبی همگی منشاء الکتریکی و مغناطیسی دارند.

## ۱-۱ بار الکتریکی

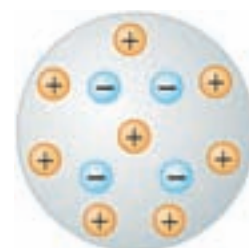
هر جسمی شامل تعداد انبوهی بار الکتریکی است. بار الکتریکی مشخصه‌ی ذاتی ذره‌های سازنده‌ی اجسام است. این مقدار انبوه بار معمولاً در اجسامی که با آن‌ها سرو کار داریم پنهان است، زیرا جسم دارای مقدار یکسانی از دو نوع بار است: بار مثبت و بار منفی.

در حالتی که مقدار بارهای الکتریکی مثبت و منفی یکسان یا متوازن اند، گفته می‌شود که جسم از لحاظ الکتریکی **خنثاست**؛ یعنی، شامل هیچ بار خالصی نیست (شکل ۲-۱).



**شکل ۲-۱** وقتی تعداد بارهای مثبت و منفی جسمی یکسان باشند، جسم از لحاظ الکتریکی خنثاست و دارای بار خالصی نیست.

اگر مقدار بارهای مثبت و منفی در جسمی یکسان نباشد یا توازن نداشته باشند، آن‌گاه جسم دارای بار خالصی است. در این حالت گفته می‌شود جسم باردار است (شکل ۳-۱).

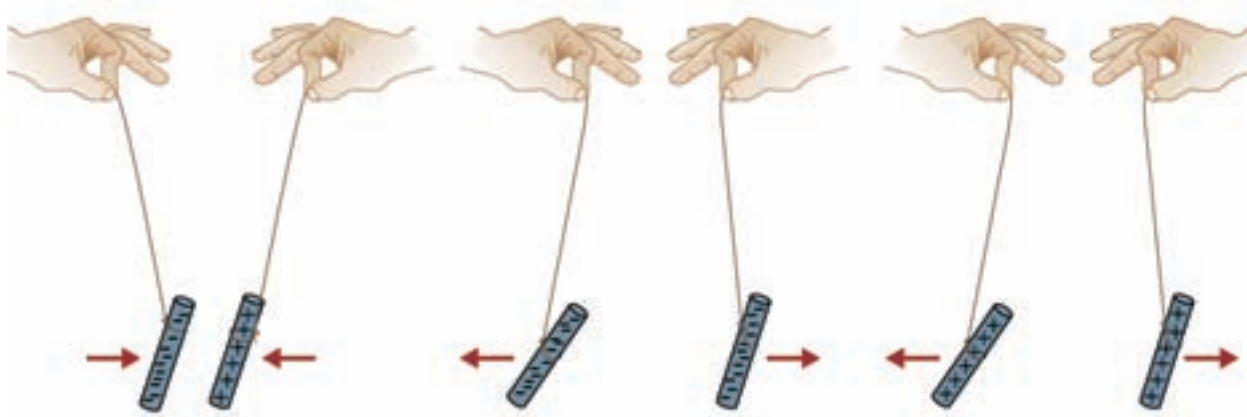


**شکل ۳-۱** وقتی تعداد بارهای مثبت و منفی در جسمی متوازن نباشد، جسم دارای بار خالص و در نتیجه باردار است.

**توجه:** در هر جسم میلیون‌ها میلیون بار مثبت و منفی وجود دارد. برای نمایش بارهای درون یک جسم تنها به رسم چند علامت + و - اکتفا می‌کنیم. اگر مطابق شکل ۲-۱ تعداد علامت‌های مثبت و منفی را یکسان رسم کنیم جسم خنثاست و اگر مطابق شکل ۳-۱ تعداد این علامت‌ها یکسان نباشد، جسم باردار است.

## پرسش ۱-۱

ورای پیچیدگی‌های مربوط به پدیده‌های الکتریکی، قاعده‌ای بنیادی وجود دارد که تقریباً تمام اثرهای دیگر ناشی از آن است. این قاعده‌ی بنیادی که در شکل ۴-۱ به طور طرحوار نشان داده شده است، چیست؟



**شکل ۴-۱** نمایش طرحوار قاعده‌ی بنیادی در خصوص پدیده‌های الکتریکی.

## ۲-۱ ساختمان اتم

منشاء بارهای الکتریکی به اجزاء اصلی سازنده‌ی ماده مربوط است. اتم‌ها که اجزای سازنده‌ی ماده هستند، از ذره‌های بسیار ریزتری به نام پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها ساخته شده‌اند (شکل ۵-۱). برخی واقعیت‌های مهم در مورد اتم‌ها عبارت‌اند از:

- هر اتم از هسته‌ی دارای بار مثبت تشکیل شده است که الکترون‌هایی با بار منفی آن را احاطه کرده‌اند.

- همه‌ی الکترون‌ها بار منفی و جرم برابر دارند.

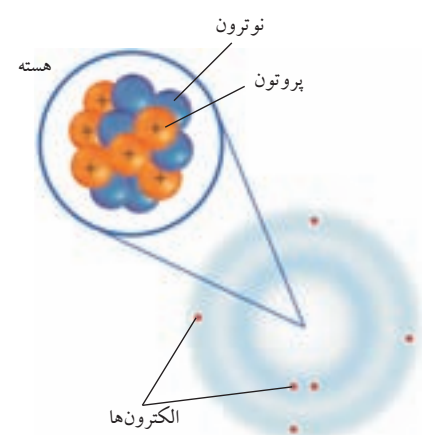
- پروتون‌ها و نوترون‌ها هسته را تشکیل می‌دهند (اتم هیدروژن معمولی، که نوترون ندارد، تنها استثنا در این مورد است).

- همه‌ی پروتون‌ها دارای بار مثبت‌اند، اما مقدار بار مثبت آن‌ها به طور دقیق برابر بار منفی الکترون‌هاست.

- نوترون‌ها خنثا هستند و هیچ بار خالصی ندارند. جرم نوترون‌ها و پروتون‌ها تقریباً یکسان و ۱۸۰۰ برابر جرم الکترون‌ها است.

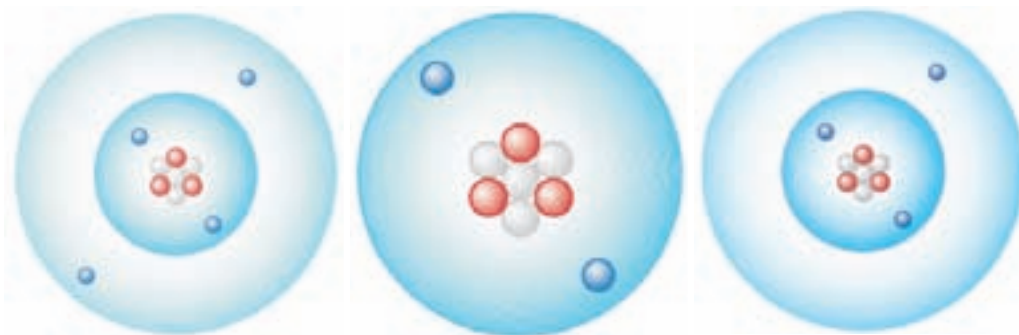
- در حالت عادی تعداد الکترون‌های اتم با تعداد پروتون‌های آن مساوی است، در نتیجه بار خالص اتم صفر است.

در یک اتم خنثا تعداد الکترون‌ها با تعداد پروتون‌های موجود در هسته برابر است (شکل ۶-۱ الف). هرگاه از اتمی یک یا چند الکترون جدا شود آنچه را که باقی می‌ماند و دارای بار مثبت است، **یون مثبت** می‌نامند (شکل ۶-۱ ب). **یون منفی** اتمی است که یک یا چند الکترون اضافی دریافت کرده باشد (شکل ۶-۱ پ).



**شکل ۵-۱** اتم کربن در حالت عادی ۶ نوترون و ۶ پروتون در هسته و ۶ الکترون در مدار دارد. بیش‌ترین فضای اتم توسط الکترون‌ها اشغال شده‌است در حالی که بیش از ۹۹/۹ درصد جرم اتم در هسته قرار دارد.

پروتون‌ها (+)  
نوترون‌ها  
الکترون‌ها (-)



**ب** یون لیتیوم منفی ( $\text{Li}^-$ ):  
۳ پروتون ( $3^+$ )  
۴ نوترون  
۴ الکترون ( $4^-$ )  
الکترون‌ها بیش‌تر از پروتون‌ها:  
بار خالص منفی.

**ب** یون لیتیوم مثبت ( $\text{Li}^+$ ):  
۳ پروتون ( $3^+$ )  
۴ نوترون  
۲ الکترون ( $2^-$ )  
الکترون‌ها کم‌تر از پروتون‌ها:  
بار خالص مثبت.

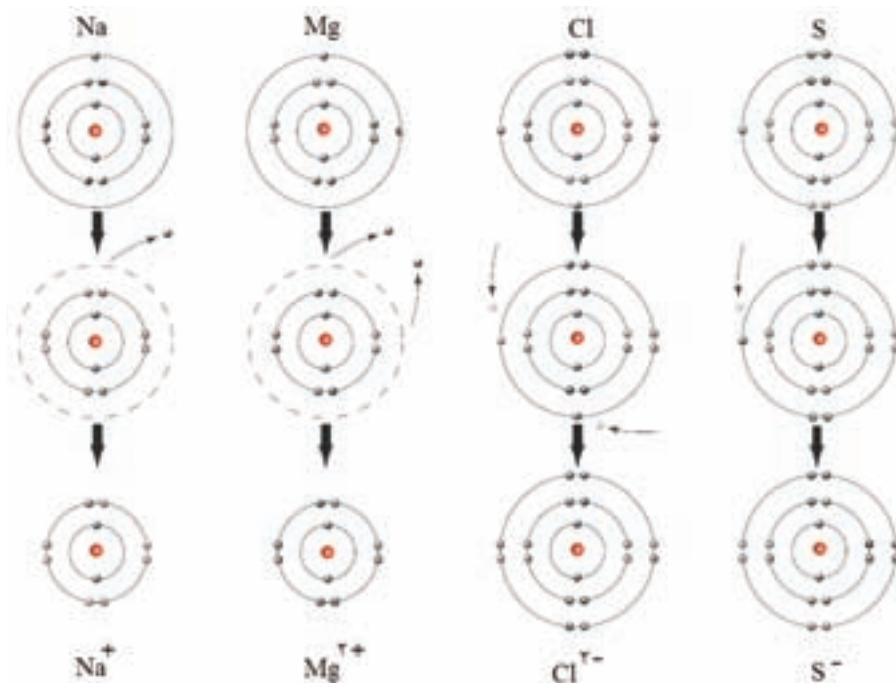
**الف** اتم لیتیوم خنثا ( $\text{Li}$ ):  
۳ پروتون ( $3^+$ )  
۴ نوترون  
۳ الکترون ( $3^-$ )  
الکترون‌ها مساوی پروتون‌ها:  
بار خالص صفر.

شکل ۶-۱



- بنجامین فرانکلین برای نخستین بار در قرن هجدهم اصطلاح‌های مثبت و منفی را برای بارهای الکتریکی به کار برد.
- چرا اتم‌ها پایدارند؟
- اگر اتم‌ها خنثا نبودند؟

دریافت کردن یا از دست دادن الکترون‌ها توسط اتم را **یونش** (یونیده شدن) می‌نامند. شکل ۱-۷ فرایند یونش را برای اتم‌های سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، گوگرد (S) و کلر (Cl) نشان می‌دهد. همان‌طور که برای مثال دیده می‌شود اتم سدیم با از دست دادن یک الکترون به یون مثبت سدیم و اتم کلر با دریافت دو الکترون به یون کلر ۲ بار منفی تبدیل شده است.

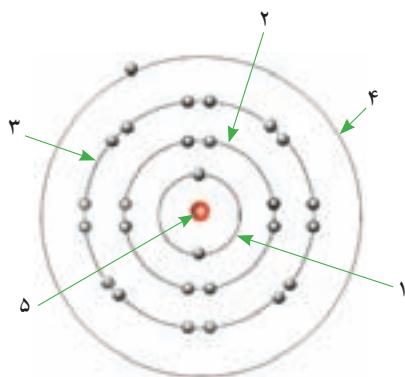


شکل ۱-۷ فرایند یونش در چند اتم متفاوت

## لایه‌ها، الکترون‌های ظرفیت و انرژی الکترون‌ها

همان‌طور که در شکل ۱-۷ نیز دیده می‌شود مدارهای الکترونی در فاصله‌ی معینی از هسته قرار دارند. هر مدار متناظر با تراز انرژی معینی درون اتم است که به لایه موسوم است. لایه‌ها با شماره‌های ۱، ۲، ۳ و... شناخته می‌شوند و لایه‌ی اول به هسته نزدیک‌تر است.

افزون بر این‌ها، هر لایه تعداد معینی الکترون را در خود جای می‌دهد. لایه‌ی اول ۲ الکترون، لایه‌ی دوم ۸ الکترون و لایه‌ی سوم حداکثر تا ۱۸ الکترون می‌پذیرد. به طور کلی تعداد الکترون‌های هر لایه را می‌توان از رابطه‌ی  $2n^2$  به دست آورد که در آن  $n$  شماره‌ی لایه است. بیش‌ترین مقدار  $n$  برای اتم‌های تمام عنصرهای شناخته شده در طبیعت برابر ۷ است.

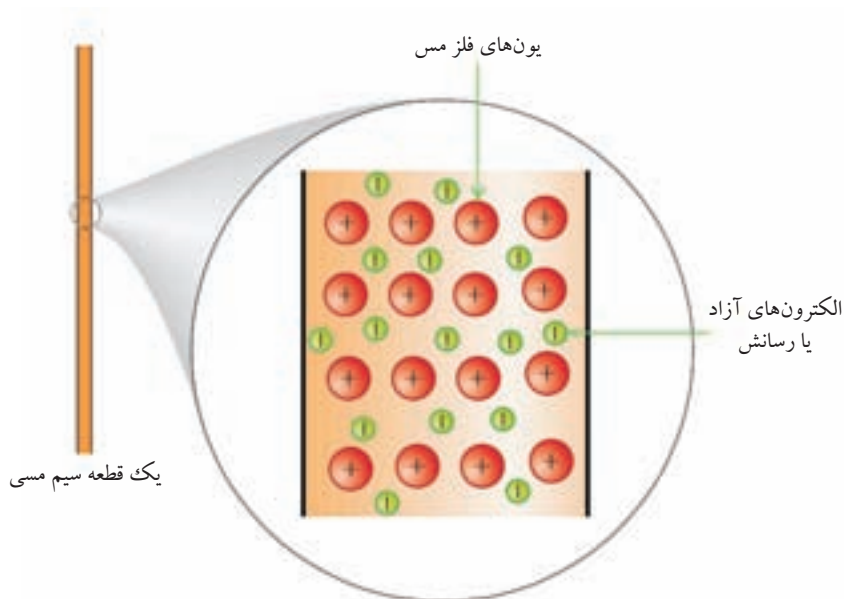


(۱) لایه اول: ۲ الکترون  
(۲) لایه دوم: ۸ الکترون  
(۳) لایه سوم: ۱۸ الکترون  
(۴) لایه چهارم: ۱ الکترون  
(۵) هسته: ۲۹ پروتون  
شکل ۸-۱ اتم مس

هرچند بار همه‌ی الکترون‌ها یکسان است ولی انرژی آن‌ها درون اتم متفاوت است به طوری که هر چه الکترون در لایه‌ی پایین‌تری باشد، یعنی به هسته نزدیک‌تر باشد، انرژی بیشتری دارد. الکترون‌های لایه‌ی آخر که به الکترون‌های ظرفیت نیز معروف‌اند، کم‌ترین انرژی را نسبت به سایر لایه‌های اتم دارند. به همین جهت جدا کردن الکترون‌های لایه‌ی آخر با انرژی کم‌تری امکان‌پذیر است.

## اتم مس

مس یکی از پر کاربردترین فلزات در صنعت برق و وسایل الکتریکی برای انتقال انرژی الکتریکی محسوب می‌شود. هر اتم مس در حالت عادی (خنثا) دارای ۲۹ الکترون است که در چهار لایه دور هسته‌ی اتم توزیع می‌شوند (شکل ۸-۱). همان‌طور که در شکل ۸-۱ نیز دیده می‌شود در لایه‌ی ظرفیت اتم مس تنها یک الکترون حضور دارد. این الکترون که به الکترون ظرفیت نیز شناخته می‌شود، با انرژی اندکی از اتم جدا می‌شود. به همین جهت در یک قطعه‌ی مسی در دمای اتاق، هر اتم می‌تواند یک الکترون را برای انتقال جریان و انرژی الکتریکی به اشتراک بگذارد. از آن‌جا که حتی در یک قطعه‌ی کوچک مسی میلیون‌ها میلیون اتم وجود دارد، دریایی از الکترون‌های آزاد به وجود می‌آید (شکل ۹-۱). این الکترون‌های آزاد به اتم معینی تعلق ندارند و به راحتی می‌توانند در سرتاسر قطعه فلز مس حرکت کنند.



شکل ۹-۱ یون‌های مثبت و الکترون‌های آزاد در بخش بسیار کوچکی از یک قطعه سیم مسی. یون‌های مثبت در محل خود تقریباً ثابت‌اند اما الکترون‌های آزاد دائماً به این سو و آن سو حرکت کرده و در حین حرکت به یکدیگر یا یون‌های مثبت برخورد می‌کنند.





- اساس کار چاپگرهای لیزری جذب و دفع جسم‌های باردار، در فناوری و صنعت کاربردهای فراوانی دارد. رنگ‌افشانی، جمع‌آوری خاکستر دودکش کارخانه‌ها، چاپ جوهرافشان غیر ضربه‌ای و فتوکپی از آن جمله‌اند.

### ۳-۱ بار الکتریکی کوانتیده است

در قرن هجدهم تصور می‌شد که بار الکتریکی شارهای پیوسته است. ولی امروزه می‌دانیم که خود شارها، از قبیل هوا و آب، نه تنها پیوسته نیستند بلکه از اتم‌ها و مولکول‌ها ساخته شده‌اند. آزمایش نشان می‌دهد که بار الکتریکی کوانتیده است و از مضرب‌های یک بار بنیادی معین ساخته شده است. هر بار مثبت یا منفی قابل مشاهده‌ی  $q$  را می‌توان چنین نوشت:

$$q = ne, n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

که در آن  $e$  همان بار بنیادی است و مقدار تقریبی زیر را دارد:

$$e = 1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

بار بنیادی  $e$  یکی از مهم‌ترین ثابت‌های طبیعت است. الکترون و پروتون هر دو باری به بزرگی  $e$  دارند (جدول ۱-۱).

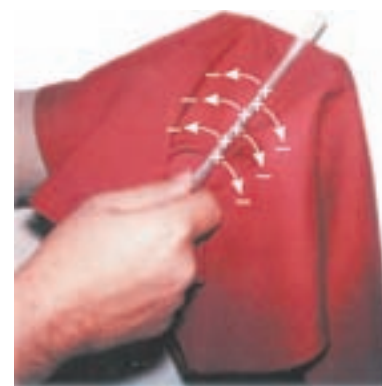
جدول ۱-۱ بارهای سه ذره‌ی سازنده‌ی اتم

ذره	نماد	بار
الکترون	$e^-$ یا $e$	$-e$
پروتون	$p$	$+e$
نوترون	$n$	$0$

وقتی یک کمیت فیزیکی مانند بار به جای هر مقداری فقط بتواند مقدارهای گسسته داشته باشد، می‌گوییم آن کمیت **کوانتیده** است. مثلاً ممکن است ذره‌ای یافت شود که کلاً هیچ بار خالصی نداشته باشد یا بار خالص آن  $+12e$  یا  $-8e$  باشد، ولی هیچ ذره‌ای، مثلاً با بار  $4/63e$  وجود ندارد.

### ۴-۱ بار الکتریکی پایسته است

هرگاه یک میله‌ی شیشه‌ای را با تکه‌ای ابریشم مالش دهیم، روی میله بار مثبت ظاهر می‌شود (شکل ۱-۱۰). اندازه‌گیری نشان می‌دهد که به همان مقدار، بار منفی نیز روی تکه‌ی ابریشم ظاهر می‌شود. این نتیجه حاکی از آن است که بر اثر مالش باری ایجاد نمی‌شود، بلکه فقط بار از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شود و بدین ترتیب خنثا بودن الکتریکی هر جسم در حین این فرایند به هم می‌خورد. این فرضیه‌ی **پایستگی بار**، که نخستین بار بنجامین فرانکلین آن را ارائه کرد، هم برای اجسام باردار بزرگ و هم



شکل ۱-۱۰ بر اثر مالش میله‌ی شیشه‌ای با پارچه‌ی ابریشمی، تعدادی از الکترون‌های میله‌ی شیشه‌ای جدا شده و به پارچه منتقل می‌شوند.



برای اتم‌ها، هسته‌ها و ذرات بنیادی برقرار است. تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافت نشده است.

## ۱-۵ خواص الکتریکی مواد

عبور بار الکتریکی از بعضی مواد آسان و از بعضی دیگر دشوار و حتی می‌توان گفت ناممکن است. مواد را به طور کلی می‌توانیم بر حسب قابلیت حرکت بار الکتریکی در آن‌ها به چهار رده‌ی رساناها، عایق‌ها، نیمرساناها و ابررساناها دسته‌بندی کنیم. هر یک از این مواد در صنایع مختلف، از جمله صنعت برق کاربرد فراوانی دارند.

### رساناها

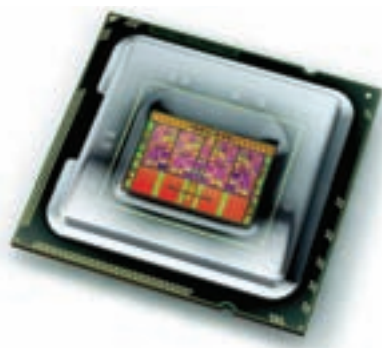
رساناها موادی هستند که بار می‌تواند در آن‌ها نسبتاً به آزادی حرکت کند. فلزات (مانند یک قطعه سیم مسی)، بدن انسان و آب آشامیدنی مثال‌هایی از این دست هستند. هر فلز، یک یا دو الکترون در لایه‌ی ظرفیت خود دارد که به آسانی از اتم خود جدا می‌شوند و در سر تا سر فلز حرکت می‌کنند. همین امر دلیل رسانش الکتریکی خوب بیش‌تر فلزات است. بهترین رساناهای فلزی به ترتیب عبارت‌اند از: نقره، مس، طلا، آلومینیوم، تنگستن و آهن.

### عایق‌ها

عایق‌ها موادی هستند که بارهای الکتریکی نمی‌توانند در آن‌ها به آزادی حرکت کنند. لاستیک (مانند عایق روی سیم‌های برق)، پلاستیک، شیشه و آب مقطر مثال‌هایی از این دست هستند. معمولاً تعداد الکترون‌های لایه‌ی آخر اتم‌های سازنده‌ی مواد عایق کامل است و اساساً الکترون آزادی در این گونه مواد وجود ندارد. کوارتز ذوب شده، گوگرد و برخی از انواع شیشه‌ها از جمله بهترین عایق‌های الکتریکی محسوب می‌شوند.

### نیمرساناها

بعضی مواد مانند ژرمانیوم یا سیلیسیوم نه رسانای خوبی هستند و نه عایقی خوب. این مواد که در وسط گستره‌ی مواد رسانا و عایق قرار می‌گیرند، وقتی به صورت بلور خالص باشند عایق‌هایی خوب‌اند و هنگامی که حتی به جای یکی از هر ۱۰ میلیون اتم آن‌ها یک ناخالصی قرار بگیرد و الکترونی را به ساختار بلور اضافه یا از آن کم کند، رساناهایی بسیار خوب می‌شوند. ماده‌ای را که بتوان واداشت تا گاهی به صورت عایق رفتار کند و گاهی به صورت رسانا، **نیمرسانا** می‌نامند. امروزه نیمرساناها در ساخت ترانزیستورهای استفاده می‌شوند که به طور گسترده‌ای در پردازنده‌ی رایانه‌ها به کار می‌روند (شکل ۱-۱۱).



شکل ۱-۱۱ نوعی از پردازنده‌های Corei7 که حدود ۱/۷ میلیارد ترانزیستور با فناوری ساخت ۳۲ نانومتر روی تراشه‌ی آن قرار داده شده است.



● باردار شدن القایی هنگام آذرخش (آذرخش تخلیه‌ی الکتریکی بین ابر و زمین با بار مخالف یا بین بخش‌های مختلف ابرهای با بار مخالف است).



برخی از مواد در دماهای بسیار کم ویژگی شگفت‌انگیزی از خود نشان می‌دهند و مقاومت الکتریکی آن‌ها از بین می‌رود. این مواد در برابر عبور جریان دارای مقاومت صفر (رسانندگی بی‌نهایت) می‌شوند.

این مواد **ابرسانا** نامیده می‌شوند. وقتی جریان الکتریکی در ابرسانا برقرار شود، حرکت الکترون‌ها به صورت نامحدود تداوم می‌یابد و اتلاف انرژی عملاً صفر می‌شود. یکی از آرمان‌های دانشمندان ساخت سیم‌های ابرسانایی است که به کمک آن‌ها بتوان انرژی الکتریکی را بدون اتلاف از نیروگاه‌ها به محل مصرف انتقال داد.

## ۱-۶ روش‌های باردار کردن اجسام

با توجه به آنچه دیدیم، با وارد کردن یا جدا کردن الکترون از یک جسم می‌توان آن‌را باردار کرد. الکترون‌ها به سه روش می‌توانند از جسمی جدا یا به آن منتقل شوند: از راه مالش، از راه تماس، از راه القا. در فیزیک (۱) و آزمایشگاه با این شیوه‌های باردار کردن اجسام آشنا شدیم. برای یادآوری، هر یک از این روش‌ها به طور طر حوار در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده‌اند.



(۱) کره‌ی رسانای بدون بار



(۲) نزدیک کردن میله‌ی باردار به کره



(۳) تماس کره با زمین

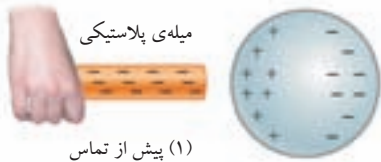


(۴) وضعیت کره پس از تماس با زمین

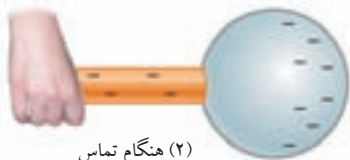


(۵) توزیع بارها روی سطح کره

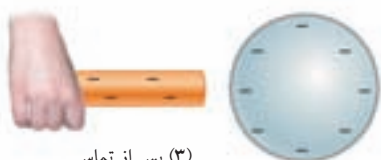
کره‌ی رسانای بدون بار



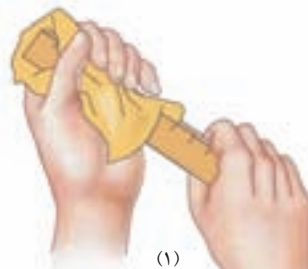
(۱) پیش از تماس



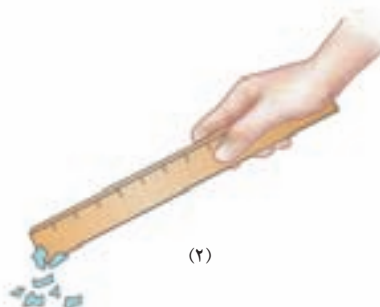
(۲) هنگام تماس



(۳) پس از تماس



(۱)



(۲)

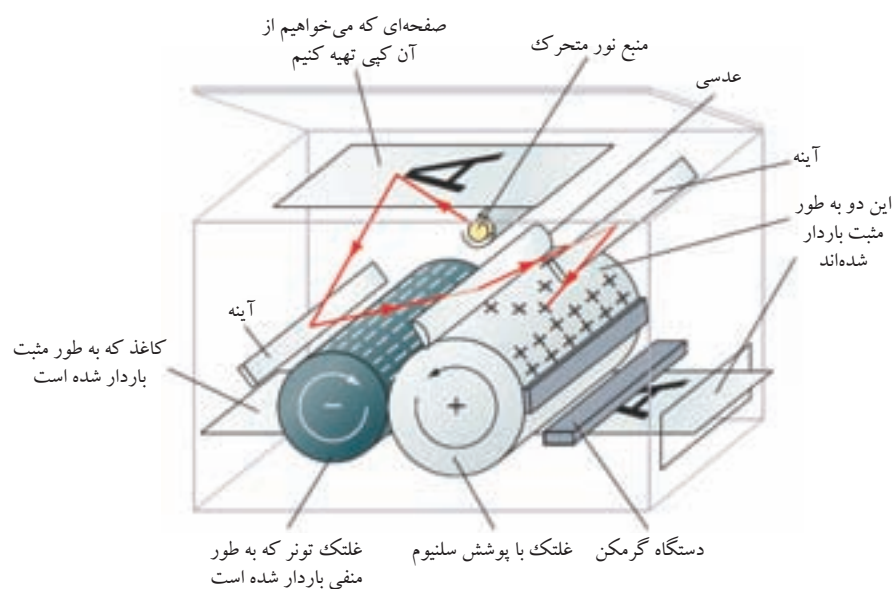
۳ باردار کردن با تماس. وقتی میله‌ی باردار در تماس با جسم بدون بار قرار گیرد، الکترون‌هایی وارد جسم می‌شوند. پس از تماس، الکترون‌ها در تمام قسمت‌های سطح کره‌ی فلزی توزیع می‌شوند.

۴ باردار کردن مالشی. هنگام مالش خط‌کش پلاستیکی با پارچه (مرحله ۱)، خط‌کش و پارچه باردار می‌شوند. با نزدیک کردن خط‌کش باردار به خرده‌های کاغذ (مرحله ۲)، آن‌ها جذب خط‌کش می‌شوند.

۵ باردار کردن القایی. توجه کنید میله‌ی باردار هرگز با کره در تماس نبوده و بار اولیه‌ی خود را حفظ کرده است. همچنین نوع بار میله و بار کره در روش باردار ساختن القایی مخالف یکدیگر است.

چرا بار میله‌ی منفی در شکل ۱۲-۱ الف قبل و بعد از باردار شدن کره تغییر نمی‌کند، اما وقتی باردار شدن مطابق شکل ۱۳-۱ پ صورت می‌گیرد چنین نیست؟

شکل ۱۳-۱ ساختمان داخلی یک دستگاه فتوکپی امروزی را نشان می‌دهد. با توجه به مفاهیمی که تاکنون فرا گرفته‌اید گزارشی در خصوص نحوه‌ی عملکرد این دستگاه تهیه کنید و به کلاس ارائه دهید.

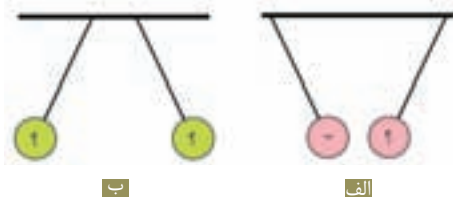


شکل ۱۳-۱



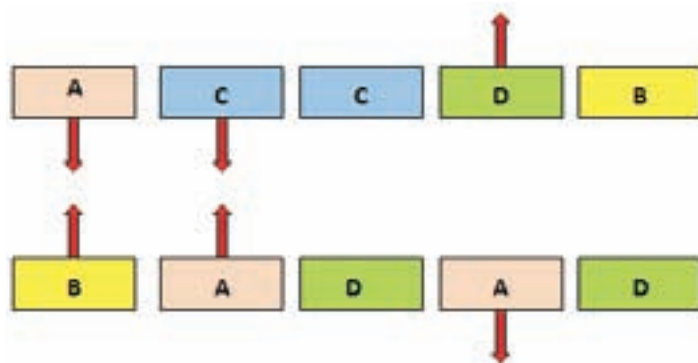
### پرسش‌های مفهومی

۱- توپ‌های بارداری توسط نخ‌های عایقی مطابق شکل ۱-۱۴ آویزان شده‌اند. با توجه به وضعیت توپ‌ها نسبت به یکدیگر، نوع بار هر توپ را تعیین کنید.



شکل ۱-۱۴

۲- شکل ۱-۱۵ پنج جفت صفحه را نشان می‌دهد به طوری که A، B و D صفحه‌های پلاستیکی بارداری هستند و C یک صفحه‌ی مسی است که از لحاظ الکتریکی خنثاست. دافعه یا جاذبه‌ی بین سه جفت از این صفحه‌ها نشان داده شده است. برای دو جفت باقی‌مانده، آیا صفحه‌ها همدیگر را جذب می‌کنند یا دفع؟



شکل ۱-۱۵

۳- الکتروسکوپ یا برق‌نما ابزار ساده‌ای شامل از یک گوی فلزی است که توسط میله‌ی رسانایی به دو برگی فلزی نازک متصل شده است (شکل ۱-۱۶). این دو برگه برای محافظت از آشفته‌گی‌های هوا درون شیشه‌ای قرار گرفته‌اند.

الف) وقتی جسم بارداری را به گوی فلزی نزدیک کنیم یا تماس دهیم، برگه‌هایی که معمولاً آویزان‌اند از هم دور می‌شوند. چرا؟

ب) الکتروسکوپ‌ها نه تنها آشکارساز بارند، بلکه برای اندازه‌گیری نوع بار نیز به کار می‌روند. توضیح دهید چگونه می‌توان این کار را انجام داد.



• ساخت الکتروسکوپ با وسایل

ساده

• آزمایش با الکتروسکوپ



شکل ۱-۱۶

۴- شکل ۱-۱۷ مقطعی از یک جسم رسانا و یک جسم عایق را نشان می دهد. با توجه به توضیحات هر شکل، دلیل رسانا و عایق بودن هر کدام را شرح دهید.



شکل ۱-۱۷

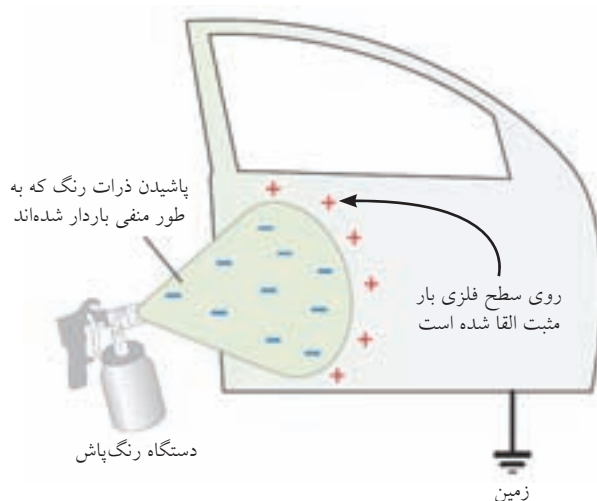
۵- شیر آب سرد را کمی باز کنید تا باریکه ای از آب ایجاد شود. شانه ای پلاستیکی را چند بار به موهایتان یا یک لباس پشمی مالش دهید و آن را به باریکه ای آب نزدیک کنید (شکل ۱-۱۸). چرا مسیر باریکه ای آب به سمت شانه منحرف می شود؟



شکل ۱-۱۸

۶- وقتی ماده‌ای را به ماده‌ی دیگر مالش دهید، الکترون‌ها فوراً از ماده‌ای به ماده‌ی دیگر می‌روند ولی پروتون‌ها چنین نیستند. چرا چنین است؟ (با توجه به ساختار اتم توضیح دهید.)

۷- امروزه رنگ‌پاشی الکتروستاتیکی، روشی متداول برای رنگ کردن سطوح فلزی (مانند بدنه‌ی اتومبیل‌ها) به طور کاملاً یکنواخت است. شکل ۱-۱۹ این روش را به طور طرحوار نشان می‌دهد. چرا قطعه‌ی فلزی را که می‌خواهند رنگ بزنند به زمین وصل کرده‌اند؟



شکل ۱-۱۹ روش رنگ‌پاشی الکتروستاتیکی

# نیروی الکتریکی، میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی



۲

یک مولد وان دوگراف معمولی قادر است در سطح گنبد رسانای خود تا چند صد هزار ولت، پتانسیل الکتریکی تولید کند. این پتانسیل بالا می تواند هوای پیرامون را یونیزه و سبب تخلیه الکتریکی کافی است در یک حفاظ فلزی (قفس فارادی) باشید.



## سپمای فصل دوم

۱-۲ قانون کولن

۲-۲ میدان الکتریکی

۳-۲ انرژی پتانسیل الکتریکی

۴-۲ آشنایی با برخی از روش‌های تولید الکتریسیته

ارزشیابی فصل دوم

## نیروی الکتریکی، میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی

در فصل اول با ماهیت بارهای الکتریکی در مواد آشنا شدیم. همچنین دیدیم نوع اتم‌های هر جسم چگونه می‌تواند در باردار شدن جسم و نوع بار آن نقش داشته باشد. افزون بر این‌ها با شیوه‌های باردار کردن مواد و برخی از کاربردهای آن‌ها در دنیای امروز آشنا شدیم. در این فصل به نیروی بین بارهای الکتریکی که توسط قانون کولن توصیف می‌شود و همچنین بررسی ویژگی‌های میدانی که در اطراف هر بار الکتریکی به وجود می‌آید خواهیم پرداخت. سرانجام با پتانسیل الکتریکی و برخی از روش‌های تولید الکتریسیته آشنا خواهیم شد. از آن‌جا که درک مفاهیم الکتریسیته به رهیافتی گام به گام نیاز دارد - زیرا هر مفهوم اساس مفهوم بعدی را تشکیل می‌دهد - پیش از شروع این فصل از تسلط روی مفاهیم فصل اول اطمینان پیدا کنید.

### ۱-۲ قانون کولن

شارل کولن فیزیکدان فرانسوی در اواخر قرن هجدهم رابطه‌ی حاکم بر دو ذره‌ی باردار را پس از آزمایش‌های فراوانی کشف کرد. امروزه این رابطه به نام **قانون کولن** شناخته می‌شود.

برای بررسی قانون کولن فرض کنید دو ذره‌ی باردار نزدیک یکدیگر آورده شوند، در این صورت هر ذره بر ذره‌ی دیگر نیرویی وارد می‌کند. اگر علامت بار ذره‌ها یکسان باشد، آن‌ها یکدیگر را دفع می‌کنند (شکل‌های ۱-۲ الف و ب). یعنی نیروی وارد بر هر ذره در جهت دور شدن از ذره‌ی دیگر است و اگر ذره‌ها بتوانند حرکت کنند، از یکدیگر دور می‌شوند. اگر به جای این، علامت بار ذره‌ها مخالف هم باشد، آن‌ها یکدیگر را جذب می‌کنند (شکل ۱-۲ پ). در صورتی که این ذره‌ها بتوانند حرکت کنند، به یکدیگر نزدیک می‌شوند.



پ

ب

الف

شکل ۱-۲ دو ذره‌ی باردار همدیگر را دفع می‌کنند، اگر علامت بار مشابه‌ای داشته باشند (شکل‌های الف و ب) یکدیگر را جذب می‌کنند اگر علامت بار آن‌ها مخالف باشد (شکل پ).  $F_{12}$  نیرویی است که ذره‌ی ۱ به ذره‌ی ۲ وارد می‌کند و  $F_{21}$  نیرویی است که ذره‌ی ۲ به ذره‌ی ۱ وارد می‌کند.

## هدف‌های آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما فرا می‌گیرید:

○ چگونه از قانون کولن برای پیدا کردن نیروی بین دو ذره‌ی باردار استفاده کنید.

○ تفاوت بین نیروی الکتریکی و میدان الکتریکی چیست.

○ چگونه نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره‌ی باردار را در میدان الکتریکی به دست آورید.

○ چگونه از ایده‌ی خط‌های میدان برای توصیف میدان الکتریکی استفاده کنید.

○ معنا و مفهوم انرژی پتانسیل الکتریکی چیست و چه تمایزی با پتانسیل الکتریکی دارد.

○ چگونه از پتانسیل الکتریکی، میدان الکتریکی را به دست آورید.

○ آشنایی با برخی از روش‌های تولید الکتریسیته و کاربرد آن‌ها در فناوری.

این نیروی دافعه یا جاذبه که ناشی از مشخصه‌های بار اجسام است، **نیروی الکتروستاتیکی** خوانده می‌شود. برای ذره‌های باردار شکل ۱-۲، که ذره‌ی ۱ دارای بار  $q_1$  و ذره‌ی ۲ بار  $q_2$  است، نیروی الکتروستاتیکی بین آن‌ها از قانون کولن به دست می‌آید. بنا به قانون کولن بزرگی این نیرو که بر هر ذره وارد می‌شود از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (1-2)$$

در این رابطه  $r$  فاصله بین ذره‌های باردار و  $k$  ثابت تناسب است. ثابت تناسب  $k$  در قانون کولن عدد بسیار بزرگی است و مقدار آن تقریباً برابر است با:

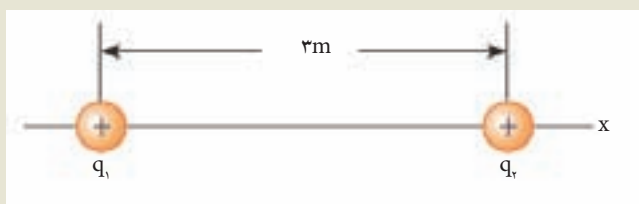
$$k = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$$

یکای ثابت تناسب  $k$  بر حسب یکاهای دستگاه بین‌المللی (SI) بیان شده است.<sup>۱</sup> توجه داشته باشید که در (SI) یکای بار الکتریکی بر حسب کولن (C)، یکای طول بر حسب متر (m) و یکای نیرو بر حسب نیوتون (N) بیان می‌شود.

**توجه:** قانون کولن فقط برای ذره‌های باردار یا هر دو جسم باردار که اندازه‌شان بسیار کوچک‌تر از فاصله‌ی بین آن‌ها باشد، برقرار است. این قانون از هر آزمون تجربی‌ای سربلند بیرون آمده است و تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافت نشده است.

## مثال ۱-۲

شکل ۲-۲ دو ذره‌ی باردار مثبت را نشان می‌دهد که در جای خود روی محور  $x$  ثابت شده‌اند. بارها عبارت‌اند از  $q_1 = 1/2 \times 10^{-6} \text{ C}$  و  $q_2 = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$ ، و فاصله‌ی بین آن‌ها  $r = 3 \text{ m}$  است. بزرگی و جهت نیروی الکتروستاتیکی وارد بر ذره‌ی ۲ از سوی ذره‌ی ۱ چیست؟



شکل ۲-۲ دو ذره‌ی باردار  $q_1$  و  $q_2$  در جای خود روی محور  $x$  ثابت شده‌اند.

۱ - برای آشنایی بیش‌تر با دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) پیوست پ را ببینید.

حل:

با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

$$q_1 = 1/2 \times 10^{-6} \text{ C}, q_2 = 5/10 \times 10^{-6} \text{ C}, r = 3 \text{ m}$$

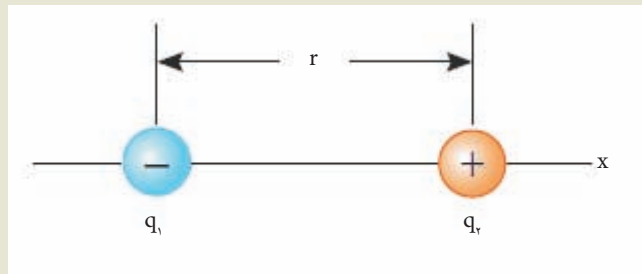
با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه‌ی کولن داریم:

$$\begin{aligned} F &= k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \\ &= (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2) \frac{|(1/2 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (5/10 \times 10^{-6} \text{ C})|}{(3 \text{ m})^2} \\ &= 5/6 \times 10^{-7} \text{ N} \end{aligned}$$

چون علامت بار دو ذره مشابه است، نیروی بین آن‌ها دافعه است و جهت نیروی الکتروستاتیکی وارد بر ذره‌ی ۲ از سوی ذره‌ی ۱ در امتداد محور x و به طرف راست است.

## مثال ۱-۲

فاصله‌ی میان دو بار نقطه‌ای  $q_1 = -1/8 \times 10^{-4} \text{ C}$  و  $q_2 = 3/5 \times 10^{-4} \text{ C}$  باید چقدر باشد تا بزرگی نیروی الکتروستاتیکی بین آن‌ها ۶N شود (شکل ۳-۲)؟



شکل ۳-۲ دو ذره‌ی باردار  $q_1$  و  $q_2$  در جای خود روی محور x ثابت شده‌اند.

حل:

با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

$$q_1 = -1/8 \times 10^{-4} \text{ C}, q_2 = 3/5 \times 10^{-4} \text{ C}, F = 6 \text{ N}$$

با جای‌گذاری این مقادیر در قانون کولن داریم:

$$\begin{aligned} F &= k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \\ 6 \text{ N} &= (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2) \frac{|(-1/8 \times 10^{-4} \text{ C}) \times (3/5 \times 10^{-4} \text{ C})|}{r^2} \end{aligned}$$

با ساده کردن رابطه‌ی اخیر داریم:

$$r^2 = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2)(1/8 \times 10^{-4} \text{ C})(3/5 \times 10^{-4} \text{ C})}{6 \text{ N}}$$

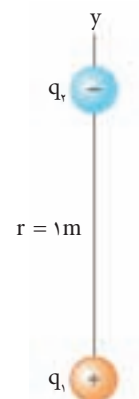
$$= 81 \times 10^{-10} \text{ m}^2$$

به این ترتیب مقدار  $r$  برابر است با:

$$r = 9 \times 10^{-5} \text{ m}$$

## تمرین ۱-۲

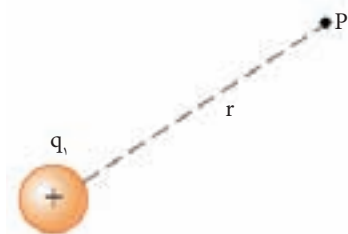
شکل ۴-۲ دو ذره‌ی باردار مثبت و منفی را نشان می‌دهد که در جای خود روی محور  $y$  ثابت شده‌اند. فاصله‌ی بین بارها برابر  $r = 1 \text{ m}$  و بزرگی نیرویی که هر ذره به ذره‌ی دیگر وارد می‌کند برابر  $3 \times 10^{-4} \text{ N}$  است. بزرگی حاصل ضرب بار دو ذره  $|q_1 q_2|$  چقدر است؟



شکل ۴-۲ دو ذره‌ی باردار  $q_1$  و  $q_2$  در جای خود روی محور  $y$  ثابت شده‌اند.

## ۲-۲ میدان الکتریکی

همان‌طور که در شکل ۱-۲ دیدیم نیروی الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار که با یکدیگر در تماس نیستند می‌تواند به صورت دافعه یا جاذبه وجود داشته باشد. حال پرسش‌هایی مطرح می‌شود که با وجود این که این دو ذره با یکدیگر در تماس نیستند چگونه ذره‌ی ۱ بر ذره‌ی ۲ نیرو وارد می‌کند؟ آیا این نیرو از راه دور اثر می‌کند و از فضای خالی بین دو ذره‌ی باردار نیز عبور کرده است؟ آیا اگر ذره‌ی ۲ را برداشته و مکان آن را با  $P$  نشان دهیم (شکل ۵-۲)، همچنان آثار الکتریکی ذره‌ی ۱ در این مکان وجود دارد؟



شکل ۵-۲ آیا در نقطه‌ی  $P$  آثار الکتریکی ناشی از بار  $q_1$  وجود دارد؟

## بیش‌تر بدانید

آشنایی با زندگی و فعالیت‌های شارل آگوستین کولن که با استفاده از ترازوی پیچشی رابطه‌ی حاکم بین ذره‌های باردار را کشف کرد.





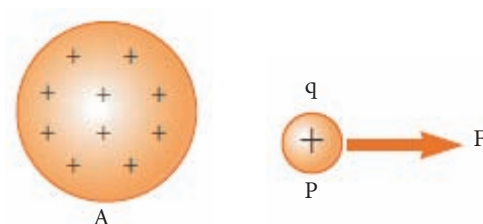
- قانون کولن
- جاذبه و دافعه‌ی ذره‌های باردار

در پاسخ به این پرسش‌ها باید گفت: فضای اطراف هر جسم دارای بار الکتریکی پُر از میدان الکتریکی است. اگر هر جسم باردار دیگری در این فضا قرار دهیم بر آن نیرو وارد می‌شود.

**میدان الکتریکی** هم اندازه (شدت) دارد و هم جهت. اندازه‌ی میدان الکتریکی در هر نقطه صرفاً نیرو به ازای واحد بار است. برای درک این موضوع به شکل ۲-۶ توجه کنید. اگر نیرویی که جسم باردار A به ذره‌ی باردار q در نقطه‌ی P وارد می‌کند برابر F باشد، اندازه‌ی میدان الکتریکی در آن نقطه برابر است با:

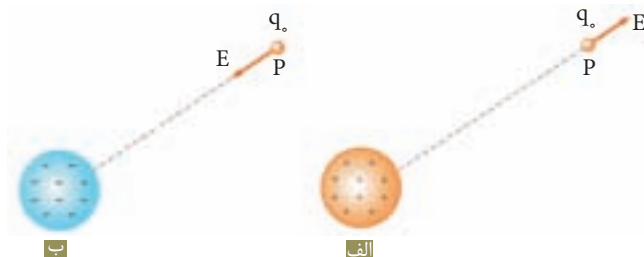
$$E = \frac{F}{q} \quad (۲-۲)$$

یکای میدان الکتریکی در SI، نیوتون بر کولن (N/C) است.



**شکل ۲-۶** نیروی الکتروستاتیکی F که از طرف جسم باردار A بر ذره‌ی باردار q اثر می‌کند. اندازه‌ی (شدت) میدان الکتریکی در نقطه‌ی P بنا به تعریف برابر  $E = F/q$  است.

جهت میدان الکتریکی در هر نقطه در همان جهت نیرو است و بنا بر تعریف در جهتی است که یک بار آزمون مثبت در حال سکون رانده می‌شود.<sup>۱</sup> این موضوع برای دو جسم باردار مثبت و منفی در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.



**شکل ۲-۷** جهت میدان الکتریکی در هر نقطه‌ی دلخواه مانند P در جهت نیرویی است که بر بار مثبت آزمون  $q_0$  وارد می‌شود. (الف) اگر بار جسم مثبت باشد، میدان الکتریکی در نقطه‌ی P در سوی دور شدن از جسم است و (ب) اگر بار جسم منفی باشد، میدان الکتریکی در نقطه‌ی P در سوی نزدیک شدن به جسم است.

۱ - بار آزمون بسیار کوچک است به طوری که تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی میدان الکتریکی جسم‌های باردار ندارد.

اندازه‌ی میدان الکتریکی در اطراف سیم‌های برق خانه حدود  $3 \text{ N/C}$  است. هرگاه غباری باردار با بار الکتریکی  $3 \text{ nC}$  از نزدیکی سیم برق خانه‌ای بگذرد، اندازه‌ی نیروی الکتریکی وارد بر آن چقدر است؟

**حل:**

با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

$$E = 3 \text{ N/C}, q = 3 \text{ nC} = 3 \times 10^{-9} \text{ C}$$

از تعریف میدان الکتریکی داریم:

$$E = \frac{F}{q} \Rightarrow F = qE$$

با جای‌گذاری مقادیر داده شده در رابطه‌ی بالا داریم:

$$F = (3 \times 10^{-9} \text{ C})(3 \text{ N/C}) = 9 \times 10^{-9} \text{ N}$$

همان‌طور که دیده می‌شود اندازه‌ی این نیرو بسیار اندک است.

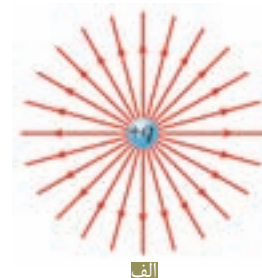
## تمرین ۲-۲

هر قطره‌ی جوهر در چاپگرهای جوهرافشان، حامل بار  $1.6 \text{ nC}$  است و با نیروی  $3 \times 10^{-4} \text{ N}$  به طرف کاغذ منحرف می‌شود. شدت میدان الکتریکی تولید کننده‌ی این نیرو را به دست آورید.

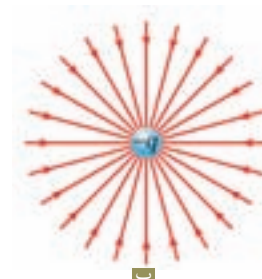
## خط‌های میدان الکتریکی

یک راه بهتر برای توصیف میدان الکتریکی استفاده از خط‌های میدان است. این خط‌ها تصویری واضح از مفهوم میدان الکتریکی در ذهن ایجاد می‌کنند. مفهوم خط‌های میدان را اولین بار مایکل فارادی در قرن نوزدهم میلادی مطرح ساخت. او آن‌ها را خط‌های نیرو نامید ولی امروزه از عبارت خط‌های میدان استفاده می‌شود.

شکل ۲-۸ خط‌های میدان الکتریکی را در اطراف دو بار نقطه‌ای  $+q$  و  $-q$  نشان می‌دهد. در رسم این خط‌ها باید به این نکته توجه شود که هر چه به بار نزدیک‌تر می‌شویم تراکم خط‌ها باید بیش‌تر و هر چه از بار دور‌تر می‌شویم تراکم خط‌ها باید کم‌تر باشد. به این ترتیب در جایی که خط‌های میدان نزدیک یکدیگرند، شدت میدان الکتریکی  $E$  بزرگ‌تر و در جایی که خط‌های میدان دور از یکدیگرند شدت میدان الکتریکی  $E$  کوچک‌تر است.



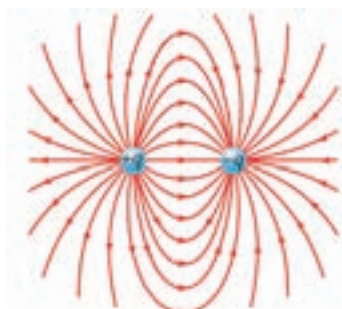
الف



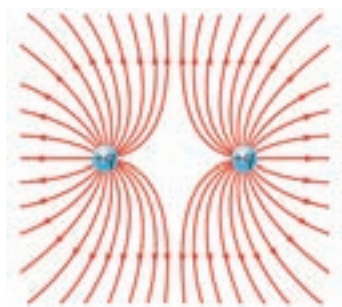
ب

شکل ۲-۸ رسم خط‌های میدان الکتریکی (الف) اطراف بار نقطه‌ای  $+q$  و (ب) در اطراف بار نقطه‌ای  $-q$ .





الف



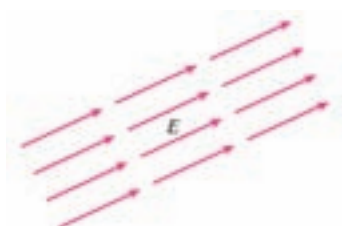
ب

در شکل ۹-۲ الف خط‌های میدان الکتریکی برای دو بار نقطه‌ای ناهمنام و در شکل ۹-۲ ب برای دو بار نقطه‌ای همنام نشان داده شده است. توجه کنید برای دو بار ناهمنام، خط‌های میدان الکتریکی از بار مثبت سرچشمه می‌گیرند و به بار منفی ختم می‌شوند.

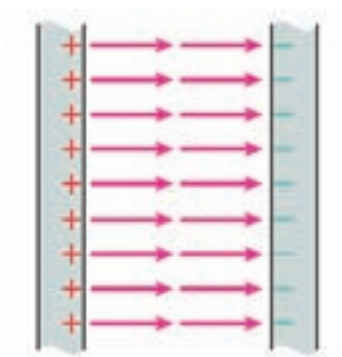
## میدان الکتریکی یکنواخت

هرگاه بزرگی و جهت میدان الکتریکی در ناحیه‌ای از فضا تغییر نکند، گفته می‌شود میدان الکتریکی در این ناحیه از فضا یکنواخت است. شکل ۱۰-۲ خط‌های میدان الکتریکی یکنواخت را نشان می‌دهد. ساده‌ترین راه برای ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت، استفاده از دو ورقه‌ی موازی باردار است که بار آن‌ها مساوی و مخالف یکدیگرند (شکل ۱۱-۲).

شکل ۹-۲ (الف) خط‌های میدان برای دو بار ناهمنام و (ب) خط‌های میدان برای دو بار همنام. اگر دو بار منفی باشند، تنها جهت خط‌های میدان بر عکس می‌شود.



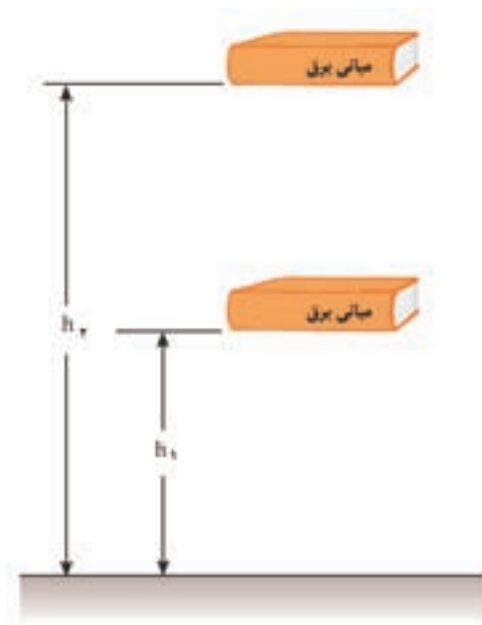
شکل ۱۰-۲ میدان الکتریکی یکنواخت در ناحیه‌ای از فضا



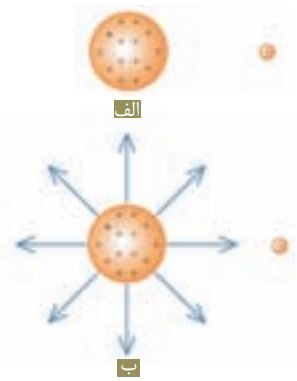
شکل ۱۱-۲ میدان الکتریکی یکنواخت در فضای بین دو ورقه‌ی رسانای باردار با بار مساوی و مخالف. خط‌های میدان از بارهای مثبت سرچشمه می‌گیرند و به بارهای منفی ختم می‌شوند.

## ۳-۲ انرژی پتانسیل الکتریکی

در علوم دوره‌ی راهنمایی و همچنین فیزیک (۱) و آزمایشگاه با تعریف و رابطه‌ی انرژی پتانسیل گرانشی آشنا شدیم. به طوری که دیدیم هر چه جسمی نسبت به سطح زمین در ارتفاع بالاتری باشد، انرژی پتانسیل گرانشی بیشتری دارد (شکل ۱۲-۲).



شکل ۱۲-۲ انرژی پتانسیل گرانشی کتاب در ارتفاع  $h_2$  بیش‌تر از ارتفاع  $h_1$  است، زیرا  $h_2 > h_1$  است.



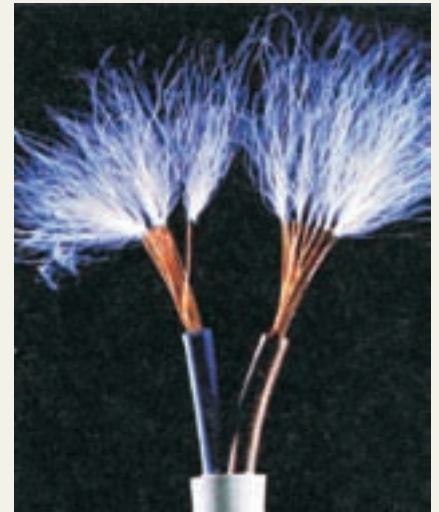
**شکل ۱۳-۲** (الف) ذره‌ای باردار در نزدیکی کره‌ای باردار، (ب) برای حرکت ذره‌ی باردار به طرف کره‌ی باردار (در خلاف جهت میدان الکتریکی) باید انرژی مصرف شود. انرژی مصرف شده به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در مجموعه‌ی ذره و کره‌ی باردار ذخیره می‌شود.

به همین ترتیب هر جسم باردار به واسطه‌ی مکانش در میدان الکتریکی دارای انرژی پتانسیل الکتریکی است. برای بررسی این موضوع ذره‌ای با بار مثبت را در نظر بگیرید که در فاصله‌ای از کره‌ای با بار مثبت قرار دارد (شکل ۱۳-۲ الف). برای نزدیک‌تر کردن ذره‌ی باردار به کره، باید انرژی مصرف کرد تا بتوان بر دافعه کره‌ی باردار غلبه نمود (شکل ۱۳-۲ ب). بنابر قانون پایستگی انرژی، انرژی مصرف شده از بین نمی‌رود بلکه به نوع دیگری از انرژی تبدیل می‌شود. این انرژی جدید را، که ذره‌ی باردار به واسطه‌ی مکانش نسبت به کره‌ی باردار به دست می‌آورد، **انرژی پتانسیل الکتریکی** می‌نامیم. چنانچه ذره‌ی باردار رها شود، در جهت دور شدن از کره‌ی باردار به حرکت در می‌آید و انرژی پتانسیل الکتریکی آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

## مطالعه‌ی آزاد

### فرو ریزش الکتریکی و تخلیه‌ی جرقه‌ای

اگر شدت میدان الکتریکی در هوا از یک مقدار حدی معینی فراتر رود، هوا دستخوش فرو ریزش الکتریکی می‌شود. بر اثر فرو ریزش الکتریکی، الکترون‌های اتم‌های موجود در هوا جدا می‌شوند. پس از آن میدان الکتریکی، الکترون‌های آزاد شده را به حرکت در می‌آورد. به هنگام حرکت این الکترون‌ها، آن‌ها با هر اتمی در مسیر حرکت خود برخورد می‌کنند و بدین ترتیب موجب گسیل نور از آن اتم‌ها می‌شوند. به دلیل همین نور گسیل شده است که می‌توانیم مسیر حرکت الکترون‌ها را، که غالباً جرقه نامیده می‌شود، مشاهده کنیم. شکل ۱۴-۲ جرقه‌های بالای سیم‌های فلزی بارداری را نشان می‌دهد که در آن‌جا میدان‌های الکتریکی حاصل از سیم‌ها موجب فرو ریزش الکتریکی هوا شده‌اند.



**شکل ۱۴-۲** سیم‌های فلزی به حدی باردار شده‌اند که میدان‌های الکتریکی حاصل از آن‌ها در فضای اطراف، موجب فرو ریزش الکتریکی در آن‌جا شده است.

## پتانسیل الکتریکی

به جای پرداختن به انرژی پتانسیل الکتریکی یک جسم باردار، ساده‌تر آن است که هنگام کار با ذره‌های باردار واقع در میدان الکتریکی، انرژی پتانسیل الکتریکی را به ازای واحد بار در نظر بگیریم. مفهوم انرژی پتانسیل الکتریکی به ازای واحد بار را **پتانسیل الکتریکی** می‌نامند؛ یعنی:

بیش تر بدانید و آزمایشگاه مجازی



• اجاق میکروموج و نقش میدان الکتریکی در پختن غذا



- میدان الکتریکی بار نقطه‌ای مثبت
- میدان الکتریکی بار نقطه‌ای منفی
- خط‌های میدان برای چند بار نقطه‌ای

$$\text{انرژی پتانسیل الکتریکی} = \frac{\text{پتانسیل الکتریکی}}{\text{بار}}$$

یا به طور نمادین:  
(۳-۲)

$$V = \frac{U}{q}$$

با توجه به این که یکای انرژی پتانسیل الکتریکی و بار الکتریکی در SI به ترتیب ژول (J) و کولن (C) است، یکای پتانسیل الکتریکی ژول بر کولن (J / C) خواهد بود که آن را ولت نیز می‌نامند.

### توجه: پتانسیل الکتریکی V و انرژی پتانسیل الکتریکی

U کمیت‌هایی کاملاً متفاوت‌اند و نباید با هم اشتباه گرفته شوند. پتانسیل الکتریکی یک مشخصه‌ی میدان الکتریکی است و به این که جسمی باردار در آن میدان قرار گرفته است یا خیر بستگی ندارد. در حالی که انرژی پتانسیل الکتریکی، انرژی یک جسم باردار در یک میدان الکتریکی خارجی است.



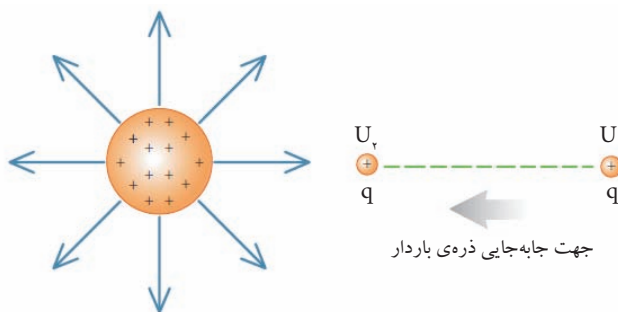
- آشنایی با مولد وان دو گراف وسیله‌ای برای تولید پتانسیل الکتریکی بالا
- آشنایی با لامپ پرتو کاتدی که در دستگاه‌های الکترونیکی و رایانه‌ها استفاده می‌شود.
- تخلیه‌ی جرقه‌ای و خطرهای ناشی از آن

### اختلاف پتانسیل الکتریکی

اگر ذره‌ی باردار q را با صرف انرژی از نقطه‌ی (۱) به نقطه‌ی (۲) جا به جا کنیم (شکل ۲-۱۵)، انرژی پتانسیل الکتریکی آن از مقدار  $U_1$  به مقدار  $U_2$  تغییر می‌کند. در نتیجه پتانسیل الکتریکی آن نیز از  $V_1$  به  $V_2$  تغییر می‌یابد. بنابراین می‌توان نوشت:

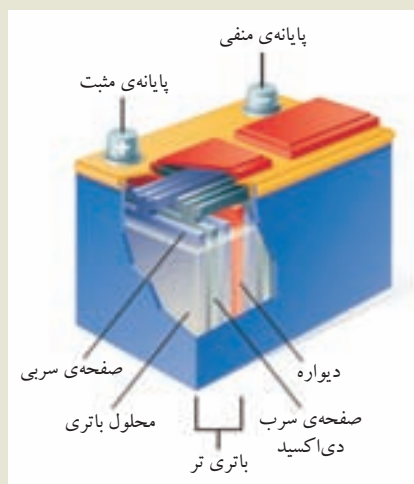
$$V_2 - V_1 = \frac{U_2 - U_1}{q} \quad \text{یا} \quad \Delta V = \frac{\Delta U}{q} \quad (۴-۲)$$

در رابطه‌ی بالا،  $\Delta V$  را اختلاف پتانسیل الکتریکی یا ولتاژ بین دو نقطه‌ی دلخواه ۱ و ۲ می‌نامند.



شکل ۲-۱۵ هنگام جا به جایی ذره‌ی باردار q + بر خلاف جهت میدان الکتریکی ذره‌ی باردار مثبت، انرژی پتانسیل الکتریکی آن از مقدار  $U_1$  به مقدار  $U_2$  افزایش می‌یابد.

هر باتری از جمله باتری خودروهای سواری دارای دو پایانه‌ی مثبت و منفی است (شکل ۱۶-۲). وقتی گفته می‌شود باتری خودرو ۱۲ ولت است منظور چیست؟



شکل ۱۶-۲ این باتری تر از طریق واکنش‌های شیمیایی انرژی الکتریکی تولید می‌کند.

پاسخ:

منظور این است که اختلاف پتانسیل یا ولتاژ دو سر پایانه‌های باتری ۱۲ ولت است. اگر پتانسیل الکتریکی پایانه‌ی مثبت را با  $V_+$  و پتانسیل پایانه‌ی منفی را با  $V_-$  نشان دهیم، داریم:

$$\Delta V = V_+ - V_- = 12V \quad \text{یا} \quad V_+ = 12(V) + V_-$$

بنابراین، پتانسیل پایانه‌ی مثبت باتری به اندازه‌ی ۱۲V از پتانسیل پایانه‌ی منفی آن بیش‌تر است.

اگر در باتری شکل ۱۶-۲ پایانه‌ی منفی باتری را به بدنه‌ی خودرو که در واقع به زمین متصل است، وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت چقدر خواهد شد؟

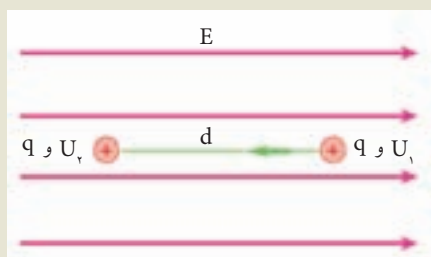
پاسخ:

معمولاً (به خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین را برابر صفر می‌گیرند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به زمین می‌سنجند. در این صورت  $V_- = 0$  و خواهیم داشت:

$$V_+ = 12(V) + 0 = 12V$$

یعنی پتانسیل پایانه‌ی مثبت باتری نسبت به زمین ۱۲ ولت است.

ذره‌ای با بار الکتریکی  $+q$  را با سرعت ثابت در خلاف جهت خط‌های میدان الکتریکی یکنواختی به اندازه‌ی  $d$  جابه‌جا می‌کنیم (شکل ۲-۱۷). به سادگی می‌توان نشان داد انرژی لازم برای انجام این کار  $qEd$  است، که در آن  $E$  بزرگی میدان الکتریکی است. این انرژی به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بار  $+q$  ذخیره می‌شود. بزرگی میدان الکتریکی  $E$  را بر حسب اختلاف پتانسیل دو نقطه بنویسید.



شکل ۲-۱۷ ذره‌ی  $+q$  بر خلاف جهت میدان الکتریکی یکنواخت  $E$  و با سرعت ثابت از نقطه‌ی (۱) تا نقطه‌ی (۲) به اندازه‌ی  $d$  جابه‌جا شده است.

حل:

تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی ذره‌ی باردار برابر است با:

$$\Delta U = qEd$$

با جای‌گذاری این مقدار در رابطه‌ی (۲-۴) داریم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = \frac{qEd}{q} = Ed$$

یا:

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$

همان‌طور که دیده شد این رابطه تنها برای میدان الکتریکی یکنواخت و با توجه به شرایطی که در مسئله اشاره شد برقرار است. این رابطه همچنین نشان می‌دهد که یکای دیگر میدان الکتریکی ولت بر متر ( $V/m$ ) است.

## مطالعه‌ی آزاد

### رسوب‌دهنده‌ی الکتروستاتیکی

بسیاری از سوخت‌ها پس از سوختن، گازهای زائدی به صورت دود بر جای می‌گذارند. دود از ذره‌های بسیار ریزی تشکیل شده است که به آسانی ته‌نشین نمی‌شود.

بنابراین، پیش از آن که گازهای خروجی دودکش وارد جو شوند، این ذره‌ها را باید از آن‌ها جدا کرد. یکی از روش‌های رایج این کار در شکل ۲-۱۸ الف نشان داده شده است. این شکل یک رسوب‌دهنده‌ی الکتروستاتیکی را نشان می‌دهد که شامل یک شبکه‌ی سیمی است که به اختلاف پتانسیل بالایی (بین ۴۰ تا ۱۰۰ کیلوولت) وصل می‌شود. بر اثر ولتاژ بالایی که به دو سر این شبکه اعمال می‌شود، ذره‌های دود تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی قوی قرار می‌گیرند. این میدان الکتریکی قوی، با یونیده کردن مولکول‌های هوای اطراف شبکه، باعث می‌شود یون‌های باردار به ذره‌های دود بچسبند و آن‌ها را باردار کنند. سپس این ذره‌های باردار توسط میله‌هایی که بار مخالف دارند جذب می‌شوند و در نتیجه رسوب می‌کنند. این دستگاه‌ها می‌توانند تا حدود ۹۰ درصد از آلودگی‌ها را جذب کنند. در شکل ۲-۱۸ ب از دستگاه رسوب‌دهنده‌ی الکتروستاتیکی استفاده نشده است ولی در شکل ۲-۱۸ پ از چنین دستگاهی استفاده شده است. به روشنی دیده می‌شود که کاربرد دستگاه رسوب‌دهنده‌ی الکتروستاتیکی تأثیری چشمگیر در جلوگیری از آلودگی محیط زیست دارد.



ب



ب



الف

شکل ۲-۱۸

## ۲-۴ آشنایی با برخی از روش‌های تولید الکتریسته

پیش از این دیدیم هرگاه دو جسم، مانند یک میله‌ی پلاستیکی و تکه‌ای پارچه‌ی پشمی، با یکدیگر مالش داده شوند، بارهای الکتریکی از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شوند و دو جسم پس از مالش دارای بار مخالف یکدیگر می‌شوند (شکل ۲-۱۹). در واقع بر اثر مالش دو جسم به یکدیگر، انرژی گرمایی لازم برای جدا شدن الکترون‌ها از اتم‌های یک جسم و انتقال آن‌ها به جسم دیگر فراهم می‌شود. به این پدیده، اثر تریبو الکتریک (الکتریسته‌ی مالشی) گفته می‌شود.

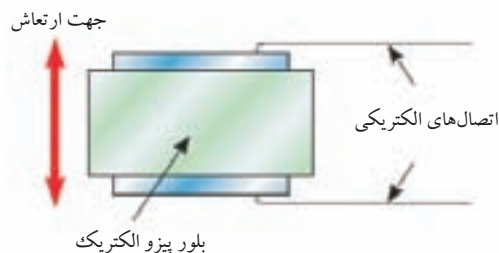


شکل ۲-۱۹ گرمای حاصل از مالش دو جسم به یکدیگر، الکترون‌ها را از اتم‌های یک جسم جدا و به جسم دیگر منتقل می‌کند.

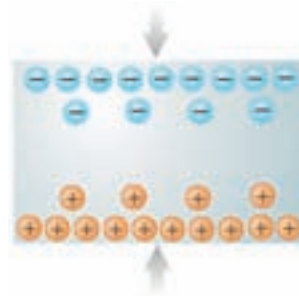
## اثر پیزو الکتریک

اثر پیزو الکتریک، قابلیت بعضی مواد برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی است یا برعکس. این اثر در اواخر قرن نوزدهم کشف شد و موادی که این پدیده را از خود بروز می‌دهند مواد پیزو الکتریک نامیده می‌شوند. کوآرتز یکی از متداول‌ترین مواد پیزو الکتریک است.

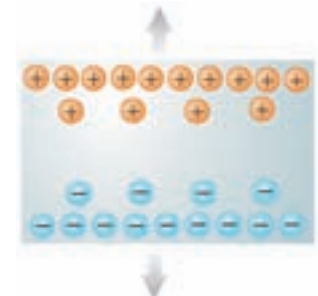
وقتی ماده‌ای پیزو الکتریک تحت فشار مکانیکی (به صورت انقباض یا انقباض) قرار می‌گیرد، مقداری بار الکتریکی در سطح آن ظاهر می‌شود (شکل ۲-۲۰ الف و ب). این بار الکتریکی منجر به تولید میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی متناظر با آن می‌شود. برعکس، با اعمال میدان الکتریکی روی یک ماده‌ی پیزو الکتریک، انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی (مثلاً ارتعاش جسم) تبدیل می‌شود (شکل ۲-۲۰ پ). اثر اول به اثر مستقیم و اثر دوم به اثر معکوس موسوم است.



ب



ب انقباض بر اثر تراکم



الف انبساط بر اثر کشش

شکل ۲-۲۰ الف) و ب) تولید الکتریسیته با فشار مکانیکی و پ) ایجاد انرژی الکتریکی به وسیله‌ی انرژی الکتریکی در یک بلور پیزو الکتریک

از مواد پیزو الکتریک برای تولید و آشکارسازی موج‌های صوتی در آب یا در هوا (در بلندگوها و میکروفون‌ها) استفاده می‌شود. افزون بر این‌ها، از تشدید بلورهای پیزو الکتریک در حال ارتعاش برای کنترل دقیق بسامد (فرکانس) در رادیوها و ساعت‌ها هم استفاده می‌شود.

### شبیه‌سازی



### • اثر پیزو الکتریک



## اثر ترموالکتریک

ترموالکتریسیته، همان‌طور که از نام آن بر می‌آید، به پدیده‌هایی اشاره دارد که هم شامل انرژی گرمایی هستند و هم شامل الکتریسیته. اگر محل تماس دو رسانا در معرض گرما قرار گیرد و این گرما منجر به اختلاف دما بین رساناها شود، در این صورت اختلاف پتانسیلی بین دو سر تماس رساناها به وجود می‌آید (شکل ۲-۲۱). مهمترین کاربرد این اثر را در ساخت ترموکوپل می‌بینیم که برای اندازه‌گیری دما در کوره‌ها استفاده می‌شوند.

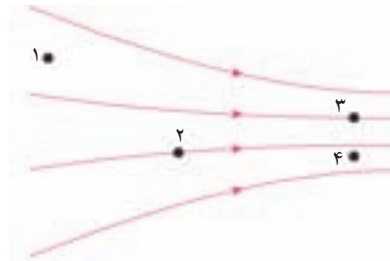


شکل ۲-۲۱ گرما سبب اختلاف پتانسیل دو سر تماس رساناها و در نتیجه شارش الکترون‌ها می‌شود.



## پرسش‌های مفهومی

- ۱- اگر الکترون‌ها مثبت بودند و پروتون‌ها منفی، قانون کولن به همین صورت نوشته می‌شد یا شکلی دیگر؟
- ۲- قانون کولن درباره‌ی رابطه‌ی نیرو و فاصله‌ی دو ذره‌ی باردار از یکدیگر چه می‌گوید؟
- ۳- وقتی فقط بار یکی از دو ذره را دو برابر کنید، تأثیر آن در نیروی بین آن‌ها چیست؟ آیا این اثر به علامت بار بستگی دارد؟
- ۴- شکل ۲-۲۲ خط‌های میدان الکتریکی را در ناحیه‌ای از فضا نشان می‌دهد. شدت میدان الکتریکی را در هر یک از نقطه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب از کم‌ترین تا بیش‌ترین بنویسید.



شکل ۲-۲۲

- ۵- اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که میدانی الکتریکی زمین را احاطه کرده است (شکل ۲-۲۳). شدت این میدان در سطح زمین حدود  $100 \text{ N/C}$  و جهت آن به طرف زمین است. با این اطلاعات، آیا می‌توان گفت که زمین دارای بار منفی است یا مثبت؟



شکل ۲-۲۳ زمین توسط میدانی الکتریکی احاطه شده است.

۶- اگر بادکنکی را به موهایتان بمالید، بادکنک دارای بار منفی می شود و ولتاژ آن شاید به اندازه‌ی چند هزار ولت برسد (شکل ۲-۲۴). در خصوص انرژی پتانسیل الکتریکی بادکنک چه می توان گفت؟ (راهنمایی: از رابطه‌ی (۲-۴) استفاده کنید و توجه داشته باشید که بار روی بادکنک نوعاً بسیار کم تر از  $10^{-6}$  کولن است).

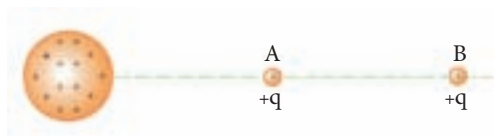


شکل ۲-۲۴ مالش بادکنک با موی سر، ولتاژ آن را ممکن است تا چندین هزار ولت افزایش دهد.

۷- دو ذره‌ی باردار  $q$  در دو موقعیت  $A$  و  $B$  نسبت به یک کره‌ی باردار قرار دارند (شکل ۲-۲۵).

الف) انرژی پتانسیل الکتریکی دو ذره‌ی باردار  $q$  را در نقطه‌های  $A$  و  $B$  با هم مقایسه کنید.

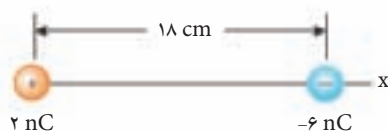
ب) پتانسیل الکتریکی این دو ذره را در نقطه‌های  $A$  و  $B$  با هم مقایسه کنید.



شکل ۲-۲۵

### مسئله‌ها

۱- شکل ۲-۲۶ دو ذره‌ی باردار را نشان می دهد که در جای خود روی محور  $x$  ثابت شده اند. بزرگی نیروی الکتروستاتیکی که هر ذره به ذره دیگر وارد می کند چقدر است؟ (راهنمایی:  $1nC = 10^{-9}C$ )



شکل ۲-۲۶

۲- دو بار نقطه‌ای در فاصله‌ی ۶ سانتی‌متری از هم قرار دارند و نیروی جاذبه‌ی الکتروستاتیکی بین آن‌ها  $20\text{ N}$  است. نیروی بین آن‌ها را در فاصله‌ی ۱۲ سانتی‌متری از هم به دست آورید.

۳- اگر بارهایی که یکدیگر را در مسئله‌ی (۲) جذب می‌کنند دارای اندازه‌ی مساوی باشند، اندازه‌ی هر بار چقدر است؟

۴- ذره‌ی باردار  $q$  در میدان الکتریکی کره‌ی باردار قرار دارد (شکل ۲-۲۷). اگر  $q = 2/1 \times 10^{-6}\text{ C}$  و  $F = 5/6 \times 10^{-4}\text{ N}$  باشد، شدت میدان الکتریکی کره‌ی باردار در محل بار  $q$  چقدر است؟

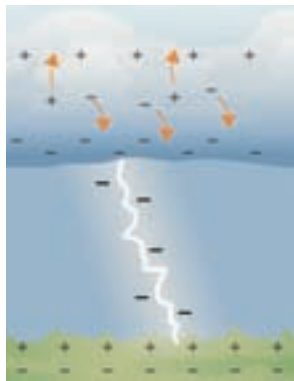


شکل ۲-۲۷

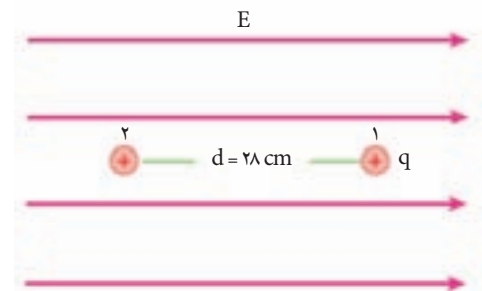
۵- ذره‌ی باردار  $q$  را در خلاف جهت خطوط میدان الکتریکی یکنواخت  $E$  از نقطه‌ی ۱ به نقطه‌ی ۲ با سرعت یکنواخت جابه‌جا می‌کنیم (شکل ۲-۲۸). اگر شدت میدان الکتریکی  $5 \times 10^3\text{ N/C}$  باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه ۱ و ۲ چقدر است؟

۶- اگر بزرگی نیروی الکتروستاتیکی وارد بر بار  $q$  در مسئله‌ی ۵ برابر  $2 \times 10^{-4}\text{ N}$  باشد، اندازه‌ی  $q$  چقدر است؟

۷- اختلاف پتانسیل الکتریکی بین یک ابر باران‌زا و زمین  $10^6$  میلیون ولت است (شکل ۲-۲۹). اگر آذرخشی بار  $2\text{ C}$  از ابر به زمین بفرستد، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی ابر چقدر است؟



شکل ۲-۲۹



شکل ۲-۲۸

## نصیرالدین طوسی



نصیرالدین ابوجعفر محمد بن محمد طوسی (۶۰۲-۶۷۸ق) که زادگاهش را طوس در خراسان یا ساوه آورده‌اند، شاگرد کمال الدین موسی بن یونس، واز پیروان اسماعیلیه که پس از تلاشی اسماعیلیان توسط هلاکو خان مغول از کانون فرماندهی الموت به عنوان اخترشناس و مشاور خان مغول به دربار هلاکو خان راه یافت. گرچه بیش تر زندگی خود را در سیاست سپری کرد اما در زمینه علوم نیز کاری تاریخ ساز و ماندگار را با پایه گذاری رصدخانه و کتابخانه‌ی مراغه به انجام رسانید و تا اندازه‌ای نبود دانش پژوهی گسترده در آن روزگار راجح بران نمود. دانشمندان از سرزمین‌های شکست خورده در برابر مغولان را همراه با کتاب‌ها و نوشته‌هایشان در کانون آموزش و پژوهش مراغه گرد آورد و از پی آن به پرورش شاگردان پُرشماری همت گماشت.

دست‌آوردهای نوشتاری بسیاری در زمینه‌های گوناگون علوم از ریاضی، اخترشناسی، فیزیک، موسیقی، شعر و ادب، فقه و اصول و... از این دانشگاه بی‌همانند حاصل گردید که از ایستائی دانش و دانشمند در آن مقطع تاریخی در جهان جلوگیری نمود. افزون بر شمار زیادی آثار که استادان و دانشجویان کانون علوم مراغه خود نوشته‌اند، نصیرالدین طوسی خود نیز آثار ارزشمندی را به رشته‌ی تحریر درآورد که برخی از آن‌ها در واقع پایان‌نامه‌های دانش‌آموختگان مراغه بودند شامل: ۲۸ کتاب در ریاضی، ۲۳ نوشته در اخترشناسی، ۴ اثر در فیزیک و مکانیک، یک کتاب در علم موسیقی، یک دانشنامه، یک کتاب درباره‌ی کانی‌ها، ۵ اثر در قلمرو فلسفه و الهیات که سرآمد آن‌ها کتاب «اخلاق ناصری» است، و سرانجام یک کتاب ارزنده در زمینه‌ی اموردارائی و اقتصاد... چهار کتاب نصیرالدین طوسی در فیزیک و مکانیک، (۱) نوشته‌ای با نام «تحریر کتاب المناظر اقلیدس» در زمینه‌ی فیزیک نور که چندین دست‌نویس از آن در برخی کشورها و نیز ایران نگهداری می‌شود، (۲) کتابی با نام «رساله فی انعکاس الشعاعات و انعطافات» که آن نیز در قلمرو فیزیک نور بوده و دست‌نویس‌هایی از آن در چند کشور از جمله ایران موجود است، (۳) نگاشته‌ای با نام «قوس و قزح» به زبان فارسی درباره‌ی رنگین کمان و پردازش دلایل تشکیل آن در آسمان که چهار دست‌نویس آن در تهران نگهداری می‌شود، (۴) نوشته‌ای با نام «رساله فی الحار و البروده» در فیزیک گرما (ترمودینامیک) که تنها دست‌نویس به جای مانده آن در تاشکند ازبکستان نگهداری می‌شود، (۵) کتاب موسیقی طوسی را نیز بایستی در گروه آثار فیزیک وی به شمار آورد که متأسفانه هیچ گونه دست‌نویسی از آن به ما نرسیده و تنها در نوشته‌های دیگران از آن یاد شده است.

# جریان الکتریکی



۳

انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک بهترین گزینه برای تولید انرژی الکتریکی و تأمین جریان الکتریکی مورد نیاز برای به کار انداختن وسایل مختلف الکتریکی هستند.

## سیمای فصل سوم

۳-۱ ایجاد جریان الکتریکی

۳-۲ شدت جریان الکتریکی

۳-۳ مدارهای بسته و باز

۳-۴ الکتریسیته در خانه

ارزشیابی فصل سوم



## هدفهای آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما  
فرامی‌گیرید:

• چگونه در یک رسانا جریان برقرار  
می‌شود.

• مفهوم شدت جریان چیست  
و حامل‌های بار چگونه در رسانا  
حرکت می‌کنند.

• جریان الکتریکی در محلول‌های  
یونی چه تفاوتی با جریان در  
رساناها دارد.

• تفاوت مدارهای باز و بسته  
چیست.

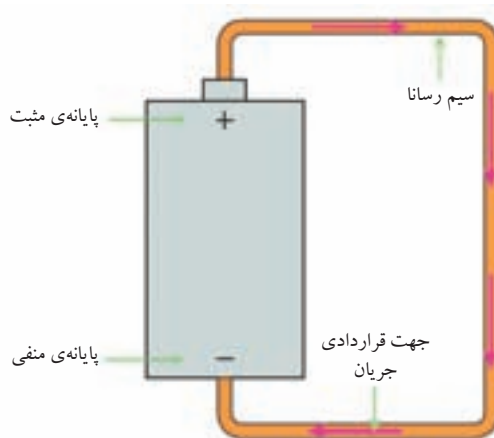
• فیوز چیست و چه کاربردی در  
مدارهای الکتریکی دارد.

در فصل‌های ۱ و ۲ درباره‌ی الکتریسیته‌ی ساکن، یا همان آثار الکتریکی بارهای ساکن، بحث کردیم. در این فصل و چند فصل بعد در خصوص آثار الکتریکی ناشی از بارهای در حال حرکت، یا همان الکتریسیته‌ی جاری، به بحث خواهیم پرداخت.

در این فصل به بررسی جریان الکتریکی و آثار آن می‌پردازیم. مثال‌های جریان الکتریکی فراوان است و حرفه‌های زیادی با آن سر و کار دارند. مهندسان برق با دستگاه‌های الکتریکی بی‌شماری، از قبیل دستگاه‌های تولید برق و توزیع آن، دستگاه‌های تغییر ولتاژ و همچنین دستگاه‌های محافظ آذرخش سر و کار دارند. مهندسان فضایی و مخابرات جریان ذره‌های باردار حاصل از فوران‌های خورشیدی را مطالعه می‌کنند، چرا که این جریان‌ها می‌توانند دستگاه‌های مخابراتی در مدار زمین یا حتی دستگاه‌های انتقال برق در زمین را مختل کنند.

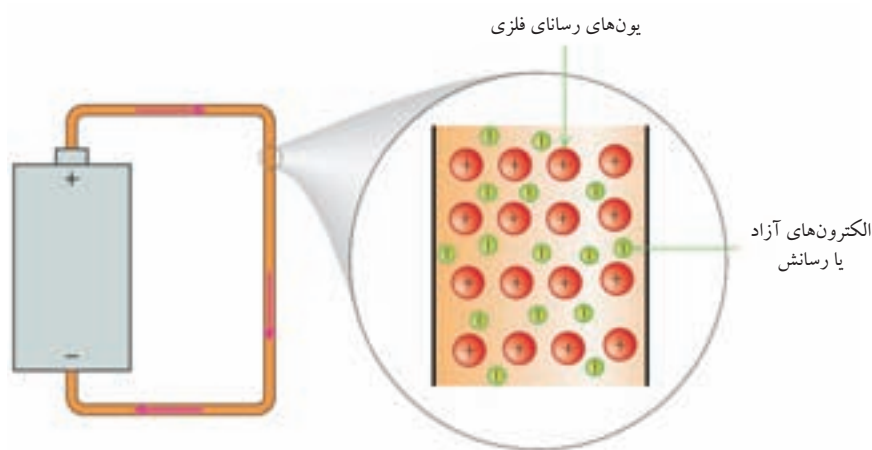
## ۳-۱ ایجاد جریان الکتریکی

ساده‌ترین راه برای ایجاد جریان الکتریکی اتصال دو سر یک باتری توسط یک قطعه سیم رساناست (شکل ۳-۱). با این کار جریانی در سیم برقرار می‌شود و جهت قراردادی آن از پایانه‌ی مثبت باتری به طرف پایانه‌ی منفی باتری است.



شکل ۳-۱ با اتصال دو سر باتری توسط یک قطعه سیم رسانا، در آن جریان الکتریکی برقرار می‌شود.

اکنون این پرسش بسیار مهم مطرح می شود که چه اتفاقی درون سیم رخ می دهد که سبب ایجاد جریان الکتریکی می شود؟ شکل ۲-۳ شما را برای رسیدن به پاسخ این پرسش یاری می دهد. در این شکل بخش بسیار کوچکی از سیم در مقیاس اتمی نشان داده شده است. همان طور که در فصل ۱ نیز دیدیم در سیم های رسانا همچون مس، یک الکترون هر اتم می تواند آزادانه در شبکه ی اتمی حرکت کند. وقتی دو سر یک باتری توسط سیم رسانایی به هم وصل می شود، این الکترون های آزاد (رسانش) از پایانه ی مثبت باتری به طرف پایانه ی منفی آن حرکت می کنند و سبب ایجاد جریان الکتریکی می شوند. توجه کنید که یون های مثبت حرکت نمی کنند و در مکان خود تقریباً به طور ثابت قفل شده اند.

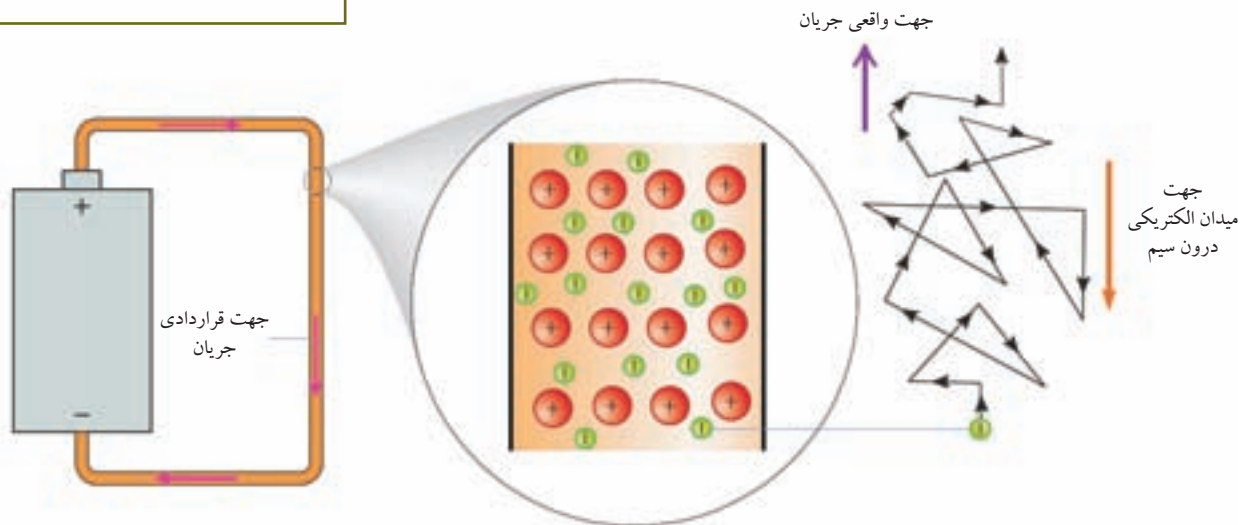


**شکل ۲-۳** شارش حامل های بار (الکترون های آزاد) در یک رسانای فلزی، از پایانه ی مثبت باتری به طرف پایانه ی منفی آن، سبب ایجاد جریان الکتریکی در آن رسانا می شود.

حال پرسش دیگری مطرح می شود که آیا الکترون های آزاد در امتداد مسیری مستقیم درون سیم فلزی حرکت می کنند. پاسخ این پرسش به طور طر حوار در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود الکترون های رسانش در حین حرکت درون سیم، به الکترون های آزاد دیگر و همچنین یون های مثبت فلزی برخورد می کنند و به طور دائم جهت حرکت آنها تغییر می کند. به این نوع حرکت، حرکت زیگزاگی یا کاتوره ای حامل های بار درون یک رسانا گفته می شود. توجه کنید جهت حرکت خالص الکترون های آزاد بر خلاف جهت میدان الکتریکی و به طرف پایانه ی مثبت باتری است. به این جهت حرکت الکترون های آزاد، جهت واقعی جریان الکتریکی گفته می شود. هر چند الکترون های رسانش با سرعت بسیار اندکی



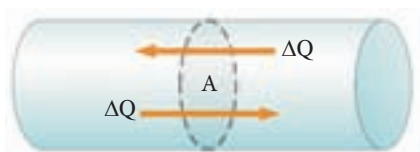
- حرکت کاتوره‌ای حامل‌های بار درون رسانا (با باتری و بدون باتری)



**شکل ۳-۳** با اتصال دو سر یک باتری توسط قطعه سیمی رسانا، میدان الکتریکی‌ای درون سیم ایجاد می‌شود که به الکترون‌های آزاد درون سیم نیرو وارد می‌کند و آن‌ها را بر خلاف جهت میدان به حرکت وا می‌دارد. جهت واقعی جریان، بر خلاف جهت قراردادی جریان است. به دلایل تاریخی، جهت قراردادی جریان را همچنان در یک مدار در نظر می‌گیریم.

**توجه:** سیم حامل جریان به لحاظ الکتریکی باردار نیست.

در شرایط عادی، الکترون‌های رسانش منفی به صورت گروهی در شبکه‌ای اتمی حرکت می‌کنند که از یون‌های دارای بار مثبت تشکیل شده است. بنابراین، در سیم همان‌قدر الکترون وجود دارد که پروتون. سیم چه حامل جریان باشد و چه نباشد، بار خالص آن تقریباً در هر لحظه صفر است.



**شکل ۴-۳** در یک رسانای فلزی که اختلاف پتانسیل دو سر آن صفر است، در هر بازه‌ی زمانی  $\Delta t$ ، مقدار بار خالص شارش شده از هر مقطع فرضی این رسانا صفر است. در این حالت جریانی در رسانا برقرار نیست.

## ۲-۳ شدت جریان الکتریکی

اگر یک مقطع فرضی نظیر سطح A را از سیمی رسانا در نظر بگیریم (شکل ۴-۳)، در بازه‌ی زمانی  $\Delta t$  مقدار باری که از سمت راست به چپ این مقطع شارش می‌کند برابر است با مقدار باری که در همین زمان از سمت چپ به سمت راست این مقطع

۱- محاسبه نشان می‌دهد میانگین سرعت رو به جلوی الکترون‌های رسانش در یک قطعه سیم مسی، حدود  $15 \times 10^{-5}$  متری بر ثانیه است.

شارش می‌کند. در نتیجه مقدار بار الکتریکی شارش شده در واحد زمان، یعنی آهنگ شارش بار  $\Delta Q / \Delta t$  صفر است. در این حالت می‌گوییم جریان الکتریکی در رسانا صفر است.

حال اگر دو سر این رسانا به باتری وصل شود، دوسر آن اختلاف پتانسیل ایجاد می‌شود و بار خالص  $\Delta Q$  شارش شده از هر مقطع فرضی آن در بازه‌ی زمانی  $\Delta t$  مخالف صفر است (شکل ۳-۵). در این صورت شدت جریان الکتریکی متوسط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1-3)$$

اگر آهنگ و جهت شارش بار از هر مقطع رسانا در هر لحظه ثابت باشد، جریان الکتریکی را مستقیم می‌نامند و آن را به اختصار با نماد dc نمایش می‌دهند. در این شرایط شدت جریان الکتریکی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (2-3)$$

یکای شدت جریان در SI، آمپر است که آن را با نماد A نمایش می‌دهند. یک آمپر به صورت یک کولن بر ثانیه تعریف می‌شود. یعنی:

$$1A = 1 \frac{C}{s}$$

در جدول ۳-۱ مقادارهای تقریبی شدت جریان در برخی از پدیده‌ها و دستگاه‌های مختلف آمده است.

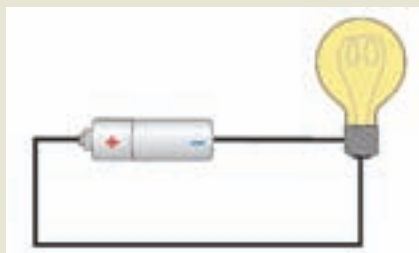


**شکل ۳-۵** به دلیل اختلاف پتانسیل در دو سر سیم رسانا، بار خالص شارش شده از هر مقطع سیم مخالف صفر است. آهنگ شارش بار از این سطح مقطع به صورت شدت جریان الکتریکی  $I$  تعریف می‌شود. توجه کنید که جهت قراردادی جریان، از پتانسیل بیش‌تر (پایانه‌ی مثبت باتری) به طرف پتانسیل کم‌تر (پایانه‌ی منفی باتری) است.

**جدول ۳-۱ برخی مدارهای تقریبی شدت جریان الکتریکی**

پدیده یا دستگاه	مقدار (A)
آذرخش	$10^4$
خطوط انتقال فشارقوی	$10^3$
در لحظه‌ی استارت موتور اتومبیل	۱۰۰-۲۰۰
چراغ‌قوه‌ی روشن	۰/۵-۱
مدارهای رادیو و تلویزیون	$10^{-3}$ - $10^{-6}$
مدارهای رایانه	$10^{-12}$

شدت جریان عبوری از رشته‌ی سیم لامپ مدار شکل ۳-۶ برابر  $0.8\text{ A}$  است.  
 الف) در یک دقیقه چند کولن بار از یک مقطع فرضی رشته‌ی سیم این لامپ می‌گذرد؟  
 ب) این مقدار بار برابر بار چه تعداد الکترون است؟



شکل ۳-۶ یک مدار الکتریکی ساده

**حل:**

الف) با استفاده از رابطه‌ی (۳-۲) داریم:

$$Q = It = (0.8\text{ A})(60\text{ s}) = 48\text{ C}$$

ب) با استفاده از رابطه‌ی  $Q = ne$  و این که بار هر الکترون  $1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$  کولن است داریم:

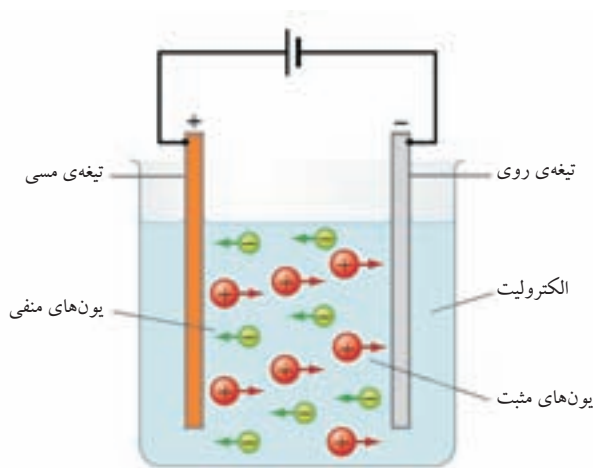
$$48\text{ C} = n(1.6 \times 10^{-19}\text{ C}) \Rightarrow n = 3 \times 10^{20}$$

همان‌طور که دیده می‌شود در هر دقیقه هزاران هزار میلیون الکترون از یک مقطع فرضی رشته‌ی لامپ روشن شارش می‌کند.

### جریان الکتریکی در محلول‌های یونی

همان‌طور که دیدیم الکترون‌های آزاد، حامل‌های بار در فلزها هستند. در محلول‌های یونی، که **الکترولیت** نیز نامیده می‌شوند، حامل‌های بار متفاوت‌اند. در این محلول‌ها، یون‌های مثبت و منفی حامل‌های بار هستند (شکل ۳-۷).

در این کتاب تنها به فلزها که نقش مهمی در مدارهای الکتریکی و صنعت برق دارند و در نتیجه الکترون‌های آزاد توجه خواهیم داشت. با این وجود به یاد داشته باشید که حامل‌های بار همواره الکترون‌ها نیستند.



شکل ۳-۷ در یک محلول یونی یا الکترولیت هم یون‌های منفی و هم یون‌های مثبت جریان الکتریکی را ایجاد می‌کنند.

## مطالعه‌ی آزاد

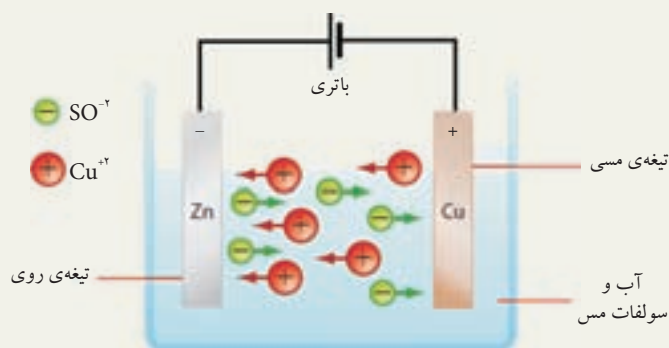
### الکترولیز

استفاده از جریان الکتریکی مستقیم (dc) برای ایجاد واکنش‌های شیمیایی در شیمی و صنعت، الکترولیز نامیده می‌شود. این موضوع تاریخچه‌ی مفصلی دارد که از قرن هجدهم شروع می‌شود. مایکل فارادی، دانشمند اسکاتلندی، اولین کسی بود که در قرن نوزدهم رابطه‌ی بین مقدار الکتریسیته‌ی به کار رفته در الکترولیز و تعداد اتم‌ها یا مولکول‌های حاصل از تجزیه‌ی الکتریکی را به صورت حاصل ضرب جریان و زمان بیان کرد. یک نمونه از کاربردهای الکترولیز در صنعت، آبکاری است (شکل ۳-۸).

چنانچه الکترولیت شامل مخلوط آب و سولفات مس ( $\text{SO}_4\text{Cu}$ ) باشد، سولفات مس به یون‌های دو مثبت مس ( $\text{Cu}^{2+}$ ) و یون‌های دو منفی سولفات ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) تجزیه می‌شود. یون‌های مس به طرف الکترود منفی (تیغه‌ی روی) و یون‌های سولفات به طرف الکترود مثبت (تیغه‌ی مسی) روانه می‌شوند (شکل ۳-۹). با رسیدن یون‌های مس به الکترود منفی، دو الکترون جذب می‌کنند و به تیغه‌ی روی می‌چسبند. پس از مدتی تیغه‌ی روی به طور کامل توسط لایه‌ای نازک از مس پوشیده می‌شود.



شکل ۳-۸ آبکاری ورقه‌های فلزی

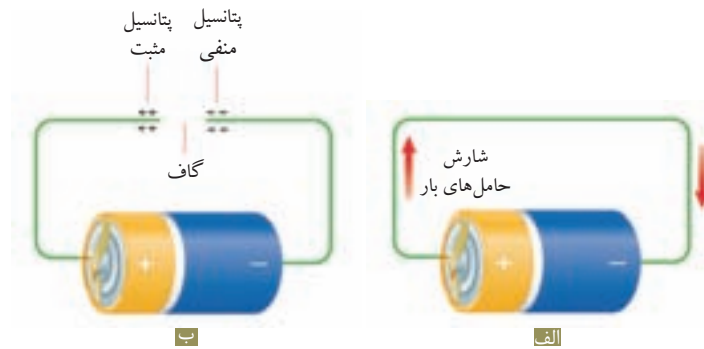


شکل ۳-۹ فرایند آبکاری برقی

### ۳-۳ مدارهای بسته و باز

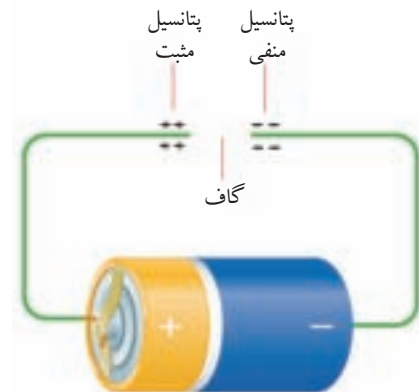
هر مسیری که حامل‌های بار (الکترون‌های رسانش) در آن روان شوند مدار است. جریان پیوسته و مداوم الکترون‌ها به **مداری کامل** (بسته) و بدون گاف دارد (شکل ۳-۱۰ الف). گاف را معمولاً کلیدی به وجود می‌آورد که با باز و بسته کردن آن جریان الکتریکی قطع و وصل می‌شود. اغلب مدارها دست کم یک قطعه برای دریافت انرژی

الکتریکی دارند تا انرژی دریافت شده را به نوع(های) دیگری از انرژی تبدیل کند (شکل ۳-۱۰ ب).



شکل ۳-۱۰ (الف) یک مدار کامل (بسته) را نشان می دهد که حامل های بار بدون وقفه در آن شارش می کنند. (ب) دست کم یک قطعه در هر مدار وجود دارد که انرژی الکتریکی دریافت شده را به نوع(های) دیگری از انرژی تبدیل کند.

اگر قسمتی از سیم در یک مدار بسته قطع و گافی در مدار ایجاد شود، جریان الکتریکی نیز در مدار قطع می شود (شکل ۳-۱۱). در این وضعیت هر چند دو سر هر یک از قطعه سیم ها پتانسیل های مثبت و منفی وجود دارد، ولی به سبب گاف موجود امکان شارش حامل های بار الکتریکی وجود ندارد و در اصطلاح گفته می شود مدار باز است.



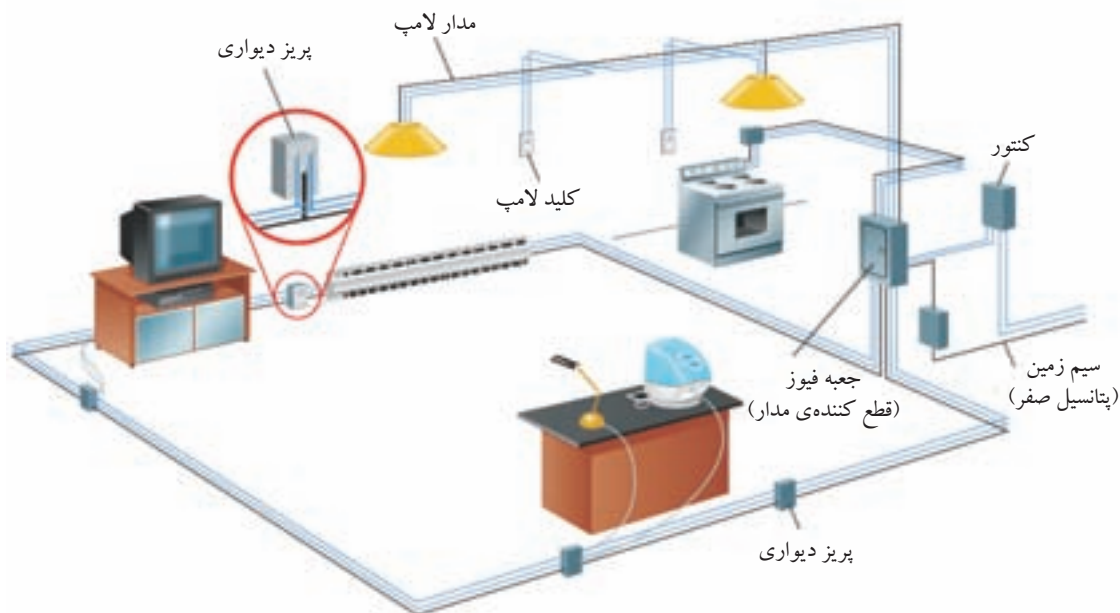
شکل ۳-۱۱ هر چند دو سر گاف اختلاف پتانسیل وجود دارد ولی حامل های بار امکان شارش از پتانسیل مثبت به پتانسیل منفی را ندارند. در این وضعیت مدار باز است.

### ۳-۴ الکتریسیته در خانه

انرژی الکتریکی یا برق معمولاً از طریق دو رشته سیم وارد کنتور خانه ها می شود. این سیم ها به مدارهایی منشعب می شوند که به چراغ های سقف و پریزهای دیواری هر اتاق متصل اند (شکل ۳-۱۲). هر چه تعداد وسیله ی بیش تری در یک مدار استفاده شود،



جریان بیش‌تری از طریق کنتور کشیده می‌شود. اگر بیش از حد مجاز از یک کنتور جریان کشیده شود، در این حالت گفته می‌شود مدار بار اضافی دارد. برای پیش‌گیری از بار اضافی در مدار، فیوزهایی را در امتداد سیم‌های تأمین برق قرار می‌دهند. بدین ترتیب تمام جریان سیم باید از فیوز بگذرد.



**شکل ۱۲-۳** برق از طریق دو رشته سیم وارد کنتور خانه‌ها می‌شود (سیم‌های آبی‌رنگ). در برخی از کشورها، برای ایمنی بیش‌تر و جلوگیری از باردار شدن وسایل مورد استفاده و جلوگیری از شوک الکتریکی از سیم زمین نیز استفاده می‌شود (سیم سیاه‌رنگ). این سیم به یک ورقه‌ی رسانای فلزی که در زمین مدفون شده، وصل است.

فیوز شامل یک نوار سیمی است که به ازای جریانی معین داغ می‌شود و می‌سوزد (شکل ۱۳-۳). اگر فیوز ۲۰ آمپر ارزیابی شده باشد، ۲۰ آمپر را از خود عبور می‌دهد، ولی نه بیش‌تر از آن‌را. جریان بیش از ۲۰ آمپر سبب ذوب شدن فیوز می‌شود، که «می‌پرد» و مدار را قطع می‌کند. قبل از تعویض فیوز باید علت بار اضافی را مشخص و آن‌را برطرف کرد. اغلب، عایق‌هایی که سیم‌های مدار را از هم جدا می‌کنند، پس از سال‌ها استفاده فرسوده و موجب اتصال می‌شوند. این موضوع مسیر مدار را کوتاه می‌کند، و مدار کوتاه نامیده می‌شود. در ساختمان‌های جدید، به جای فیوز اغلب از مدار قطع‌کن استفاده می‌کنند که دارای آهن‌ربا یا نوارهای دو فلزی برای باز کردن کلید هنگام عبور جریان زیاد است. شرکت‌های برق برای محافظت از سیم‌های خود در مسیر بازگشت به مولدها از مدار قطع‌کن استفاده می‌کنند.

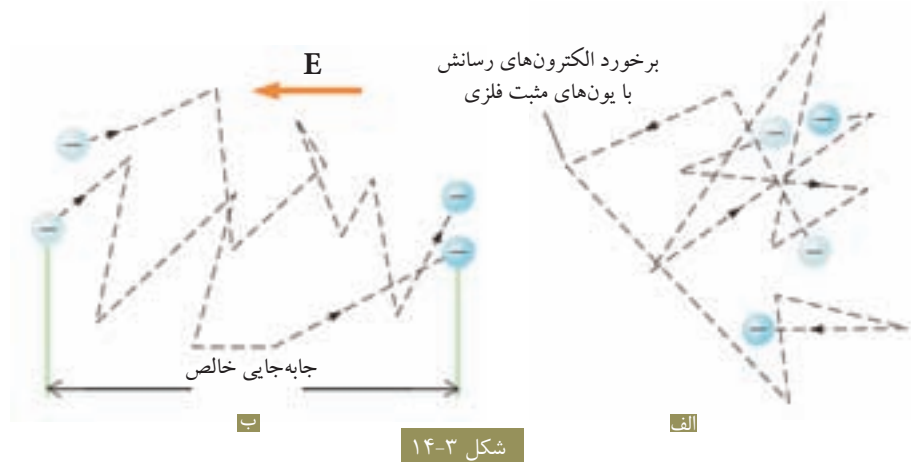


**شکل ۱۳-۳** فیوزهایی با آمپرهای متفاوت

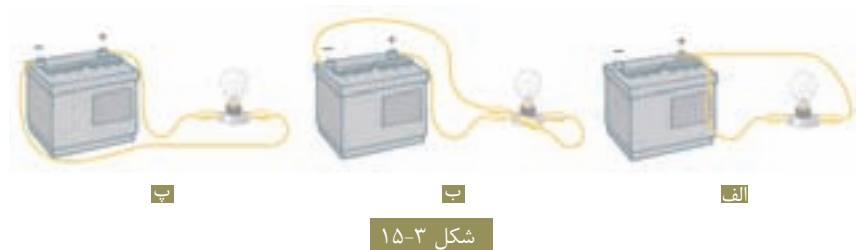


### پرسش‌های مفهومی

۱- شکل ۱۴-۳ الف حرکت کاتوره‌ای یک الکترون رسانش را درون یک سیم مسی نشان می‌دهد. شکل ۱۴-۳ ب حرکت یک الکترون رسانش را درون همان سیم مسی نشان می‌دهد که به پایانه‌های یک باتری وصل شده است. با توجه به این دو شکل توضیح دهید مهم‌ترین تفاوت الکترون‌های رسانش درون سیمی که دو سر آن به پایانه‌های باتری وصل شده است با حالتی که سیم به باتری وصل نشده است چیست.



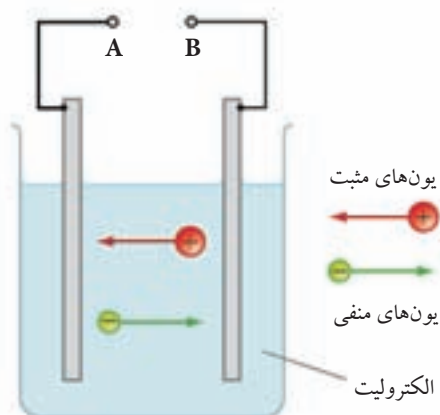
۲- شرط لازم برای روان شدن مداوم جریان الکتریکی در یک سیم رسانا چیست؟  
 ۳- آیا سیم‌های حامل جریان به لحاظ الکتریکی باردارند؟  
 ۴- در کدام یک از مدارهای شکل ۱۵-۳ جریانی از لامپ می‌گذرد و روشن می‌شود؟



۵- چیزی در باتری «مصرف» و باعث می‌شود که سرانجام از بین برود و خالی شود. دانش‌آموزی می‌گوید جریان مصرف می‌شود و دانش‌آموز دیگری می‌گوید انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری مصرف می‌شود. شما با نظر کدام یک از آن‌ها موافق‌اید؟ توضیح دهید.

۶- شکل ۳-۱۶ ظرفی دارای الکترولیت را نشان می‌دهد که دو الکترود در آن قرار داده شده است. با توجه به جهت حرکت یون‌های مثبت و منفی در الکترولیت مطلوب است:

الف) پایانه‌های مثبت و منفی باتری را در نقطه‌های A و B رسم کنید.  
ب) جهت قراردادی جریان را روی سیم‌های مدار مشخص کنید.



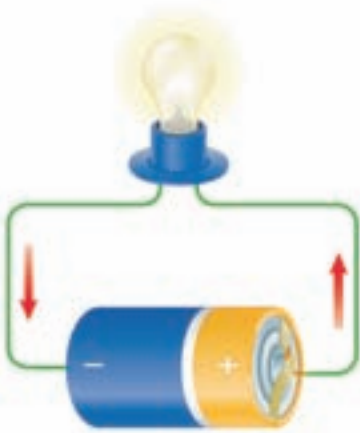
شکل ۳-۱۶

۷- دریافت خود را از مقایسه‌ی شکل ۳-۱۷ الف و ب با توجه به مفاهیمی که فرا گرفته‌اید در چند جمله بنویسید.



تلمبه (پمپ)

ب



الف

شکل ۳-۱۷

## مسئله‌ها

- ۱- اگر جریان عبوری در مدار شکل ۳-۱۸ برابر  $5A$  باشد، پس از ۵ دقیقه چه مقدار حامل‌های بار از یک مقطع فرضی سیم شارش می‌کنند؟



شکل ۳-۱۸

- ۲- یک اتوی برقی متصل به منبع  $220$  ولتی می‌تواند  $9A$  جریان بکشد.  
 الف) در یک دقیقه چند کولن بار الکتریکی از اتو می‌گذرد؟  
 ب) این مقدار بار برابر با بار چه مقدار الکترون است؟
- ۳- کل باری را که باتری اتومبیل می‌تواند بدون دوباره شارژ شدن تأمین کند بر حسب آمپر-ساعت (A.h) بیان می‌کنند. یک نمونه باتری  $12$  ولتی دارای جریان اسمی  $60$  آمپر-ساعت ( $60A$  برای  $1h$ ، یا  $30A$  برای  $2h$ ، و غیره) است. فرض کنید شخصی فراموش کرده است چراغ‌های جلوی اتومبیل پارک شده‌ی خود را خاموش کند. اگر هر یک از چراغ‌ها  $3A$  جریان بکشد، چه قدر طول می‌کشد تا باتری «خالی شود»؟
- ۴- آذرخشی بین ابر و برق‌گیر متصل به یک ساختمان بلند زده شود و جریان خیلی بزرگ  $20000A$  برای مدت  $4 \times 10^{-4}s$  عبور می‌کند (شکل ۳-۱۹). باری را که در این مدت به زمین شارش می‌کند حساب کنید.



شکل ۳-۱۹

## ابوریحان بیرونی



ابوریحان محمد بن احمد بیرونی در ۳۵۲ شمسی در خوارزم دیده به جهان گشود و در ۴۲۷ شمسی در غزنین دیده از جهان فرو بست. از شاگردان ابونصر بن عراق، و بزرگمردی از جهان دانش از سرزمین‌های اسلامی ایرانی که دانشمندان اروپائی به دست آورده‌ایش در سده‌های هفدهم و هجدهم میلادی دست یافتند. به درستی اگر آثار به جای مانده از بیرونی در زمان‌های نزدیک به روزگار خودش در دسترس اهل دانش در جهان قرار می‌گرفت، جهان ما صدها سال پیشرفته‌تر از امروز بود. برخی از اندیشمندان دیدگاه‌های بیرونی در زیست‌شناسی را که بازتاب آن در «تحقیق ماللهند» مشاهده می‌شود، با داروینیسیم برابر می‌دانند. ابوریحان بیرونی در نوشته‌های پُرشمارش به روشنی از گردش زمین به دور خود یاد کرده است. وی در اثر خود با نام «اسطرلاب» روشی برای

اندازه‌گیری شعاع زمین ارائه کرده است. پژوهش‌های گسترده‌ی بیرونی در فلسفه به دوراندیشی و دقت وی کمک شایانی کرده است. آثار گوناگون و پُرشمار بیرونی در علوم مختلف شامل: ۱۹ کتاب در ریاضی، ۲ دانشنامه، ۵۷ کتاب در قلمرو اخترشناسی، ۱۷ اثر در جغرافیا، ۲ کتاب در شیمی و داروسازی، ۳ کتاب در فلسفه و چهار نوشته در فیزیک و مکانیک، است. کتاب‌های بیرونی در فیزیک و مکانیک عبارت‌اند از (۱) اثری ارزنده در پیوند با فیزیک نور با نام «الابانه عن الطریقه المحترقه»، (۲) کتابی درباره‌ی بازتاب نور با نام «کتاب اللمعه»، (۳) کتابی در زمینه‌ی اوزان و مقادیر با نام «الکتاب فی المکائیل و موازین و شرایط الطیار و الشواهد». از این سه اثر هیچ‌گونه دست‌نویسی در دست نیست و تنها در دیگر نوشته‌های بیرونی و گاهی دانشمندان دیگر فرازهایی از آن‌ها آمده است. (۴) کتابی درباره‌ی فلزات و جواهرات با نام «مقاله فی النسب التی بینة الفلزاه و الجواهر فی الحجم و الوزن» که خوشبختانه از این نوشته دو دست‌نویس در بیروت و دیگری در حیدرآباد نگهداری می‌شود. در بیش‌تر آثار بیرونی در زمینه‌های گوناگون نکته‌های زیادی در شاخه‌های مختلف فیزیک و مکانیک از آن جمله در ۱۷ کتاب وی در جغرافیا، دو دانشنامه‌ی آثار الباقیه و ماللهند و برخی از آثار ریاضی، یافت می‌شود. کار بزرگ ابوریحان بیرونی کاربردی کردن ریاضیات در علوم می‌مانند اخترشناسی، جغرافیا، فیزیک، شیمی و کانی‌شناسی است. محاسبه‌های دقیق بیرونی در اندازه‌گیری زمین به روش کارتوگرافی صدها سال زودتر از دانشمندان مغرب زمین به انجام رسیده است.

# مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی



مقدار جریانی که در یک مدار شارش می کند علاوه بر ولتاژی که باتری تولید می کند به مقاومت الکتریکی در برابر شارش حامل های بار نیز بستگی دارد. به کمک حلقه های رنگی روی هر مقاومت، می توان مقدار آن را تعیین کرد.

## سیمای فصل چهارم

۱-۴ مقاومت الکتریکی

۲-۴ عامل‌های مؤثر بر مقاومت الکتریکی یک رسانا

۳-۴ رسانندگی الکتریکی

۴-۴ تغییر مقاومت الکتریکی با دما

۵-۴ مقاومت‌های الکتریکی یک مدار

۶-۴ ابر رساناها و کاربرد آنها

ارزشیابی فصل چهارم



## مقاومت و مقاومت ویژه الکتریکی

### هدف‌های آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما فرا می‌گیرید:

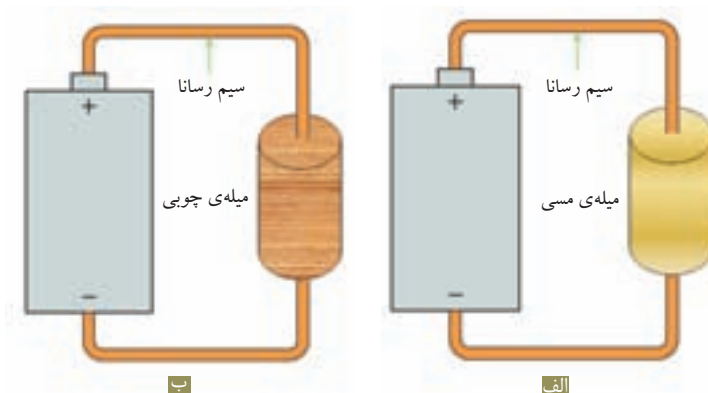
- مفهوم مقاومت و رسانندگی یک ماده چیست.
- چگونه مقاومت یک رسانا را از روی ابعاد و مقاومت ویژه آن حساب کنید.
- چگونه با تغییر دما، مقاومت ویژه و مقاومت یک رسانا را به دست آورید.
- نقش مقاومت در کنترل جریان در یک مدار چه اهمیتی دارد.
- ابر رسانایی چیست و چه اهمیتی در فناوری و بهبود زندگی بشر خواهد داشت.

در فصل پیش با جریان الکتریکی و چگونگی شارش آن در رساناها آشنا شدیم. همچنین دیدیم در مدارهای تشکیل شد. از سیم‌های فلزی، حامل‌های بار الکتریکی، الکترون‌اند. زیرا یک یا چند الکترون هر اتم فلز می‌توانند آزادانه در شبکه‌ی اتمی حرکت کنند. افزون بر این‌ها دیدیم که در الکترولیت‌های رسانا، مانند باتری اتومبیل، یون‌های مثبت و منفی می‌توانند شارش کنند.

در این فصل با مقاومت الکتریکی اجسام که با شارش آسان بار در آن‌ها مخالفت می‌کند آشنا خواهیم شد. همچنین پس از بررسی عامل‌های مؤثر بر مقاومت الکتریکی یک رسانا، به تغییر مقاومت رسانا با دما خواهیم پرداخت. در پایان نگاهی به پدیده‌ی ابررسانایی و کاربردهای آن خواهیم داشت.

### ۴-۱ مقاومت الکتریکی

اگر توسط دو باتری مشابه اختلاف پتانسیل یکسانی را به دو سر دو میله‌ی مسی و چوبی اعمال کنیم (شکل ۴-۱)، جریان‌های بسیار متفاوتی برقرار می‌شود. آن مشخصه‌ای از رسانا که در اینجا نقش مهمی بازی می‌کند، مقاومت الکتریکی است. این آزمایش ساده نشان می‌دهد که رسانش الکتریکی در اجسام مختلف با یکدیگر متفاوت است.



شکل ۴-۱ رسانش الکتریکی در اجسام مختلف می‌تواند بسیار متفاوت باشد. رساناهای فلزی، مانند مس، جریان الکتریکی را به راحتی و با مقاومت الکتریکی اندکی عبور می‌دهند؛ در حالی که عایق‌هایی مانند چوب، مقاومت الکتریکی زیادی دارند و عملاً از عبور جریان الکتریکی جلوگیری می‌کنند.



مقاومت الکتریکی بین هر دو نقطه‌ای از رسانا را با اعمال اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  بین آن دو نقطه و اندازه‌گیری جریان  $I$  حاصل از آن، تعیین می‌کنیم. به این ترتیب مقاومت

چنین می‌شود:

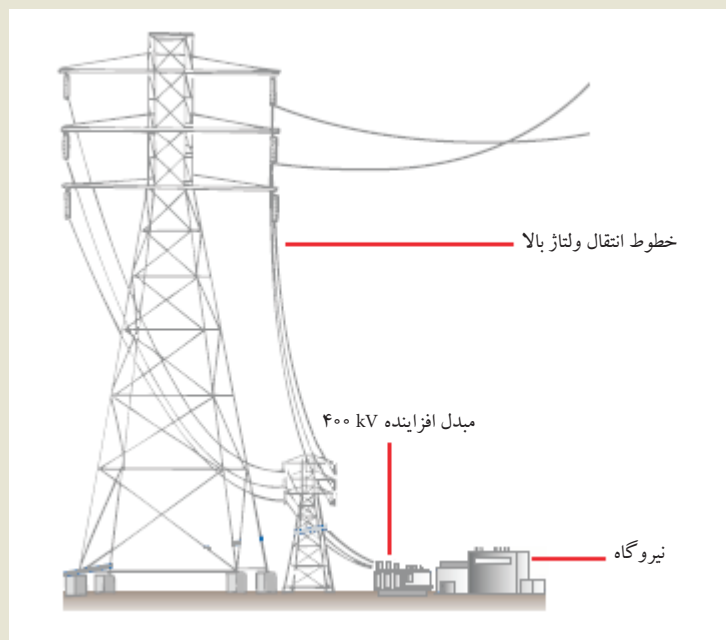
$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1-4)$$

یکای مقاومت در SI که از رابطه‌ی (۱-۴) نتیجه می‌شود، ولت بر آمپر است. این ترکیب آن‌قدر ظاهر می‌شود که نام ویژه‌ای موسوم به اهم به آن اختصاص داده‌اند. معمولاً از حرف یونانی اُمگا،  $\Omega$ ، برای نماد اهم استفاده می‌شود. این یکا به افتخار جرج سیمون اهم دانشمند آلمانی نامگذاری شد که در سال ۱۸۲۶ میلادی رابطه‌ای ساده و بسیار مهم را بین ولتاژ، جریان و مقاومت کشف کرد.

اگر رابطه‌ی (۱-۴) را به صورت  $I = \Delta V / R$  بنویسیم، در خواهیم یافت که به ازای یک اختلاف پتانسیل معین  $\Delta V$ ، هر چه مقاومت الکتریکی جسمی بیش‌تر باشد، جریان کوچک‌تری از آن می‌گذرد.

#### مثال ۱-۴

از سیم‌های مسی و آلومینیومی در خطوط انتقال ولتاژ - بالا که باید حامل جریان  $60\text{ A}$  باشند، استفاده می‌شود. اگر ولتاژ خط انتقال شکل ۲-۴ برابر  $400$  کیلو ولت باشد، مقاومت هر رشته سیم انتقال جریان چه قدر است؟



شکل ۲-۴

حل:

با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$\Delta V = 40.0 \text{ kV} = 4 \times 10^5 \text{ V}$$

$$I = 6.0 \text{ A}, R = ?$$

به جای گذاری این مقادیر در رابطه‌ی (۴-۱) داریم:

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4 \times 10^5 \text{ V}}{6.0 \text{ A}} = 6666 \Omega$$

بیش‌تر بدانید



بیوالکتریسته (زیست الکتریسته)  
شوک الکتریکی

## ۴-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی یک رسانا

یک میله‌ی رسانا به طول  $L$  و سطح مقطع  $A$  مطابق شکل ۴-۳ در نظر بگیرید. آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت رسانا با افزایش طول آن زیاد می‌شود. به عبارت دیگر مقاومت یک رسانا با طول آن نسبت مستقیم دارد. یعنی:

$$R \propto L$$

همچنین آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت رسانا با افزایش سطح مقطع آن کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر مقاومت یک رسانا با سطح مقطع آن نسبت معکوس دارد. یعنی:

$$R \propto \frac{1}{A}$$

این دو ویژگی مؤثر بر مقاومت یک رسانا را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$R \propto \frac{L}{A}$$

با تبدیل این تناسب به تساوی داریم:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (۴-۲)$$

در این رابطه  $\rho$  مقاومت الکتریکی ویژه‌ی رسانا نامیده می‌شود و به جنس رسانا و پاره‌ای از عامل‌های فیزیکی مانند دما بستگی دارد.<sup>۱</sup> یکای مقاومت ویژه در SI با توجه به رابطه‌ی (۴-۲) به صورت اهم-متر ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) به دست می‌آید. در جدول ۴-۱ فهرستی از مقاومت‌های ویژه چند ماده‌ی مختلف در دمای  $20^\circ \text{C}$  ارائه شده است.

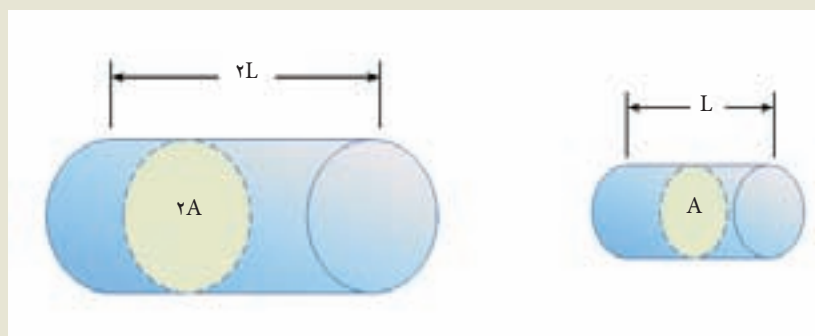
۱ - در برخی از کتاب‌های قدیمی‌تر به جای عبارت «مقاومت الکتریکی ویژه» از عبارت «مقاومت الکتریکی مخصوص» استفاده می‌شود.

جدول ۴-۱ مقاومت ویژه برخی از مواد در دمای  $20^{\circ}\text{C}$

ماده	مقاومت ویژه ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
رسانا	نقره
	مس
	طلا
	آلومینیوم
	تنگستن
	آهن
	پلاتین
نیم رسانا	کربن خالص (گرافیت)
	ژرمانیوم خالص
	سیلیسیوم خالص
عایق	شیشه
	سولفور
	کوارتز ذوب شده
	چوب

#### مثال ۴-۲

هر دو سیم شکل ۴-۴ از یک جنس اند. مقاومت الکتریکی این دو سیم را با یکدیگر مقایسه کنید.



شکل ۴-۴

حل:

با توجه به فرض مسئله چون دو سیم از یک جنس اند، مقاومت الکتریکی ویژه‌ی هر دو یکسان و برابر  $\rho$  است. به این ترتیب مقاومت سیم به طول  $L$  و سطح مقطع  $A$  برابر است با:

$$R_1 = \rho \frac{L}{A}$$

همچنین مقاومت سیم به طول  $2L$  و سطح مقطع  $2A$  برابر است با:

$$R_2 = \rho \frac{2L}{2A} = \rho \frac{L}{A} = R_1$$

یعنی مقاومت دو سیم با یکدیگر برابر است.

### مثال ۳-۴

نیکروم، آلیاژی از نیکل، کروم و آهن است که در المنت بخاری‌های برقی به کار می‌رود و تادمای  $1000^\circ\text{C}$  درجه‌ی سلسیوس اکسید نمی‌شود. سیمی از جنس نیکروم دارای طول  $1\text{m}$  و سطح مقطع  $1\text{mm}^2$  است. هرگاه به دو سر این سیم اختلاف پتانسیل  $2\text{V}$  اعمال شود جریان  $4\text{A}$  در آن برقرار می‌شود. مقاومت ویژه‌ی نیکروم را پیدا کنید.

حل:

ابتدا با استفاده از رابطه‌ی (۴-۱) مقاومت سیم را به دست می‌آوریم:

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{2\text{V}}{4\text{A}} = 0.5\Omega$$

از سوی دیگر با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$L = 1\text{m}$$

$$A = 1\text{mm}^2 = 1 \times 10^{-6}\text{m}^2$$

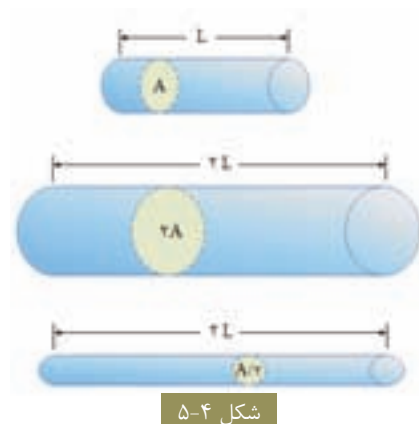
با جای گذاری این مقدارهای در رابطه‌ی (۴-۲) داریم:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$0.5\Omega = \rho \frac{1\text{m}}{10^{-6}\text{m}^2}$$

$$\rho = (0.5\Omega)(10^{-6}\text{m}) = 5 \times 10^{-7}\Omega\cdot\text{m}$$

شکل ۴-۵ سه رسانای مسی استوانه‌ای را همراه با سطح مقطع و طول آن‌ها نشان می‌دهد. مقاومت این رساناها را از کم‌ترین تا بیش‌ترین مقدار به ترتیب بنویسید.



شکل ۴-۵

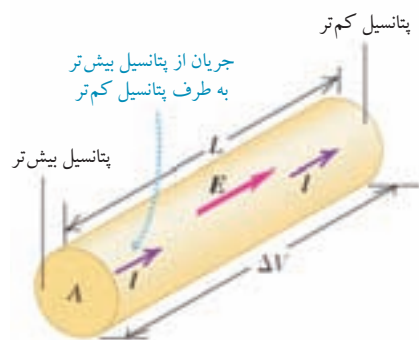
### ۳-۴ رسانندگی الکتریکی

همان‌طور که دیدیم با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی  $\Delta V$  به دو سر یک رسانا، میدان الکتریکی  $E$  ایجاد شده درون رسانا سبب برقراری جریان الکتریکی از پتانسیل بیش‌تر به طرف پتانسیل کم‌تر می‌شود (شکل ۴-۶).

**رسانندگی الکتریکی** کمیتی است که نشان می‌دهد با ایجاد میدان الکتریکی درون رسانا، به چه راحتی می‌توان جریان الکتریکی در آن برقرار کرد. این کمیت به صورت عکس مقاومت ویژه‌ی الکتریکی تعریف می‌شود و معمولاً از حرف یونانی سیگما،  $\sigma$ ، برای نماد آن استفاده می‌شود. یعنی:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3-4)$$

یکای رسانندگی در SI، به صورت عکس اهم - متر، یعنی  $(\Omega \cdot m)^{-1}$  است. در دمای اتاق، رسانندگی الکتریکی بهترین رساناها  $10^{25}$  برابر رسانندگی بهترین عایق‌هاست. اما در دماهای بسیار کم به دلیل ظهور پدیده‌ی ابررسانایی، رسانندگی الکتریکی بعضی فلزها و آلیاژهای آن‌ها به صورت ناگهانی به بی‌نهایت می‌رسد.



شکل ۴-۶ جهت قراردادی جریان درون رسانا از پتانسیل بیش‌تر به طرف پتانسیل کم‌تر است.

بیش‌تر بدانید



● ایمنی الکتریکی

### مثال ۴-۴

رسانندگی الکتریکی سیمی به سطح مقطع  $1 \text{ cm}^2$ ، طول  $2 \text{ m}$ ، و مقاومت  $50 \text{ m}\Omega$  چه قدر است؟

حل:

ابتدا داده‌های مسئله را می‌نویسیم:

$$A = 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$L = 2 \text{ m}, R = 50 \text{ m}\Omega = 50 \times 10^{-3} \Omega$$

$$\sigma = ?$$

حال مقاومت ویژه سیم را با استفاده از رابطه‌ی (۲-۴) پیدا می‌کنیم:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$50 \times 10^{-3} \Omega = \rho \frac{2 \text{ m}}{10^{-4} \text{ m}^2} \Rightarrow \rho = 25 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$$

با توجه به رابطه‌ی (۳-۴) رسانندگی سیم برابر است با:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{25 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}} = 4 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$$

#### ۴-۴ تغییر مقاومت الکتریکی با دما

مقدار اغلب مشخصه‌های فیزیکی، از جمله مقاومت ویژه الکتریکی، با دما تغییر می‌کنند. تجربه نشان می‌دهد که اگر افزایش دما زیاد نباشد، رابطه‌ی مقاومت ویژه با افزایش دما به صورت زیر است:

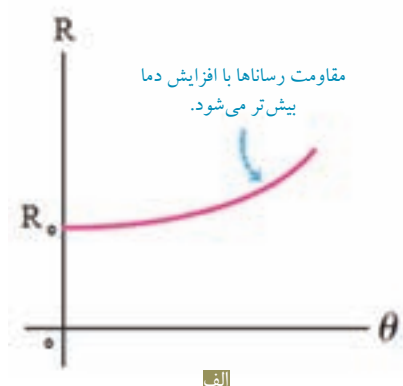
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta\theta) \quad (۴-۴)$$

در این رابطه  $\rho_0$  مقاومت ویژه در دمای  $\theta_0$ ،  $\rho$  مقاومت ویژه در دمای  $\theta$  و  $\alpha$  ضریب دمایی مقاومت ویژه بر حسب  $^{\circ}\text{C}^{-1}$  (بر درجه‌ی سلسیوس) است.

با توجه به رابطه‌ی (۲-۴)، رابطه‌ی اخیر را می‌توان به صورت زیر برای مقاومت رسانا به دست آورد:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta\theta) \quad (۵-۴)$$

کمیت  $\alpha$ ، موسوم به ضریب دمایی مقاومت ویژه، طوری انتخاب می‌شود که معادله‌های (۴-۴) یا (۵-۴) در گستره‌ی دماهای انتخاب شده، بهترین سازگاری را با آزمایش داشته باشند. برخی از مقدارهای  $\alpha$  در جدول ۲-۲ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار  $\alpha$  برای رساناها مثبت و برای نیمرساناها منفی است. نمودار تغییرات مقاومت بر حسب دما برای رساناها و نیمرساناها در شکل ۷-۴ نشان داده شده است.



شکل ۷-۴ (الف) مقاومت رساناها با افزایش دما، بیش‌تر می‌شود. (ب) مقاومت نیمرساناها با افزایش دما کاهش می‌یابد.



جدول ۴-۲ ضریب دمایی مقاومت ویژه‌ی برخی از مواد (در نزدیکی دمای اتاق)

ماده	$\alpha [ (^{\circ}\text{C})^{-1} ]$
رسانا	نقره
	مس
	آلومینیوم
	برنج
	آهن
	تنگستن
نیمه‌رسانا	کربن خالص (گرافیت)
	ژرمانیوم خالص
	سیلیسیوم خالص

#### مثال مفهومی ۴-۵

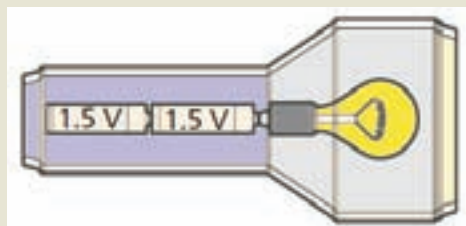
ضریب دمایی مقاومت ویژه‌ی مس  $3/9 \times 10^{-3}$  بر درجه‌ی سلسیوس است. مفهوم فیزیکی این عبارت چیست؟

پاسخ:

منظور این است که اگر دمای یک قطعه‌ی مسی یک درجه افزایش یابد (مثلاً از  $25^{\circ}\text{C}$  به  $26^{\circ}\text{C}$  افزایش یابد)، مقاومت آن به مقدار  $3/9 \times 10^{-3} \Omega$  افزایش می‌یابد.

#### مثال ۴-۶

مقاومت رشته‌ی تنگستن لامپ یک چراغ قوه‌ی خاموش در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  برابر  $1/1 \Omega$  است. مقدار جریان و ولتاژ لامپ در شرایط کاری (وقتی چراغ قوه روشن است) به ترتیب برابر  $3\text{A}$  و  $2/9\text{V}$  است (شکل ۴-۸). دمای رشته‌ی تنگستن وقتی که لامپ روشن است، چه قدر می‌شود؟



شکل ۴-۸

حل:

ابتدا مقاومت رشته‌ی تنگستن لامپ را در شرایط کاری به دست می‌آوریم:

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{2/9V}{0/3A} = 9/67\Omega$$

دیگر داده‌های مسئله عبارت‌اند از:

$$R_0 = 1/1\Omega, \theta_0 = 2^\circ C$$

با توجه به جدول ۴-۲، ضریب دمایی مقاومت ویژه‌ی تنگستن برابر است با:

$$\alpha = 4/5 \times 10^{-3} (^{\circ}C)^{-1}$$

با جای گذاری این مقادیر در رابطه‌ی ۴-۵ داریم:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta \theta)$$

$$9/67\Omega = (1/1\Omega) [1 + 4/5 \times 10^{-3} (^{\circ}C)^{-1} (\theta - 2^\circ C)]$$

با تقسیم دو طرف معادله بر  $(1/1\Omega)$  داریم:

$$8/67 = 1 + 4/5 \times 10^{-3} (^{\circ}C)^{-1} (\theta - 2^\circ C)$$

$$7/67 = 4/5 \times 10^{-3} (^{\circ}C)^{-1} (\theta - 2^\circ C)$$

با تقسیم دو طرف معادله بر  $4/5 \times 10^{-3} (^{\circ}C)^{-1}$  خواهیم داشت:

$$1731^\circ C = \theta - 2^\circ C \Rightarrow \theta = 1751^\circ C$$

#### تمرین ۲-۴

مقاومت یک رشته سیم نقره‌ای در دمای  $2^\circ C$  برابر  $6\Omega$  است. مقاومت این رشته سیم در دمای  $34^\circ C$  چه قدر است؟

## مطالعه‌ی آزاد کُدگذاری مقاومت‌ها

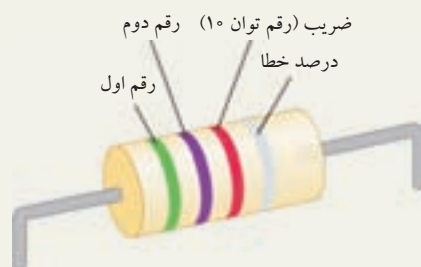
مقاومت‌های کربنی، یکی از انواع مقاومت‌هایی هستند که تقریباً در همه‌ی مدارهای الکتریکی و الکترونیکی به کار می‌روند (شکل ۴-۹ الف). هنگام ساخت این مقاومت‌ها، سه یا چهار نوار رنگی روی هر مقاومت چاپ می‌شود تا بتوان مقدار آن مقاومت را بدون استفاده از اهم‌سنج تعیین کرد (شکل ۴-۹ ب). هر رنگ نشان دهنده‌ی عدد خاصی است که در جدول ۳-۴ آمده است و نوار چهارم در صورت وجود، درصد خطا را نشان می‌دهد. اگر رنگ نوار چهارم طلایی باشد، خطای تعیین مقدار مقاومت  $\pm 5\%$  درصد و اگر نقره باشد  $\pm 10\%$  درصد و اگر بدون رنگ باشد  $\pm 20\%$  درصد است. برای مثال مقدار مقاومت شکل ۴-۹ ب، که از چپ به راست دارای سه رنگ سبز، بنفش و قرمز است با توجه به جدول ۳-۴ برابر  $57 \times 10^2 \Omega$  است. از طرفی چون نوار چهارم آن به رنگ نقره‌ای است، مقدار مقاومت با  $\pm 10\%$  درصد خطا برابر  $(5700 \pm 570) \Omega$  خواهد بود.

جدول ۳-۴ کدهای رنگ مقاومت‌های کربنی

مقدار ضرب	مقدار رقم	رنگ
۱	۰	سیاه
۱۰	۱	قهوه‌ای
۱۰ <sup>۲</sup>	۲	قرمز
۱۰ <sup>۳</sup>	۳	نارنجی
۱۰ <sup>۴</sup>	۴	زرد
۱۰ <sup>۵</sup>	۵	سبز
۱۰ <sup>۶</sup>	۶	آبی
۱۰ <sup>۷</sup>	۷	بنفش
۱۰ <sup>۸</sup>	۸	خاکستری
۱۰ <sup>۹</sup>	۹	سفید



الف



ب

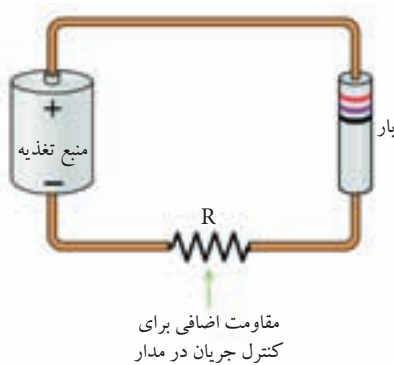
شکل ۴-۹

#### ۴-۵ مقاومت‌های الکتریکی یک مدار

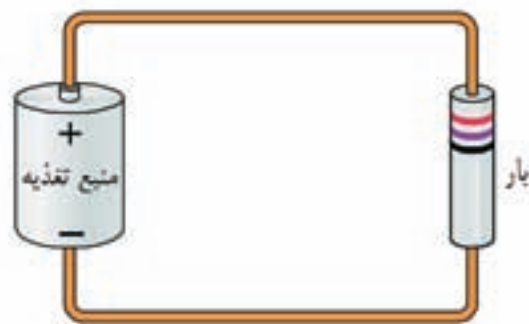
شکل ۴-۱۰ الف ساده‌ترین مدار الکتریکی ممکن، شامل یک منبع تغذیه، سیم‌های رابط و یک مصرف‌کننده (بار) را نشان می‌دهد.<sup>۱</sup> مصرف‌کننده یا بار می‌تواند وسیله‌ای با مقاومت اندک همچون لامپ یا هر دستگاه دیگری با مقاومت متوسط یا زیاد باشد. از آنجا که مقاومت الکتریکی سیم‌های رابط معمولاً ناچیز است (در حدود چند اهم یا حتی کمتر)، گاهی ممکن است جریانی بیش از حد در مدار جاری شود و دستگاه‌های مورد استفاده در مدار آسیب ببینند. این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که مقاومت بار کوچک باشد یا ولتاژ منبع تغذیه زیاد باشد. از آنجا که مقاومت بار (مصرف‌کننده) یا ولتاژ منبع تغذیه معمولاً از پیش تعیین شده‌اند و نمی‌توان آن‌ها را تغییر داد، با اضافه کردن مقاومت دلخواه به مدار می‌توان جریان دلخواه را در مدار جاری کرد (شکل ۴-۱۰ ب).

#### بیش‌تر بدانید

● استفاده از مقاومت متغیر (رئوستا) برای کنترل جریان

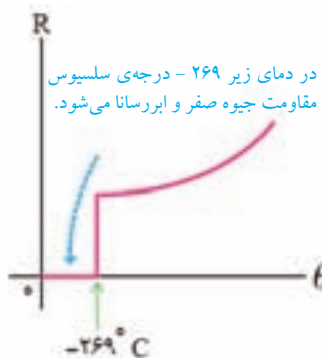


ب



الف

شکل ۴-۱۰ (الف) مداری ساده شامل منبع تغذیه، مصرف‌کننده (بار) و سیم‌های رابط، (ب) برای جلوگیری از عبور جریان بیش از حد از مواد و آسیب دیدن مصرف‌کننده (بار)، مقاومتی را در سر راه جریان قرار می‌دهند تا جریان دلخواه از مدار عبور کند.



شکل ۴-۱۱ مقاومت جیوه در دمای حدود  $-269^{\circ}\text{C}$  درجه‌ی سلسیوس به طور ناگهانی صفر و تبدیل به ابررسانا می‌شود.

#### ۴-۶ ابررساناها و کاربرد آن‌ها

در سال ۱۹۱۱، فیزیکدان هلندی کامرلینگ اونز<sup>۲</sup> کشف کرد که مقاومت الکتریکی جیوه در دماهای زیر حدود  $-269^{\circ}\text{C}$  درجه‌ی سلسیوس کاملاً ناپدید می‌شود (شکل ۴-۱۱). اثر ابررسانایی اهمیت زیادی در فناوری دارد، زیرا حامل‌های بار می‌توانند بدون اتلاف انرژی به صورت انرژی گرمایی، درون یک رسانای ابررسانا شارش یابند. مثلاً جریان‌های ایجاد شده در یک حلقه‌ی ابررسانا برای سال‌ها پا بر جا می‌مانند، بی‌آن‌که تضعیف شوند.

۱ - توجه کنید در اینجا مفهوم بار (Load) با مفهوم بار الکتریکی (Electrical Charge) که در فصل‌های پیش دیدیم متفاوت است.

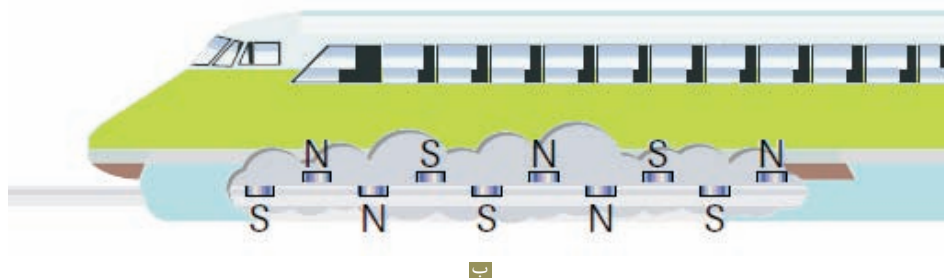
۲ - Kamerling Ommes

تا پیش از سال ۱۹۶۸ میلادی، پیشرفت فناوری ابررسانایی به دلیل هزینه‌ی بالای ایجاد دماهای فوق العاده کم، متوقف مانده بود. ولی در این سال، مواد سرامیکی جدیدی کشف شد که در دماهایی که به میزان قابل توجهی بزرگ‌تر بود (و در نتیجه تولید آن‌ها را ارزان‌تر می‌کرد) ابررسانا می‌شدند. در سال ۱۹۸۷ ابررسانایی در دمای بالا (بالا تر از  $97^{\circ}\text{C}$ ) در ترکیب‌های غیر فلزی کشف شد. امروزه تمام تلاش پژوهشگران این است که روزی کاربردهای عملی وسایل ابررسانا در دمای اتاق، عادی شود. برخی از پژوهش‌های انجام شده در سال ۲۰۰۹ مدعی کشف ابررسانایی در دمای حدود  $3^{\circ}\text{C}$  - هستند.<sup>۱</sup>

یکی از کاربردهای در حال گسترش پدیده‌ی ابررسانایی در سال‌های اخیر، ساخت قطارهای «مگ‌لو»<sup>۲</sup> است که در صنعت حمل و نقل موجب پیدایش انقلابی عظیم شده است. شکل ۴-۱۲ الف نوعی دستگاه مگ‌لو، موسوم به قطار مغناطیسی را نشان می‌دهد که در زیر آن از پیچه‌های ابررسانا استفاده شده است. این پیچه‌ها با حرکت در یک امتداد فرو رفتگی آلومینیومی جریان‌هایی را در آلومینیوم تولید می‌کنند که به صورت تصویر آینه‌ای آهنرباها عمل می‌کنند و قطار مغناطیسی را دفع می‌کنند (شکل ۴-۱۲ ب). این وسیله چند سانتی‌متر بالاتر از ریل‌ها شناور می‌شود و فقط اصطکاک هوا سرعت حرکت آن را محدود می‌کند. قطار مگ‌لویی که مهندسان آلمانی ساخته‌اند اکنون با سرعت  $460\text{ km/h}$  بین مرکز شهر شانگهای و فرودگاه آن در رفت و آمد است.



الف



ب

شکل ۴-۱۲ وسیله‌ی نقلیه‌ای که بر اساس پدیده‌ی ابررسانایی به حرکت در می‌آید. در حالی که قطارهای معمولی هنگام حرکت با سرعت زیاد روی ریل به ارتعاش در می‌آیند، این نوع قطار بدون ارتعاش و با سرعت زیاد حرکت می‌کند، زیرا هیچ تماسی با مسیری ندارد که روی آن شناور است.

۱ - برای دنبال کردن آخرین خبرها در این خصوص می‌توانید به آدرس [www.superconductors.org/news.htm](http://www.superconductors.org/news.htm) مراجعه کنید.

همان‌طور که می‌دانید بخش قابل توجهی از انرژی الکتریکی هنگام انتقال از نیروگاه‌های تولید برق تا شهرها و خانه‌های محل مصرف به صورت انرژی گرمایی تلف می‌شود. تحقیق کنید ساخت ابرساناهایی که بتوانند برای انتقال انرژی الکتریکی به کار روند چه تأثیر شگرفی بر صنعت برق خواهد گذاشت.

۱- آب در یک لوله‌ی پهن راحت‌تر روان می‌شود یا در لوله‌ای باریک؟ جریان در سیم ضخیم راحت‌تر روان می‌شود یا در سیم نازک؟

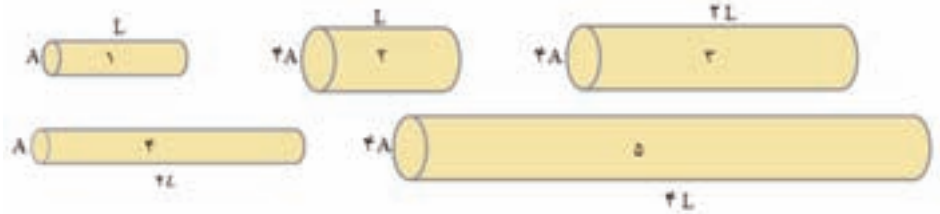
۲- در شکل ۴-۱۳ نحوه‌ی شارش الکترون‌های آزاد در یک سیم فلزی که به دو سر آن اختلاف پتانسیل اعمال شده است، در دو دمای پایین و بالای سیم نشان داده شده است. با توجه به شکل توضیح دهید تغییر دمای سیم افزون بر ارتعاش بیش‌تر یون‌های مثبت، کدام‌یک از کمیت‌های فیزیکی را تغییر داده است.



شکل ۴-۱۴



- ۴- مقاومت الکتریکی یک سیم فلزی به دما و مقاومت ویژه‌ی آن بستگی دارد. افزون بر این‌ها به دو عامل دیگر که مقاومت سیم به آن‌ها بستگی دارد، اشاره کنید.
- ۵- همه‌ی سیم‌های شکل ۴-۱۵ از یک جنس‌اند. این سیم‌ها را از بیش‌ترین تا کم‌ترین مقاومت به ترتیب بنویسید.



شکل ۴-۱۵

- ۶- روان شدن جریان در یک ابررسانا چه تفاوتی با روان شدن در رساناهای معمولی دارد؟

### مسئله‌ها

- ۱- مقاومت بدن انسان از حدود ۱۰۰ اهم وقتی که با آب نمک خیس شده باشد تا حدود ۵۰۰ کیلو اهم اگر پوست کاملاً خشک باشد، تغییر می‌کند. جدول زیر اثر جریان‌های الکتریکی بر بدن انسان را نشان می‌دهد.

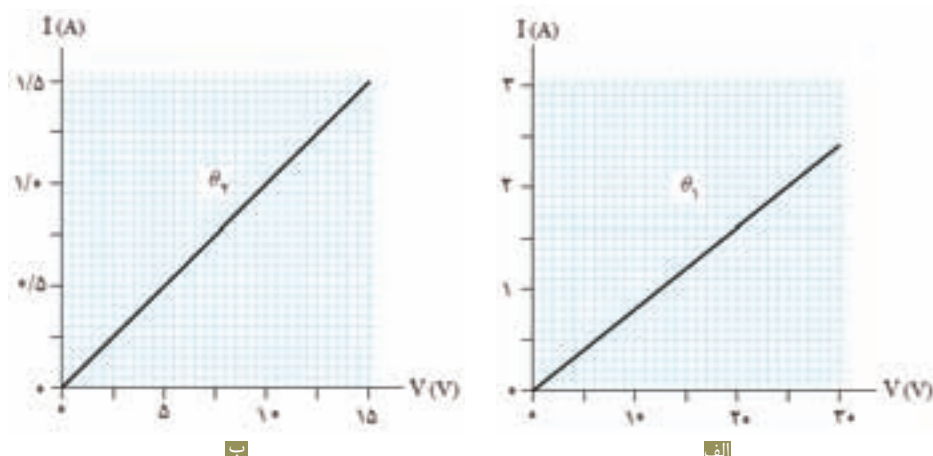
جدول ۴-۴	
جریان (A)	اثر
۰/۰۰۱	می‌توان آن را احساس کرد.
۰/۰۰۵	دردناک است.
۰/۰۱۰	سبب انقباض غیر ارادی (گرفتگی) عضله می‌شود.
۰/۰۱۵	باعث از دست رفتن کنترل بر عضله می‌شود.
۰/۰۷۰	اگر از قلب بگذرد، سبب اختلال جدی می‌شود و اگر بیش از ۱۵ دوام آورد احتمالاً کشنده است.

- الف) اگر در مقاومت  $100000\Omega$  پایانه‌های یک باتری ۱۲ ولتی را لمس کنید، چه جریانی از بدنتان می‌گذرد؟ این جریان چه احساسی در شما ایجاد می‌کند؟
- ب) اگر پوست شما بسیار مرطوب باشد به طوری که مقاومت آن فقط  $1000\Omega$  شود و به پایانه‌های یک باتری ۱۲ ولتی دست بزنید، چه جریانی دریافت می‌کنید؟ اثر این جریان بر بدن شما چیست؟

۲- دو نمودار شکل ۴-۱۶ مشخصه  $I-V$  یک سیم فلزی را در دو دمای متفاوت  $\theta_1$  و  $\theta_2$  نشان می‌دهد.

الف) مقاومت سیم را در هر دما حساب کنید.

ب) مشخص کنید کدام یک از دماها بیش‌تر است.



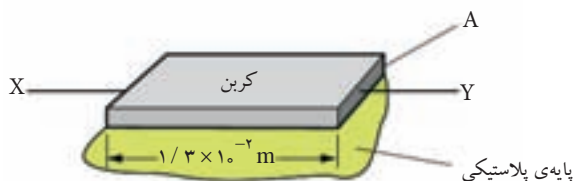
شکل ۴-۱۶

۳- مقاومت یک کابل مسی به طول ۲۰۰ km و مساحت سطح مقطع  $2/5 \text{ mm}^2$  را در دمای  $20^\circ \text{C}$  حساب کنید. (اشاره: از رابطه‌ی ۴-۲ و جدول ۴-۱ استفاده کنید.)

۴- الف) از یک خط انتقال با ولتاژ بالا شامل سیم‌های آلومینیومی جریان  $120 \text{ A}$  می‌گذرد. اگر بخواهیم در هر کیلو متر از این خط انتقال افت ولتاژ حداکثر  $2 \text{ V}$  باشد، سطح مقطع سیم‌های خطوط انتقال چه قدر باید باشد؟

ب) با توجه به رابطه‌ی  $A = \pi r^2$ ، شعاع و قطر سیم چه قدر است؟ پاسخ خود را بر حسب میلی‌متر بیان کنید.

۵- شکل ۴-۱۷ مقاومتی را نشان می‌دهد که با گذاردن یک لایه‌ی نازک کربن روی یک پایه‌ی پلاستیکی ساخته شده است.



شکل ۴-۱۷

اگر مقاومت لایه‌ی کربنی بین وجه‌های  $X$  و  $Y$  برابر  $2200 \Omega$  باشد، سطح مقطع  $A$  لایه‌ی کربنی را به دست آورید.

- ۶- مقاومت قسمتی از یک وسیله‌ی الکترونیکی بسیار حساس به طول  $2\text{ cm}$  و سطح مقطع  $8\text{ mm}^2$  برابر  $10^{-5}\Omega$  است. الف) مقاومت ویژه‌ی این قطعه چه قدر است؟ ب) رسانندگی الکتریکی قطعه را پیدا کنید.
- ۷- مقاومت یک رشته سیم تنگستن در دمای  $20^\circ\text{C}$  برابر  $2\Omega$  است. مقاومت این رشته تنگستن در دمای  $1500^\circ\text{C}$  چه قدر خواهد شد؟



ابونصر فارابی (حدوداً ۸۷۰-۹۵۰ق) که زادگاهش را فاراب در فرارود (ماوراءالنهر) آورده‌اند، از نجیب زادگان ترکستان به شمار می‌رفته که در علوم روزگار خود سرآمد و پُرآوازه بوده است. وی در عصر طلایی دانش در سرزمین‌های اسلامی در بغداد نزد استادان بزرگی همچون متی بن یونس و یوحنا بن جیلاد پرورش یافت و به زودی از آن‌ها پیشی گرفت و در جهان دانش به جایگاهی بالا نائل آمد. از آن‌رو که موجبات پیوستگی و انتقال دست‌آوردهای علمی جهان باستان به زمان خود و پس از خود را فراهم ساخت، پس از ارسطو معلّم اوّل، معلّم ثانی لقب گرفت. ابونصر فارابی در زمینه‌های گوناگون علوم، نگاشته‌های بس ارزشمندی را از خود به یادگار گذاشته است، شامل:

(۱) نوشته‌ای از گونه‌ی دانشنامه در بردارنده‌ی مطالب گوناگون در زمینه‌های مختلف علوم  
(۲) چهار اثر در ریاضی (۳) سه کتاب در اخترشناسی (۴) چهار کتاب در علم موسیقی که در گروه آثار فیزیک به شمار می‌روند (۵) نه کتاب بسیار ارزشمند در قلمرو فلسفه و فلسفه‌ی علم (۶) نوشته‌ای کاربردی در شیمی (۷) کتابی در زمینه‌ی فیزیولوژی (۸) نوشته‌ای ارزنده در آموزش هنر سخنرانی و شعر و سرانجام (۹) سه کتاب در زمینه‌ی فیزیک و مکانیک یکی در فیزیک نور که در قرون وسطی به عبری برگردانده شده است، دومی کتابی در بردارنده‌ی بحث‌های پیشرفته درباره‌ی مبانی دانش فیزیک با نام «کتاب مقالات الرّیعه فی اصول علم الطّبیعه»، و سومی کتابی ویژه درباره‌ی بی‌هوائی (خلأ) به نام «کلام فی الخلاء»...

سر تا سر نگاشته‌های فارابی آکنده است از دیدگاه‌های فلسفی درباره‌ی همه‌ی علوم به گونه‌ای که دست‌مایه‌ای شدند برای آیندگانش تا هویت راستین هر دانشی را بشناسند و مرزبندی‌های درست را برای آن‌ها ترسیم نمایند. در میان آثار فلسفی ابونصر فارابی دو کتاب برگزیده بیش از دیگر کتاب‌های وی خودنمایی می‌کنند که در هر دو آن‌ها فارابی به شناسائی و بررسی علوم و دسته‌بندی آن‌ها پرداخته است. گرچه امروزه تمام دیدگاه‌های فارابی در گروه‌بندی علوم مختلف مورد پذیرش نیست و با گستردگی دانش‌های گوناگون در زمان ما تفاوت بنیادی دارد اما به گواهی تاریخ‌نگاران علم، پژوهش‌ها و نگارش‌های بزرگان و دانشمندان عصر طلایی اسلام راهگشای ارزنده‌ای برای دانشمندانی بودند که از پس رُئسانس در اروپا یکی پس از دیگری سر برآوردند. نگرش فارابی در خصوص دانش‌های مختلف نشان‌دهنده‌ی ژرف‌اندیشی این بزرگمرد جهان علم است.

# قانون اهم، انرژی و توان الکتریکی



بیش از یک قرن پس از اختراع لامپ‌های التهابی یا رشته‌ای توسط ادیسون در سال ۱۸۷۹ میلادی، لامپ‌های کم‌مصرفی ساخته شدند که تنها بخش اندکی از انرژی دریافتی را به گرما تبدیل می‌کنند.

## سیمای فصل پنجم

۱-۵ قانون اهم

۲-۵ دیودها

۳-۵ انرژی الکتریکی مصرفی در یک مقاومت

۴-۵ توان الکتریکی

۵-۵ توان مفید و بازده در وسایل برقی

۶-۵ بهای انرژی الکتریکی مصرفی

ارزشیابی فصل پنجم

## هدفهای آموزشی

با مطالعه این فصل، شما فرامی گیرید:

○ قانون اهم چیست و رساناهای اهمی دارای چه ویژگی‌هایی هستند.

○ ویژگی دیود چیست و آیا از قانون اهم پیروی می‌کند یا خیر.

○ انرژی الکتریکی مصرفی در یک مقاومت به چه عامل‌هایی بستگی دارد.

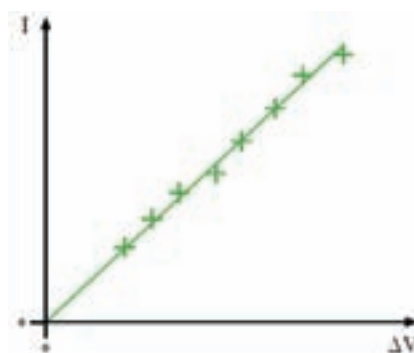
○ توان ورودی، توان مفید و توان تلف شده در یک وسیله‌ی برقی چه ارتباطی با هم دارند.

## قانون اهم، انرژی و توان الکتریکی

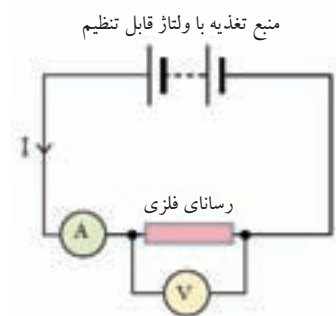
در فصل پیش با تعریف مقاومت الکتریکی برای هر رسانا آشنا شدیم. دیدیم که نسبت ولتاژ دو سر یک رسانا به جریانی که از آن می‌گذرد برابر مقاومت رساناست (رابطه‌ی ۱-۴). همچنین دیدیم مقاومت یک رسانا تابع دمای آن است و با افزایش دمای رسانا، مقاومت آن افزایش می‌یابد. افزون بر این‌ها با مقاومت ویژه و رسانندگی الکتریکی مواد مختلف و ارتباط این دو کمیت فیزیکی با یکدیگر آشنا شدیم. در این فصل، پس از بررسی قانون اهم، درباره‌ی انرژی و توان الکتریکی به بحث خواهیم پرداخت.

### ۱-۵ قانون اهم

بنا به قانون اهم، برای یک رسانای فلزی در دمای ثابت، جریان عبوری از رسانا با ولتاژ دو سر آن متناسب است. برای بررسی قانون اهم مداری مطابق شکل ۱-۵ الف در نظر بگیرید. چنان‌چه در دمای ثابت، نمودار جریان عبوری از رسانا بر حسب ولتاژ دو سر آن به صورت شکل ۱-۵ ب باشد، گفته می‌شود که این رسانا از قانون اهم پیروی می‌کند. به رساناهایی که از قانون اهم پیروی کنند، رساناهای اهمی گفته می‌شود.



ب



الف

شکل ۱-۵ (الف) مداری شامل باتری یا منبع تغذیه با ولتاژ قابل تنظیم که می‌تواند ولتاژهای متفاوتی را به دو سر یک رسانای فلزی اعمال کند.  
(ب) نمودار جریان - ولتاژ یک رسانای فلزی که از قانون اهم پیروی می‌کند.



## مثال ۵-۱

**توجه:** بیان قانون اهم بسیار دقیق است و نباید آن را با رابطه‌ی « $R = \Delta V / I$ » اشتباه بگیرید! اغلب ادعا می‌شود که  $R = \Delta V / I$  بیانی از قانون اهم است. این درست نیست. این رابطه تعریفی از مقاومت الکتریکی است و برای هر وسیله‌ی رسانایی به کار می‌رود، چه آن وسیله از قانون اهم پیروی کند و چه نکند.

جدول زیر نتایج آزمایشی را نشان می‌دهد که برای اندازه‌گیری مقاومت یک رسانای فلزی انجام شده است.

ولتاژ (V)	جریان (I)
۲/۱	۰/۰۴۰
۴/۰	۰/۰۷۹
۶/۳	۰/۱۲۸
۷/۹	۰/۱۸۲
۱۰/۰	۰/۲۰۲
۱۲/۱	۰/۲۵۰

الف) نمودار جریان - ولتاژ این مقاومت را رسم کنید.

ب) آیا این رسانای فلزی از قانون اهم پیروی می‌کند؟

پ) مقاومت این رسانا را تعیین کنید.

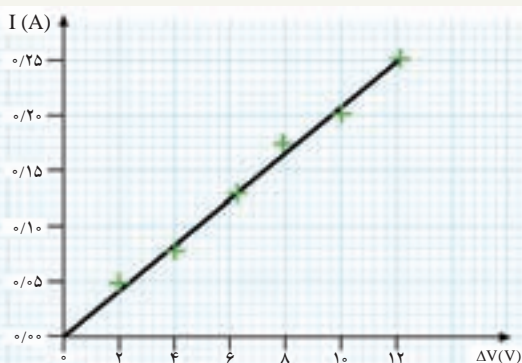
**حل:**

الف) در شکل ۵-۲ نمودار  $I - \Delta V$  مقاومت رسم شده است.

ب) چون نمودار جریان - ولتاژ آن با تقریب خوبی به صورت خطی مستقیم است، این رسانا از قانون اهم پیروی می‌کند.

پ) به ازای یکی از مقدارهای داده شده در جدول داریم:

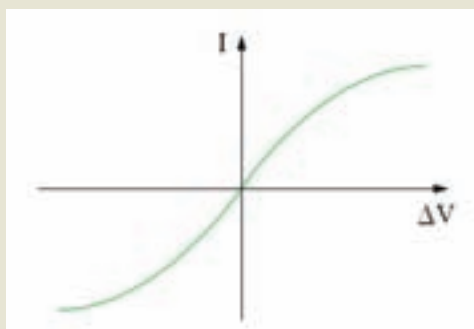
$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{4.0 \text{ V}}{0.079 \text{ A}} = 50.6 \Omega$$



شکل ۵-۲

### مثال مفهومی ۲-۵

شکل ۳-۵ ب نمودار جریان - ولتاژ یک لامپ رشته‌ای (شکل ۳-۵ الف) را نشان می‌دهد. توضیح دهید چرا رشته‌ی تنگستنی لامپ از قانون اهم پیروی نمی‌کند.



ب



الف

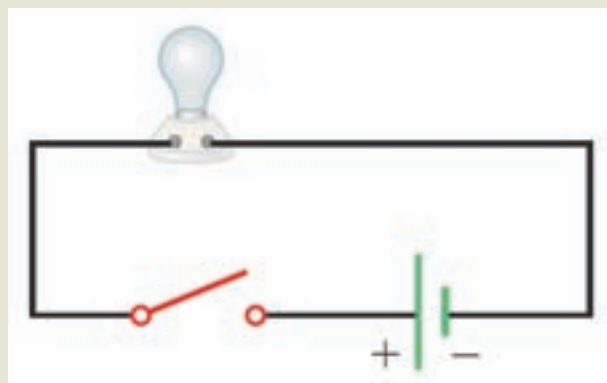
شکل ۳-۵

پاسخ:

همان‌طور که در فصل پیش دیدیم، دمای رشته‌ی تنگستنی با عبور جریان به شدت تغییر می‌کند و به حدود  $1800^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. این امر سبب تغییر مقاومت رشته‌ی تنگستنی می‌شود. به این ترتیب نمودار جریان - ولتاژ یک لامپ رشته‌ای به صورت یک خط راست نیست و از قانون اهم پیروی نمی‌کند.

### مثال ۳-۵

بیشینه‌ی جریان مجازی که می‌تواند از لامپ رشته‌ای مدار شکل ۴-۵ بگذرد تا لامپ نسوزد برابر  $0.8\text{ A}$  است. اگر مقاومت رشته‌ی تنگستنی لامپ در حالت خاموش  $1/8$  اهم باشد، بیشینه‌ی ولتاژ دو سر باتری چه قدر می‌تواند باشد تا پس از بستن کلید، لامپ بدون آسیب دیدن روشن شود؟



شکل ۴-۵

حل:

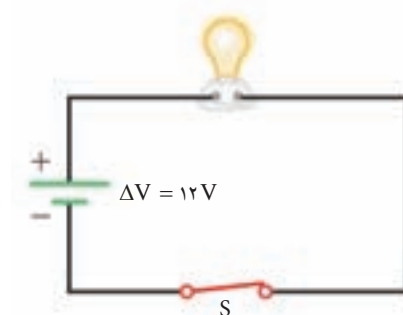
با توجه به رابطه‌ای  $\Delta V = RI$ ، بیشینه‌ی ولتاژ مجاز که می‌تواند به دو سر لامپ اعمال شود برابر است با:

$$\Delta V = (1/8\Omega)(0.8A) = 1/4V$$

به این ترتیب چنانچه ولتاژ دو سر لامپ از مقدار  $1/4V$  ولت بیش‌تر باشد، جریان عبوری از لامپ بیش‌تر از حد مجاز خواهد بود و لامپ می‌سوزد.

### تمرین ۱-۵


اگر جریان عبوری از رشته‌ی تنگستنی لامپ مدار شکل ۵-۵ برابر  $3A$  باشد:  
الف) مقاومت لامپ در این وضعیت چه قدر است؟  
ب) آیا مقاومت لامپ پس از باز کردن کلید  $S$  افزایش می‌یابد یا کاهش؟ توضیح دهید.



شکل ۵-۵

### ۵-۲ دیودها \*

میکرو الکترونیک و نانو الکترونیک امروزی تقریباً به طور کامل به وسیله‌هایی بستگی دارد که از قانون اهم پیروی نمی‌کنند (شکل ۵-۶). مثلاً ماشین حسابی که در دست دارید یا گوشی تلفن همراهتان، پر از چنین وسیله‌هایی است. یکی از این وسیله‌ها، که نقش مهمی در هر مدار ایفا می‌کند، دیود است. اغلب دیودهایی که در الکترونیک جدید به کار می‌روند قطعه‌های نیم‌رسانا هستند.

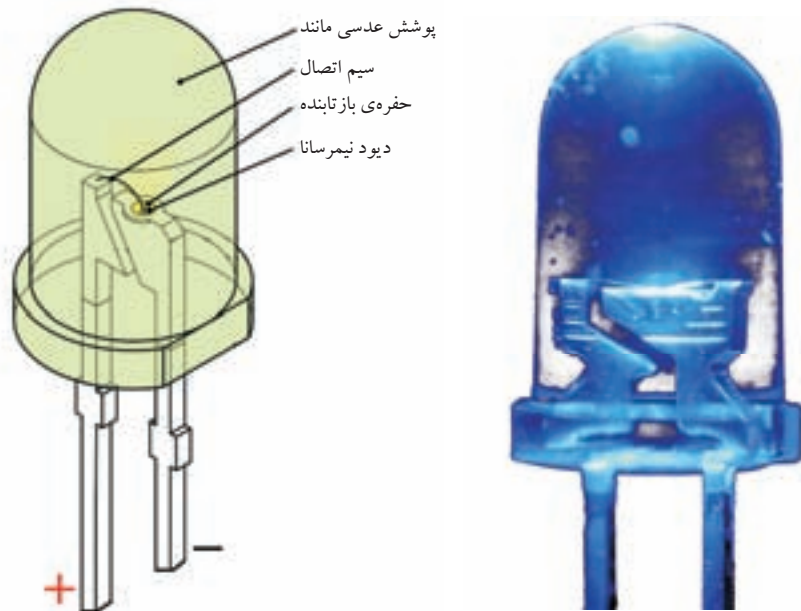
دیودها را در مدار الکتریکی با نماد  نشان می‌دهند. ویژگی مهم دیودهای آرمانی این است که جریان را تنها در یک جهت (جهت پیکان) از خود عبور می‌دهند و در جهت مخالف، مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند و جریانی از آن‌ها عبور نمی‌کند.



شکل ۵-۶ در یک مدار الکتریکی امروزی تعداد زیادی قطعه‌های غیر اهمی به کار می‌رود.

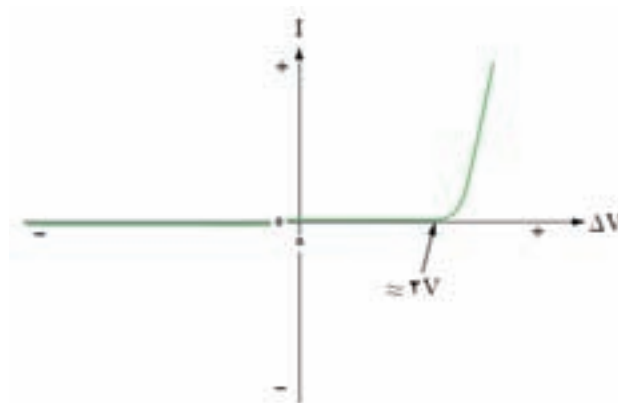
\* - این بخش جزء برنامه‌ی درسی کتاب نیست و تدریس آن اختیاری است.

یکی از انواع دیدودها، دیود نور گسیل یا LED است که وقتی از آن جریان می‌گذرد از خود نور گسیل می‌کند (شکل ۵-۷).



شکل ۵-۷ دیودهای نور گسیل (LED) در اغلب وسیله‌هایی که زندگی ما را احاطه کرده‌اند به کار رفته‌اند. این دیودها با عبور جریان اندکی از آن‌ها، از خود نور گسیل می‌کنند.

شکل ۵-۸ نمودار جریان - ولتاژ یک LED را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود تنها به ازای یک ولتاژ آستانه (حدود ۲V) از LED جریان می‌گذرد و شروع به گسیل نور می‌کند. امروزه LEDها افزون بر کاربردهای متداول، در ساخت صفحه‌های نمایش گوشی‌های تلفن همراه، نمایشگرهای رایانه و تلویزیون نیز استفاده می‌شوند.



شکل ۵-۸ نمودار جریان - ولتاژ یک دیود نور گسیل (LED) واقعی. نمودار به صورت یک خط راست نیست، زیرا LEDها از قانون اهم پیروی نمی‌کنند. در دیودهای واقعی در ولتاژ معکوس، تا حدی جریان عبور می‌کند.

#### شبیه‌سازی



- قانون اهم

#### فعالیت عملی



- قانون اهم
- رساناهای اهمی و غیر اهمی

همان طور که در شکل ۵-۷ نیز دیده می شود هر LED شامل دو پایه با طول های نامساوی است. برای روشن شدن LED، پایه ی بلندتر که آنود نامیده می شود باید به پایانه ی مثبت باتری و پایه ی کوتاه تر که کاتود نام دارد باید به پایانه ی منفی باتری وصل شود. در این وضعیت گفته می شود که ولتاژ در وضعیت پیش ولت موافق<sup>۱</sup> به دو سر دیود اعمال شده است. شکل ۵-۹ نوعی LED را نشان می دهد که به ازای ولتاژ رو به جلوی ۵V، از آن جریان ۳mA می گذرد. مقاومت دیود در این وضعیت چه قدر است؟



شکل ۵-۹

حل:

با توجه به داده های مسئله داریم:

$$I = 3\text{mA} = 3 \times 10^{-3} \text{A} , \Delta V = 5\text{V}$$

با استفاده از رابطه ی  $R = \Delta V / I$  داریم:

$$R = \frac{5\text{V}}{3 \times 10^{-3} \text{A}} = 167\Omega$$

همان طور که دیده می شود، دیودهای واقعی هنگام عبور جریان رو به جلو از خود مقاومت نسبتاً کمی نشان می دهند.

وقتی ولتاژ ۵V در پیش‌ولت مخالف<sup>۱</sup> به LED مثال ۵-۴ اعمال شود، از آن جریان ۱۰ میکرو آمپر ( $10 \times 10^{-6} \text{ A}$ ) می‌گذرد. مقاومت دیود را در این وضعیت پیدا کنید و مقدار آن را با حالتی که ولتاژ به صورت پیش‌ولت موافق اعمال شده بود مقایسه کند.

## فعالیت عملی



- آشنایی با LED ها و نحوه‌ی عملکرد آن‌ها در پیش‌ولت‌های موافق و مخالف
- استفاده از دیودها برای تعیین نوع بار یک جسم باردار

## ۵-۳ انرژی الکتریکی مصرفی در یک مقاومت

همان‌طور که دیدیم هنگام عبور جریان از یک رسانا، دمای آن افزایش می‌یابد؛ زیرا رسانا از خود مقاومت نشان می‌دهد. در یک لامپ رشته‌ای معمولی، مقدار زیادی (تا حدود ۹۵ درصد) از انرژی الکتریکی ناشی از عبور جریان به گرما تبدیل شده و کسر کوچکی از آن (تا حدود ۵ درصد) به صورت نور مرئی تابش می‌شود. آزمایش نشان می‌دهد که انرژی الکتریکی مصرفی در یک رسانای حامل جریان به عامل‌های زیر بستگی دارد:

۱- مقاومت الکتریکی رسانا ( $R$ )

۲- مجذور شدت جریان عبوری از رسانا ( $I^2$ )

۳- مدت زمان عبور جریان از رسانا ( $t$ )

اگر انرژی الکتریکی مصرفی در مقاومت را با نماد  $W$  نمایش دهیم، داریم:

$$W = RI^2t \quad (۱-۵)$$

در این رابطه، اگر  $R$  بر حسب اهم،  $I$  بر حسب آمپر و  $t$  بر حسب ثانیه بیان شوند،  $W$  بر حسب ژول به دست می‌آید.

با استفاده از رابطه  $R = \Delta V / I$ ، رابطه‌ی (۱-۵) را به شکل‌های دیگری نیز می‌توان نوشت که عبارت‌اند از:

$$W = (RI)It = \Delta V It \quad (۲-۵) \quad \text{رابطه‌ی مستقل از مقاومت}$$

$$W = \frac{(RI)^2}{R} t = \frac{\Delta V^2}{R} t \quad (۳-۵) \quad \text{رابطه‌ی مستقل از شدت جریان}$$

## مثال ۵-۵

مقاومت یک بخاری برقی به ازای ولتاژ ۲۲۰ ولت، وقتی کاملاً داغ شود برابر  $14\Omega$  است. اگر این بخاری به مدت ۲ ساعت روشن بماند چه قدر انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود؟

حل:

با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$\Delta V = 22.0 \text{ V}, R = 14 \Omega, t = 2 \text{ h} = 2 \times 3600 \text{ s} = 7200 \text{ s}$$

با استفاده از رابطه‌ی مستقل از شدت جریان داریم:

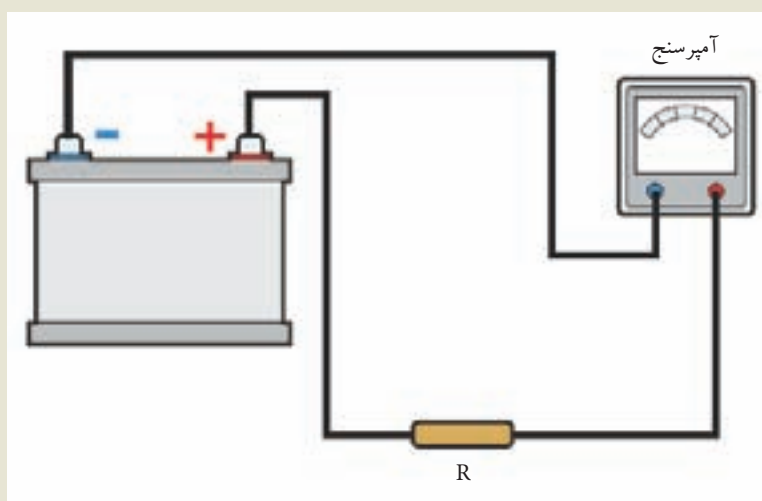
$$\begin{aligned} W &= \frac{\Delta V^2}{R} t \\ &= \frac{(22.0 \text{ V})^2}{(14 \Omega)} \times (7200 \text{ s}) = 348480.0 \text{ J} \approx 35 \text{ MJ} \end{aligned}$$

برای آن که بینید ۳۵ مگا ژول واقعاً معادل چه مقدار انرژی است از فیزیک (۱) و آزمایشگاه به یاد بیاورید که به ازای سوختن هر کیلو گرم گاز طبیعی حدود ۵۵ مگا ژول انرژی آزاد می‌شود.

#### مثال ۵-۶

در شکل ۵-۱۰ یک باتری با اختلاف پتانسیل  $\Delta V = 12 \text{ V}$  به یک وسیله‌ی مقاوم نواری شکل با مقاومت  $R$  متصل شده است. اگر آمپرسنج جریان  $2 \text{ A}$  را بخواند:

الف) جهت حرکت الکترون‌های رسانش (حامل‌های اصلی بار در یک رسانا) را در مدار تعیین کنید.  
ب) اگر مقاومت سیم‌های رابط ناچیز فرض شود، پس از ۵ دقیقه چه قدر انرژی الکتریکی به صورت انرژی گرمایی در مقاومت  $R$  تبدیل می‌شود؟



شکل ۵-۱۰



حل:

الف) جهت حرکت الکترون‌های رسانش در مدار، برخلاف جهت قراردادی جریان و از پایانه‌ی منفی باتری به طرف پایانه‌ی مثبت باتری است.

ب) با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$\Delta V = 12V, I = 2A, t = 5 \text{ min} = 5 \times 60 \text{ s} = 300 \text{ s}$$

با استفاده از رابطه‌ی مستقل از مقاومت داریم:

$$W = \Delta V I t = (12V)(2A)(300s) = 7200 \text{ J}$$

### تمرین ۳-۵

استارت اتومبیلی، در مدت زمان ۲s که می‌زند تا موتور را روشن کند، شدت جریان ۱۴۰A را در ولتاژ ۱۲V می‌کشد. انرژی الکتریکی مصرف شده در این مدت چه قدر است؟

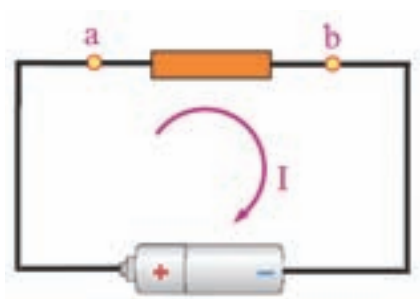
### ۵-۴ توان الکتریکی

شکل ۱۱-۵ مداری را نشان می‌دهد که شامل یک باتری است که با سیم‌هایی با مقاومت ناچیز، به یک وسیله‌ی رسانای دلخواه متصل شده است. این وسیله می‌تواند یک مقاومت، یک موتور الکتریکی، یک لامپ یا هر وسیله‌ی الکتریکی دیگری باشد. باتری، ولتاژ  $\Delta V$  را در دو سر پایانه‌های خود و در نتیجه (به دلیل حضور سیم‌ها) در دو سر وسیله‌ی رسانا برقرار می‌کند. به طوری که پتانسیل سر a این وسیله بیش‌تر از سر b آن است.

چون ولتاژ دو سر باتری ثابت است، جریان پایای I در مدار ایجاد می‌شود، و حامل‌های بار از پتانسیل بیش‌تر (نقطه‌ی a) به پتانسیل کم‌تر (نقطه‌ی b) شارش می‌کند. در نتیجه کاهش انرژی پتانسیل الکتریکی حامل‌های بار از a تا b با انتقال انرژی به شکل دیگری همراه است. آهنگ تبدیل انرژی الکتریکی به نوع دیگری از انرژی، مانند انرژی مکانیکی، گرما، یا نور، را **توان الکتریکی** می‌نامند.

به این ترتیب می‌توان نوشت:

$$P = \frac{W}{t} \quad \text{یا} \quad \text{توان الکتریکی} = \frac{\text{انرژی الکتریکی مصرف شده}}{\text{مدت زمان مصرف انرژی}} \quad (1-5)$$



شکل ۱۱-۵ باتری موجب ایجاد جریان در مواردی شامل یک وسیله‌ی رسانای نا مشخص شده است.

یکای توان در SI، ژول بر ثانیه (J/s) با جای گذاری رابطه‌ی (۵-۱) و دیگر رابطه‌های مربوط به انرژی الکتریکی مصرف شده در رابطه‌ی (۵-۴)، رابطه‌ی توان را می‌توان به شکل‌های دیگری نیز نوشت.

$$P = RI^2 \quad (۵-۵)$$

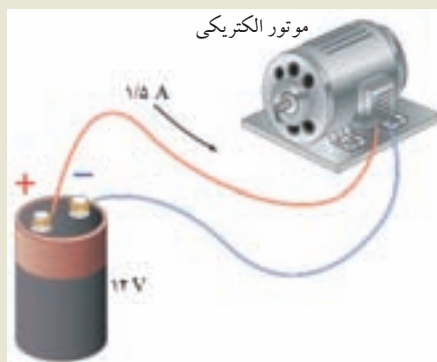
$$P = (\Delta V)^2 / R \quad (۶-۵)$$

$$P = I\Delta V \quad (۷-۵)$$

**توجه:** رابطه‌ی  $P = I\Delta V$  برای انتقال انرژی الکتریکی به همهی انواع انرژی به کار می‌رود؛ در حالی که رابطه‌های (۵-۵) و (۶-۵) فقط برای انتقال انرژی پتانسیل الکتریکی به انرژی گرمایی وسیله‌ای که دارای مقاومت است، به کار می‌روند. به عبارت دیگر برای به دست آوردن توان تلف شده در یک مقاومت، از رابطه‌ی (۵-۵) یا (۶-۵) استفاده می‌کنیم.

#### مثال ۷-۵

با توجه به شکل ۵-۱۲، توان موتور را به دست آورید.



شکل ۵-۱۲

**حل:**

با توجه به داده‌های روی شکل داریم:

$$I = 1/5 A, \Delta V = 12V$$

با جای گذاری این مقادیر در رابطه‌ی (۷-۵) داریم:

$$P = I\Delta V = (1/5 A)(12V) = 12W$$

### مثال ۵-۸

وقتی جریان ۳A از یک وسیله الکتریکی با مقاومت R می‌گذرد، انرژی گرمایی با آهنگ ۱۰۰W در آن تولید می‌شود. مقاومت R چه قدر است؟

**حل:**

با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$I = 3A, P = 100W$$

با قرار دادن این مقدارهای در رابطه‌ی (۵-۵) داریم:

$$P = RI^2 \Rightarrow 100W = R(3A) \Rightarrow R \approx 33/3 \Omega$$

### مثال ۵-۹

بیشینه‌ی توان تلف شده در یک مقاومت،  $P_m$ ، توان مجاز آن مقاومت نامیده می‌شود. شکل ۵-۱۳ یک مقاومت کربنی ۶۵ اهمی را نشان می‌دهد که توان مجاز آن ۵ وات است. بیشینه‌ی جریانی که از این مقاومت می‌تواند عبور کند چه قدر است؟



شکل ۵-۱۳

**حل:**

با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$R = 65 \Omega, P_m = 5W$$

با توجه به رابطه‌ی (۵-۵) داریم:

$$\begin{aligned} P_m = RI^2 &\Rightarrow (5W) = (65\Omega)I_m^2 \\ \Rightarrow I_m &= \sqrt{\frac{5W}{65\Omega}} \approx 0.28A \end{aligned}$$

چنانچه جریانی بیش از ۰/۲۸A از مقاومت شکل ۵-۱۳ بگذرد، مقاومت آسیب می‌بیند و به اصطلاح می‌سوزد.



شکل ۵-۱۴

روی جباب لامپ‌های رشته‌ای دو عدد، یکی بر حسب ولت و دیگری بر حسب وات، درج شده است (شکل ۵-۱۴). عدد اول مناسب‌ترین ولتاژی است که می‌توان به لامپ اعمال کرد بدون آن که آسیب ببیند و به آن ولتاژ اسمی (نامی) لامپ گفته می‌شود. عدد دوم، توان مصرفی لامپ است و در صورتی که لامپ با ولتاژ اسمی کار کند، توان اسمی (نامی) خوانده می‌شود.

الف) اگر لامپ شکل ۵-۱۴ با ولتاژ اسمی خود روشن شده باشد، چه جریانی از رشته‌ی تنگستنی لامپ می‌گذرد؟

ب) مقاومت لامپ در این وضعیت چه قدر است؟

پ) چنانچه لامپ به مدت یک ساعت روشن بماند، انرژی الکتریکی مصرف شده توسط لامپ چه قدر است؟

حل:

الف) در صورتی که ولتاژ اسمی به دو سر لامپ اعمال شود، توان مصرفی لامپ همان توان اسمی است. به این ترتیب داریم:

$$P = 100\text{W}, \Delta V = 230\text{V}$$

با استفاده از رابطه‌ی (۵-۷) داریم:

$$P = I\Delta V \Rightarrow 100\text{W} = I(230\text{V}) \Rightarrow I \approx 0.44\text{A}$$

ب) با استفاده از رابطه‌ی  $R = \Delta V / I$  داریم:

$$R = \frac{230\text{V}}{0.44\text{A}} \approx 523\Omega$$

پ) با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$t = 1\text{h} = 3600\text{s}$$

$$W = RI^2t = (523\Omega)(0.44\text{A})^2(3600\text{s})$$

$$= 364510\text{J} \approx 365\text{kJ}$$

اگر ولتاژ اعمال شده به دو سر لامپی بزرگ‌تر از ولتاژ اسمی آن باشد، لامپ می‌سوزد و اگر ولتاژ اعمال شده کم‌تر باشد، روشنایی لامپ از حالت عادی کم‌تر است. با استفاده از همین ویژگی می‌توان نور لامپ‌ها را توسط دستگاهی به نام دایمر یا کاهنده‌ی نور تنظیم کرد.

چنانچه لامپ شکل ۵-۱۳ با ولتاژ ۱۸۰ ولت روشن شود، شدت جریان و ولتاژ مصرفی لامپ چه قدر خواهد شد؟ (مقاومت رشته‌ی لامپ را در این حالت نیز  $523\Omega$  در نظر بگیرید).

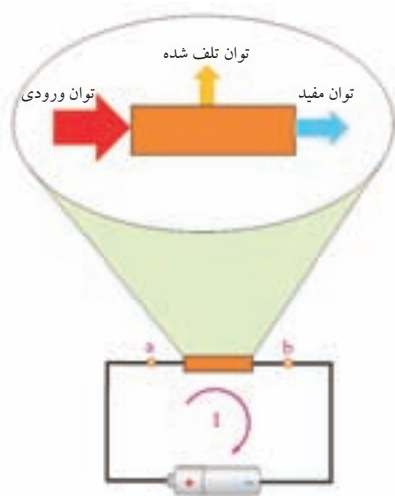
### ۵-۵ توان مفید و بازده در وسایل برقی

به مدار شکل ۵-۱۵ توجه کنید که در آن یک باتری توسط سیم‌هایی با مقاومت ناچیز به یک وسیله‌ی برقی وصل شده است. این وسیله‌ی برقی می‌تواند یک موتور الکتریکی، یک تلویزیون، یک یخچال و یا هر وسیله‌ی برقی دیگری باشد که هنگام ساخت آن‌ها تلاش می‌شود تا قسمت‌های مقاوم آن‌ها در برابر جریان کم‌ترین مقاومت الکتریکی را داشته باشند.

با برقرار شدن جریان در مدار، توان ورودی  $P_1$  به وسیله‌ی برقی وارد می‌شود. بخشی از این توان، به صورت توان مفید  $P_r$  صرف انجام کار می‌شود و بخش باقیمانده‌ی آن به صورت گرما در مقاومت و وسیله‌ی برقی به صورت گرما تلف می‌شود. به عنوان مثال در یک موتور الکتریکی، هر چه مقاومت سیم‌پیچ‌های موتور بیش‌تر باشد، توان تلف شده‌ی در آن ( $RI^2$ ) بیش‌تر و در نتیجه توان مفید کم‌تر خواهد شد. به همین دلیل سازندگان موتورهای الکتریکی تلاش زیادی می‌کنند تا مقاومت الکتریکی قسمت‌های مختلف موتور، به ویژه سیم‌پیچ آن‌را، کاهش دهند تا توان مفید آن که سبب انجام کار می‌شود افزایش یابد.

بازده یا کارایی هر وسیله‌ی برقی به صورت نسبت توان مفید ( $P_r$ ) به توان ورودی ( $P_1$ ) آن تعریف می‌شود. اگر بازده را با حرف یونانی  $\eta$  (بخوانید اِتا) نمایش دهیم، خواهیم داشت:

$$\eta = \frac{P_r}{P_1} \quad (۵-۸)$$



شکل ۵-۱۵ توان ورودی در هر وسیله‌ی برقی برابر است با مجموع توان مفید و توان تلف شده در قسمت‌های مقاومت آن وسیله‌ی برقی.



شکل ۵-۱۶

توان مفید یک جاروبرقی صنعتی ۲۴۰۰ وات و بازده آن ۸۰ درصد است (شکل ۵-۱۶).

الف) توان ورودی جاروبرقی چه قدر است؟

ب) توان تلف شده در جاروبرقی به چه شکل هایی از انرژی درآمده است؟

پ) اگر این جاروبرقی با ولتاژ ۲۲۰ ولت کار کند، چه جریانی از آن می گذرد؟

حل:

الف) با توجه به داده های مسئله داریم:

$$P_r = 2400 \text{ W}, \eta = 0.8$$

با جای گذاری در رابطه ی (۵-۸) داریم:

$$\eta = \frac{P_r}{P_i} \Rightarrow 0.8 = \frac{2400 \text{ W}}{P_i} \Rightarrow P_i = 3000 \text{ W}$$

ب) توان تلف شده به صورت انرژی گرمایی و انرژی صوتی است که به محیط پیرامون داده می شود و مقدار آن برابر  $P_i - P_r = 600 \text{ W}$  است.

پ) با توجه به داده های مسئله داریم:

$$\Delta V = 220 \text{ V}, P = P_i = 3000 \text{ W}$$

با جای گذاری در رابطه ی (۵-۷) داریم:

$$P = I \Delta V \Rightarrow 3000 \text{ W} = I(220 \text{ V}) \Rightarrow I = 13.6 \text{ A}$$

### تمرین ۵-۵

اسب بخار (hp) یکایی است که در تعدادی از دستگاه های قدیمی اندازه گیری برای کمیت توان به کار برده می شود و مقدار آن بر حسب یکاهای SI برابر  $746 \text{ W}$  است. روی پلاک یک موتور الکتریکی، توان مفید آن  $2/2$  اسب بخار و توان ورودی آن  $2/4$  اسب بخار درج شده است.

الف) بازدهی این موتور چه قدر است؟

ب) اگر این موتور با ولتاژ  $210$  ولت کار کند، چه جریانی از آن می گذرد؟

## ۵-۶ بهای انرژی الکتریکی مصرفی

برای محاسبه‌ی انرژی الکتریکی مصرفی هر مکان، شمارنده‌ای (کتور) نصب شده است که به کمک آن می‌توان مقدار انرژی مصرفی را تعیین کرد (شکل ۵-۱۷). اگر توان مصرفی یک دستگاه  $P$  باشد، پس از گذشت زمان  $t$ ، انرژی الکتریکی مصرفی آن برابر است با:

$$W = Pt$$

اگر  $P$  را بر حسب وات ( $W$ ) و  $t$  را بر حسب ثانیه ( $s$ ) بیان کنیم،  $W$  بر حسب ژول ( $J$ ) به دست می‌آید. اما روی شمارنده‌ها به دلیل کوچکی یکای ژول از یکای کیلووات ساعت ( $kWh$ ) استفاده می‌شود؛ یعنی  $P$  را بر حسب کیلو وات ( $kW$ ) و زمان را بر حسب ساعت ( $h$ ) بیان می‌کنند. در این صورت داریم:

$$1 kWh = (1000 W)(3600 s) = 3.6 \times 10^6 J$$

با ضرب انرژی مصرفی کل در قیمت هر کیلو وات ساعت، بهای انرژی الکتریکی مصرفی به دست می‌آید.



شکل ۵-۱۷ کنتورهای برق که نام اصلی آنها برق‌سنج یا انرژی‌سنج است، انرژی الکتریکی مصرفی را بر حسب کیلووات ساعت ( $kWh$ ) اندازه می‌گیرند.

## مثال ۵-۱۲

الف) یک لامپ ۱۰۰ واتی برای مدت ۶ ساعت روشن است. هزینه‌ی برق مصرفی آن چه قدر است؟ قیمت هر کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی مصرفی را ۳۰۰ ریال در نظر بگیرید.

ب) یک اتوی برقی ۱۸۰۰ واتی به مدت ۱۰ دقیقه روشن است. هزینه‌ی برق مصرفی آن چند ریال است؟

**حل:**

الف) با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$P = 100 W = 0.1 kW, \quad t = 6 h$$

$$W = Pt = (0.1 kW)(6 h) = 0.6 kWh$$

$$\text{ریال} = 0.6 \times 300 = 180$$

ب) با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$P = 1800 W = 1.8 kW, \quad t = 10 \text{ min} = \frac{1}{6} h$$

$$W = Pt = (1.8 kW)\left(\frac{1}{6} h\right) = 0.3 kWh$$

$$\text{ریال} = 0.3 \times 300 = 90$$



## پرسش‌های مفهومی

۱- با استفاده از جعبه‌ی کلمه‌ها، جمله‌های زیر را کامل کنید.

انرژی، اسمی، مصرفی، یک ژول بر ثانیه، یک ژول در ثانیه، توان  
اسمی، شدت جریان، مجذور شدت جریان، توان مصرفی

الف) عددی که بر حسب وات روی وسایل برقی نوشته شده است، ..... آن وسیله نامیده می‌شود.

ب) یک وات برابر ..... است.

پ) توان مصرفی یک وسیله‌ی برقی در صورتی با توان اسمی آن برابر است که وسیله به اختلاف پتانسیل ..... آن وصل شده باشد.

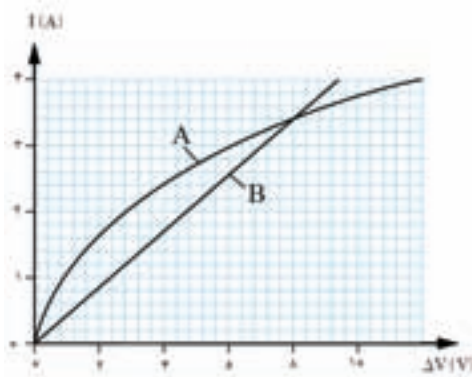
ت) انرژی گرمایی تولید شده در یک رسانای مقاوم، با ..... متناسب است.  
۲- از رابطه‌ی  $P = RI^2$  نتیجه می‌شود که با کاهش مقاومت، توان مصرفی نیز کاهش می‌یابد. در حالی که رابطه‌ی  $P = \Delta V^2 / R$  عکس این مطلب را بیان می‌کند. این تناقض را چگونه توجیه می‌کنید؟

۳- شکل ۵-۱۸ نمودار جریان - ولتاژ مربوط به یک لامپ رشته‌ای و یک رسانای اهمی را نشان می‌دهد.

الف) نمودار مربوط به هر کدام را مشخص کنید.

ب) به ازای چه ولتاژی هر دو دارای مقاومت یکسانی هستند؟

پ) مقدار مقاومت را به ازای ولتاژ قسمت (ب) تعیین کنید.



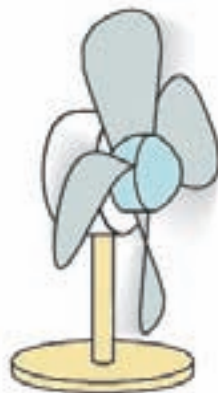
شکل ۵-۱۸ نمودار  $I-\Delta V$  مربوط به دو عنصر الکتریکی متفاوت



- ۴- اگر یک لامپ معمولی را با ولتاژی بیش تر از ولتاژ نوشته شده روی آن روشن کنیم، چه اتفاقی می افتد؟ اگر ولتاژ کم تر باشد، چطور؟
- ۵- مفهوم توان مجاز در مقاومت های کربنی به چه معناست؟ نقش شدت جریان در این خصوص چیست؟

### مسئله ها

- ۱- مقاومت یک لامپ رشته ای (۱۰۰ وات) در حالت خاموش  $50\Omega$  و ولتاژ اسمی آن  $230V$  است.
- الف) بیشینه جریانی که از رشته ی تنگستنی این لامپ می تواند بگذرد تا نسوزد، چه قدر است؟
- ب) مقاومت لامپ وقتی با ولتاژ  $220V$  ولت روشن می شود، چه قدر است؟
- ۲- یک پنکه ی متصل به منبع  $220V$  ولتی می تواند  $6A$  جریان بکشد (شکل ۵-۱۹). این پنکه در هر دقیقه چه قدر انرژی الکتریکی مصرف می کند؟



شکل ۵-۱۹

- ۳- روی برچسب پشت یک ماشین حساب عددهای  $3V$  و  $5mW$  نوشته شده است. با توجه به این موضوع، هر یک از کمیت های زیر را وقتی ماشین حساب روشن است، پیدا کنید.
- الف) شدت جریان کلی مدار.
- ب) انرژی مصرفی ماشین حساب در هر ثانیه و هر ساعت.

۴- نمودار شکل ۵-۲۰ چگونگی تغییرات جریان عبوری از المنت یک اتوی برقی را بر حسب زمان نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۰

- الف) توضیح دهید چرا اتو به این روش کار می‌کند.
- ب) نموداری رسم کنید که در آن چگونگی تغییرات دمای اتو را بر حسب زمان نشان دهد.
- پ) اگر اتو با ولتاژ  $220V$  کار کند، در کل مدت اتوکشی چند ژول و چند کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی مصرف شده است؟
- ت) اگر هزینه‌ی هر کیلو وات ساعت برق  $300$  ریال باشد، هزینه‌ی اتوکشی را پیدا کنید.
- ۵- جدول زیر جریان عبوری از سه وسیله‌ی برقی را که با ولتاژ  $220$  ولت شهری کار می‌کنند، نشان می‌دهد.

جریان (آمپر)	وسیله
۰/۵	لامپ رشته‌ای
۵/۵	بخاری برقی
۲/۲	مته‌ی برقی

- الف) مقاومت کدام وسیله از همه بیش تر است؟
- ب) توان هر سه وسیله را پیدا کنید.
- پ) اگر کاری که مته‌ی برقی هنگام سوراخ کردن یک قطعه فلز در هر دقیقه انجام می‌دهد معادل  $2/8 kJ$  باشد، بازدهی آن چند درصد است؟
- ۶- شکل ۵-۲۱ الف یک لامپ رشته‌ای را نشان می‌دهد. این گونه لامپ‌ها در بهترین شرایط تنها حدود  $10$  درصد انرژی الکتریکی مصرفی را به انرژی نورانی تبدیل می‌کنند و بقیه را به صورت گرما هدر می‌دهند. شکل ۵-۲۱ ب یک لامپ مهتابی (فلوئورسان) را نشان می‌دهد.



پ



ب



الف

شکل ۲۱-۵

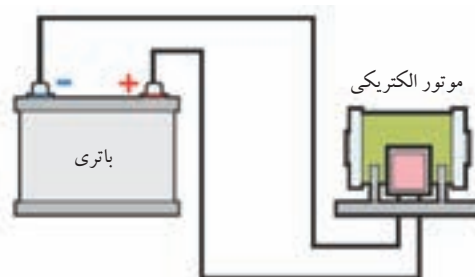
بازدهی این لامپ‌ها ۵ برابر لامپ‌های رشته‌ای است و عمر مفید آن‌ها در مقایسه با لامپ‌های رشته‌ای (که حدود ۱۰۰۰ ساعت است) می‌تواند تا ۳۰۰۰ ساعت برسد. شکل ۲۱-۵ پ یک لامپ کم‌مصرف را نشان می‌دهد که عمر مفید آن‌ها دست کم ۸۰۰۰ ساعت و مصرف انرژی آن‌ها در مقایسه با لامپ‌های رشته‌ای، در صورتی که هر دو نور یکسانی تولید کنند، یک پنجم است. برای مثال یک لامپ ۲۰W کم مصرف معادل یک لامپ رشته‌ای ۱۰۰W است. با این توصیف مطلوب است:

الف) اگر تمام لامپ‌های خانه‌ی خود را با لامپ‌های کم مصرف جایگزین کنید، چند درصد در انرژی مصرفی برق شما صرفه‌جویی می‌شود؟

ب) فرض کنید در شبانه‌روز به طور متوسط ۶ ساعت این لامپ‌ها روشن‌اند. در طول یک ماه (۳۱ روز) چند کیلو وات ساعت صرفه‌جویی انرژی خواهید داشت؟

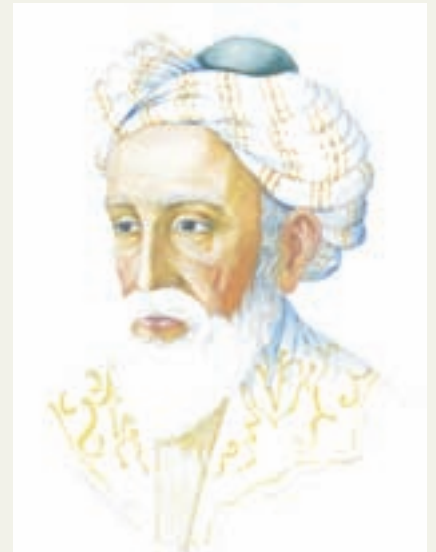
ت) اگر بهای هر کیلو وات ساعت برق مصرفی را ۳۰۰ ریال در نظر بگیریم، در طول دوره‌ی یاد شده، استفاده از لامپ‌های کم مصرف چه قدر به نفع شماست؟

۷- شکل ۲۲-۵ یک باتری ۱۲ ولت را نشان می‌دهد که یک موتور الکتریکی را به راه انداخته است. اگر توان مفید این موتور ۱/۲ اسب بخار و بازدهی آن ۸۸ درصد باشد، توان ورودی موتور چه قدر است؟



شکل ۲۲-۵

## حکیم عمر خیّام

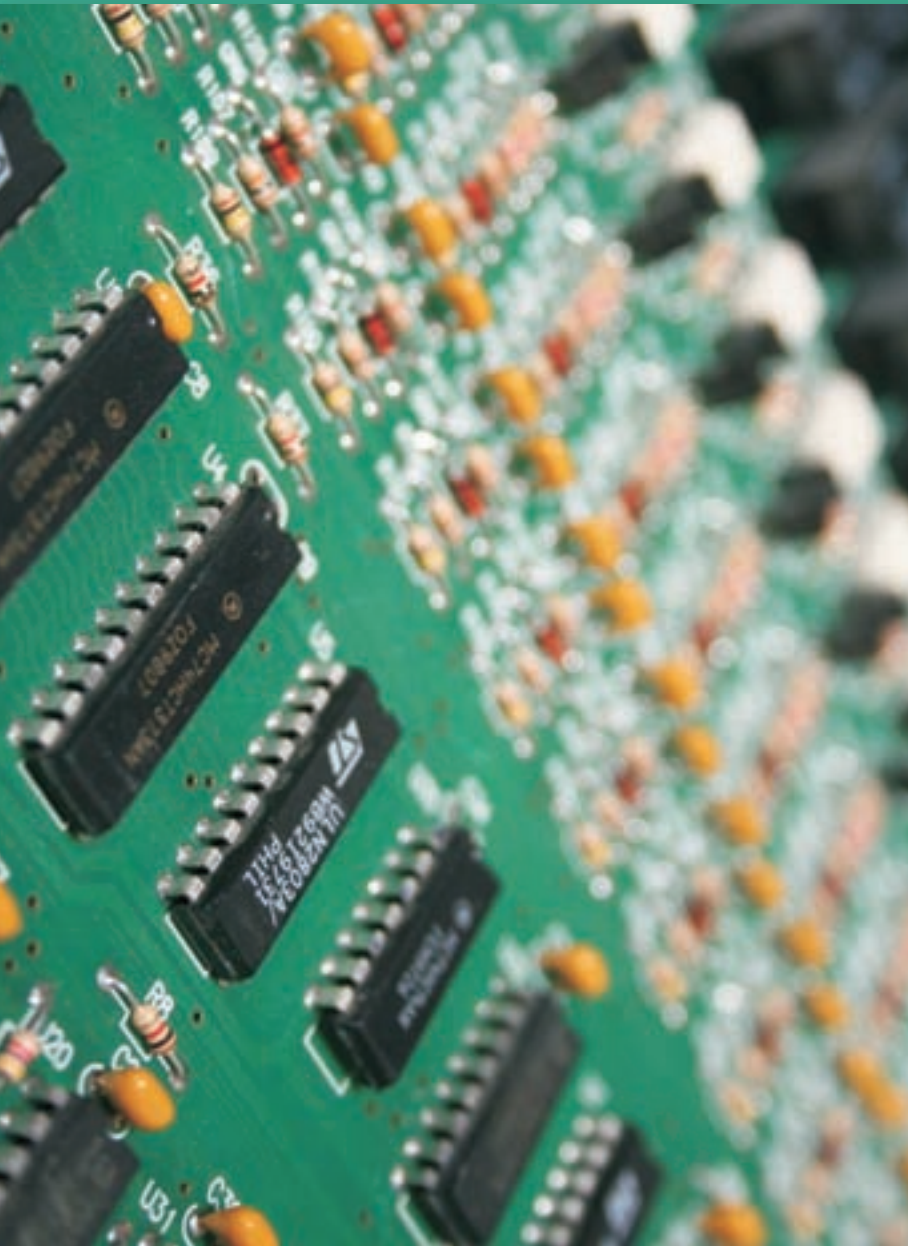


غیاث الدّین ابوالفتح عمر بن ابراهیم خیّامی که زادگاهش نیشابور در خراسان بوده است، در جهان با نام خیّام شناخته می‌شود. وی در ۴۲۷ خورشیدی در نیشابور دیده به جهان گشود و در ۵۱۰ خورشیدی دیده از جهان فرو بست. بیشتر آوازه‌ی خیّام در پیوند با رباعیات وی است در حالی که دیگر نگاشته‌های این ریاضیدان، اخترشناس و فیزیکدان بسی پُر حجم‌تر و پُر بارتر است. بزرگ‌ترین یادگار جاودانه‌ی خیّام، گاهشماری جلالی است که با وجود پیشرفت‌های شگرفی که تا سده‌ی بیست و یکم میلادی در زمینه‌های گوناگون علوم به دست آمده است، هنوز هم همانندی برای آن ساخته نشده است. خیّام در ریاضیات، شعر و ادب، دانش دینی و تاریخی از سرآمدان روزگار خود بود. برخی به غلط وی را شاگرد ابن سینا دانسته‌اند که به هیچ صورتی باورکردنی نمی‌نماید اما در این که برارزش‌های بی‌مانند ابن سینا ارج می‌نهاده تردیدی نیست. آری در واقع خیّام از شاگردان امام موفق نیشابوری بشمار می‌رفته است. خیّام اخترشناسی خرافاتی یا همان اختربینی (طالع‌بینی) را باور نداشت و بیش‌تر، ویژگی‌های اختران را از دریچه‌ی علم نظاره‌گر بود. بزرگان بسیاری، چه در روزگار خیّام و چه در زمان‌های پس از وی، آگاهی‌های فلسفی خیّام را ستوده‌اند. وی همانند بیرونی گردش زمین به دور خورشید را باور داشت.

از خیّام چهار کتاب ارزشمند در ریاضی به جای مانده که همچنان مورد توجّه ریاضی‌دانان و تاریخ‌نگاران علم قرار دارد. آن‌چه را که تا همین چند دهه‌ی پیش، بی‌چون و چرا به نیوتون انگلیسی و پاسکال فرانسوی نسبت می‌دادند، یعنی ضریب‌های بسط دو جمله‌ای نیوتون و مثلث پاسکال، اکنون از شاهکارهای خیّام قلمداد می‌کنند. خیّام کتابی دارد با نام «میزان الحکم» که آوازه‌ی جهانی دارد. خیّام در این اثر ارزشمند، روش اندازه‌گیری عیار طلا و نقره را آورده است. روشی که در آن مقدار طلا و نقره را از راه وزن کردن آلیاژ هم در هوا و هم در آب و به دست آوردن درصد کمّی از روی نتایج به کمک نسبت‌های برابر یا استوکیومتری، پیدا می‌کنند. به گونه‌ای چیزی را که دانشمندان غرب در سده‌های هجده و نوزده بدان دست یافته‌اند خیّام حدود هشتصد سال زودتر می‌دانسته است. خیّام کتاب دیگری در زمینه‌ی وزن کردن از روش جا به جایی سنگ و پارسنگ دارد که به صورت کامل در «میزان الحکمه» عبدالرحمن خازنی آمده است. خیّام در علم موسیقی نیز استاد بوده و کتابی در این حوزه نگاشته است.

# مدارهای الکتریکی

قسمت اول



مدارهای الکتریکی به منزله‌ی قلب رادیو، تلویزیون، گوشی  
تلفن‌های همراه، فرستنده‌ها و گیرنده‌ها، لوازم خانگی و ابزارهای  
صنعتی، رایانه‌ها و دستگاه عصبی جانداران به شمار می‌آیند.

## سیمای فصل ششم

- ۶-۱ قطعه‌ها و نمودارهای مدار الکتریکی
- ۶-۲ اتصال مقاومت‌ها به یکدیگر
- ۶-۳ اتصال متوالی مقاومت‌ها
- ۶-۴ مقاومت معادل در مدارهای متوالی
- ۶-۵ نقش رئوستا و پتانسیومتر در مدارهای متوالی
- ۶-۶ اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار
- ۶-۷ قانون ولتاژ کیرشهف
- ۶-۸ توان مصرفی در مدارهای متوالی
- ارزشیابی فصل ششم

## هدف‌های آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما فرا می‌گیرید:

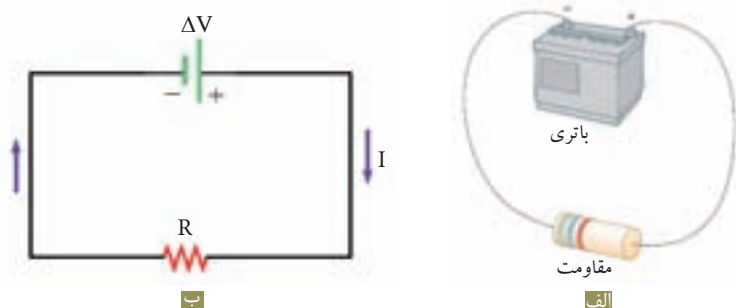
- مقاومت‌ها را چگونه می‌توان به یکدیگر متصل کرد.
- ویژگی‌های مهم اتصال متوالی مقاومت‌ها چیست.
- مقاومت معادل در اتصال سری چگونه به دست می‌آید.
- نقش رئوس‌تا و پتانسیومتر در مدارهای متوالی چیست و چگونه آن‌ها را در مدار قرار دهیم.
- اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار چگونه به دست می‌آید و مفهوم اتصال به زمین چیست.
- قانون ولتاژ کیرشهف چیست و چگونه در مدارهای تک‌حلقه به کار می‌رود.
- توان مصرفی در مدارهای متوالی چگونه محاسبه می‌شود.

## مدارهای الکتریکی (۱)

زندگی ما در احاطه‌ی مدارهای الکتریکی است. هر یک از وسایل برقی و نیز شبکه‌ی برقی که خانه‌ی ما را تغذیه می‌کند، به مهندسی برق نوین بستگی دارد. اکنون رادیوها به جای تنظیم دستی، به طور الکترونیکی تنظیم می‌شوند. پیام‌ها به جای ارسال از طریق شبکه‌ی پست، توسط پست الکترونیکی (email) یا سامانه‌ی ارسال پیامک (sms) فرستاده می‌شوند. مجله‌های علمی به جای مطالعه در کتابخانه با رایانه مطالعه می‌شوند و مقاله‌های پژوهشی به جای آن که فتوکی و در قفسه‌ها بایگانی شوند، به طور الکترونیکی ذخیره و نگهداری می‌شوند. همه‌ی این دستاوردها به مدد مدارهای الکتریکی ساده و پیچیده فراهم شده است. در این فصل مدارهای الکتریکی‌ای را بررسی می‌کنیم که ترکیبی از مقاومت‌ها و باتری‌ها به طور متوالی هستند. بحث خود را به مدارهایی موسوم به **مدارهای جریان مستقیم** یا **مدارهای dc** محدود می‌کنیم، که از آن‌ها جریان در یک جهت عبور می‌کند.

### ۱-۶ قطعه‌ها و نمودارهای مدار الکتریکی

شکل ۱-۶ یک مدار الکتریکی ساده شامل مقاومت، باتری و سیم‌های رابط را نشان می‌دهد. برای درک عملکرد این مدار، لازم نیست که بینیم سیم‌ها خمیده‌اند یا مستقیم، باتری در بالای مقاومت قرار دارد یا زیر آن. برای تحلیل و بررسی مدارها، مرسوم است که از تصویری ساده شده از مدار به نام **نمودار مدار** استفاده می‌شود. شکل ۱-۶ ب نمودار مربوط به مدار شکل ۱-۶ الف را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۶ الف) یک مدار الکتریکی ساده، ب) نمودار مدار شکل الف



همان‌طور که در شکل ۱-۶ ب نیز دیده می‌شود از نمادهای خاصی برای هر یک از قطعه‌های مدار شکل ۱-۶ الف استفاده شده است. در شکل ۲-۶ نماد برخی از قطعه‌هایی که در مدارهای الکتریکی این فصل به کار می‌روند، نشان داده شده است.

سیم با مقاومت ناچیز		مقاومت	
ولت‌سنج		رئوستا (مقاومت متغیر)	
آمپرسنج		باتری (منبع تغذیه‌ی جریان مستقیم)	
لامپ رشته‌ای معمولی		کلید باز	
زمین		کلید بسته	

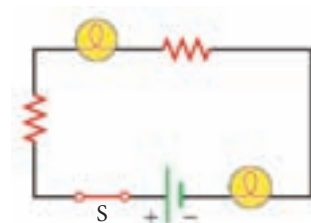
شکل ۲-۶

## ۲-۶ اتصال مقاومت‌ها به یکدیگر

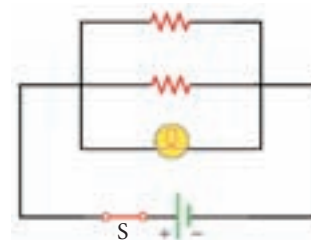
اغلب مدارهای الکتریکی بیش از یک قطعه برای عبور جریان و دریافت انرژی الکتریکی دارند. این قطعه‌ها را در مدارهای الکتریکی معمولاً به یکی از دو صورت، **متوالی** یا **موازی**، به هم وصل می‌کنند.

وقتی قطعه‌های یک مدار مانند شکل ۲-۶ به صورت متوالی به هم وصل می‌شوند، تنها یک مسیر برای عبور جریان بین پایانه‌های باتری، مقاومت‌ها، لامپ‌ها و... وجود دارد.

وقتی قطعه‌های یک مدار مانند شکل ۳-۶ به صورت موازی به هم متصل شوند، شاخه‌هایی را تشکیل می‌دهند، که هر کدام مسیر مجزایی برای عبور جریان الکتریکی است. هر دو اتصال متوالی و موازی ویژگی‌های خاص خود را دارند که در این فصل به آن‌ها خواهیم پرداخت.



شکل ۲-۶ در یک مدار متوالی، تمام قطعه‌ها به دنبال یکدیگر وصل می‌شوند و جریان یکسانی از آن‌ها می‌گذرد.



شکل ۳-۶ در یک مدار موازی، مسیرهای مجزایی برای عبور جریان از قطعه‌های مدار وجود دارد. در یک مدار موازی، جریان عبوری از یک قطعه می‌تواند با جریان عبوری از قطعه‌ی دیگر متفاوت باشد.



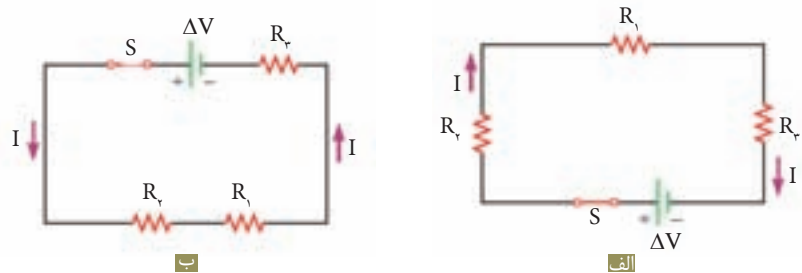
### ۳-۶ اتصال متوالی مقاومت‌ها

یک مدار ساده‌ی متوالی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. سه مقاومت به صورت متوالی به یک باتری وصل شده‌اند. وقتی کلید S بسته می‌شود، تقریباً بی‌درنگ جریان یکسانی از هر مقاومت می‌گذرد. حامل‌های بار در هیچ مقاومتی «انباشته نمی‌شوند»، بلکه همزمان در هر یک از آن‌ها روان می‌شوند.

افزون بر این‌ها، جریانی که از هر یک از مقاومت‌ها می‌گذرد، درست برابر جریانی است که از باتری می‌گذرد.

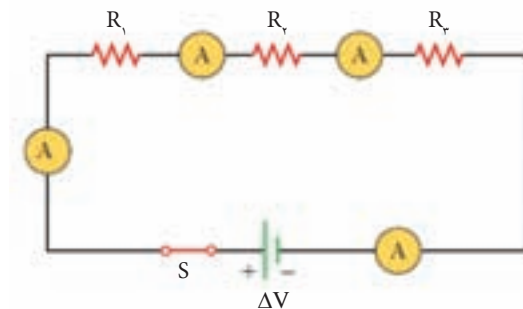
### ● ویژگی‌های مهم اتصال متوالی

ترتیب قرار گرفتن مقاومت‌ها در مدار متوالی، تغییری در شدت جریان عبوری از مدار نمی‌دهد. به عبارت دیگر جریان در هر یک از مدارهای شکل ۵-۶ الف و ب هیچ تفاوتی با جریان در مدار ۴-۶ ندارد.



شکل ۵-۶ ترتیب قرار گرفتن قطعه‌ها در یک مدار متوالی اهمیتی ندارد.

۲- جریان الکتریکی در مدار متوالی تنها یک مسیر را طی می‌کند، یعنی جریانی که از هر قطعه‌ی الکتریکی مدار می‌گذرد در طول مسیر یکسان است. بنابراین تمام آمپرسنج‌ها در مدار شکل ۶-۶ جریان یکسانی را می‌خوانند.



شکل ۶-۶ تمام آمپرسنج‌ها در مدار متوالی، جریان یکسانی را نشان می‌دهند. همین مقدار جریان نیز از باتری می‌گذرد.

#### فعالیت عملی

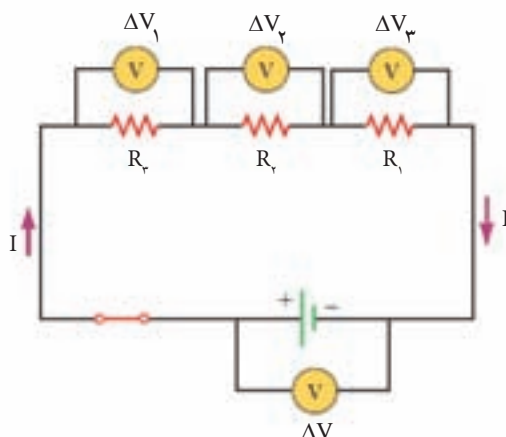
- مدارهای ساده‌ی الکتریکی
- تفاوت مدارهای متوالی و موازی

#### شبیه‌سازی

- اتصال متوالی مقاومت‌ها
- جریان و ولتاژ در مدارهای متوالی

۳- در یک مدار متوالی، ولتاژ  $\Delta V$  ایجاد شده توسط باتری بین مقاومت‌ها تقسیم می‌شود. ان موضوع را با بستن ولت‌سنج‌هایی به دو سر مقاومت‌ها و باتری، مطابق شکل ۶-۷، می‌توان نشان داد. به این ترتیب داریم:

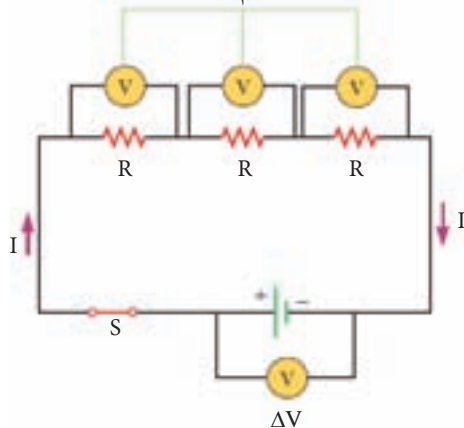
$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$$



شکل ۶-۷ مجموع «افت‌های ولتاژ» در دو سر هر مقاومت برابر کل ولتاژی است که باتری تأمین می‌کند. این ویژگی ناشی از آن است که مقدار انرژی در اختیار کل جریان، برابر مجموع انرژی‌هایی است که به هر مقاومت داده می‌شود.

۴- افت ولتاژ در دو سر هر قطعه با مقاومت آن متناسب است. با توجه به رابطه‌ی  $\Delta V = RI$ ، چون جریان  $I$  در کل مدار ثابت است، هر چه مقاومت  $R$  بیش‌تر باشد، افت ولتاژ در دو سر آن نیز بیش‌تر خواهد بود و هر چه مقاومت  $R$  کم‌تر باشد، افت ولتاژ در دو سر آن کم‌تر است. در حالت خاصی که هر سه مقاومت مطابق مدار شکل ۶-۸ یکسان باشند، افت ولتاژ در دو سر همه‌ی آن‌ها یکسان، و برابر یک سوم ولتاژ کل باتری است.

هر سه ولت‌سنج مقدار یکسانی برابر  $\frac{1}{3} \Delta V$  را می‌خوانند.



شکل ۶-۸ چون تمام مقاومت‌های مدار یکسان‌اند، افت ولتاژ در دو سر هر یک از آن‌ها مساوی و برابر یک سوم ولتاژ کل باتری است.

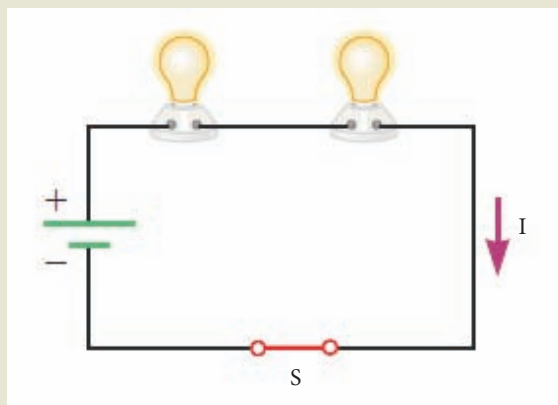
### فعالیت عملی



- اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در مدارهای متوالی
- اندازه‌گیری شدت جریان در مدارهای متوالی

### مثال مفهومی ۱-۶

شکل ۹-۶ مداری شامل دو لامپ و باتری را نشان می‌دهد. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتفاقی برای لامپ دیگر می‌افتد؟



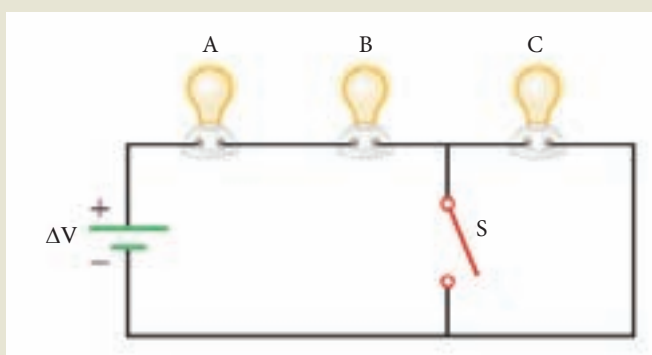
شکل ۹-۶

پاسخ:

اگر رشته‌ی یکی از لامپ‌ها بسوزد، مسیری که پایانه‌های منبع ولتاژ را به هم وصل می‌کند، گسسته خواهد شد و جریان متوقف می‌شود و در نتیجه لامپ دیگر خاموش می‌شود. این موضوع یکی از نقطه ضعف‌های مدار متوالی است. همواره اگر در یک مدار متوالی، یک قطعه خراب شود، جریان در تمام مدار متوقف می‌شود.

### مثال مفهومی ۲-۶

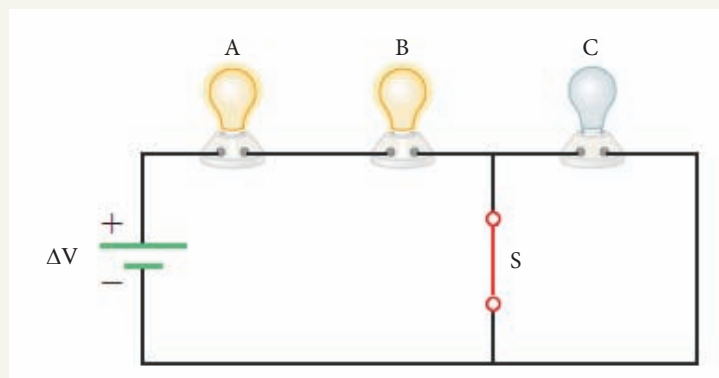
شکل ۱۰-۶ مداری شامل سه لامپ مشابه و باتری را نشان می‌دهد. اگر کلید  $S$  بسته شود چه تغییری در نور لامپ‌ها رخ می‌دهد؟



شکل ۱۰-۶

پاسخ:

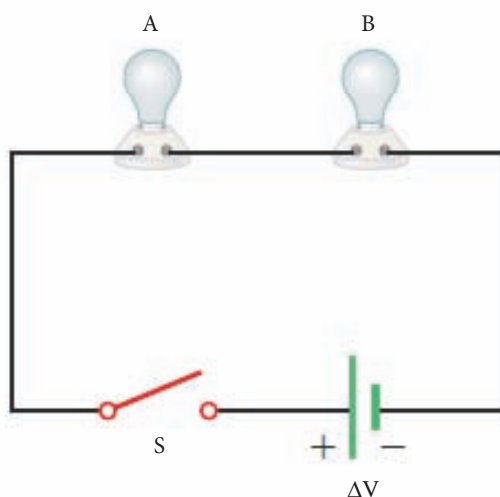
با بستن کلید S، دو سر لامپ C اتصال کوتاه شده و خاموش می‌شود. از طرف دیگر، چون یکی از تعداد لامپ‌ها کاسته شده است، روشنایی لامپ‌های A و B افزایش می‌یابد (شکل ۶-۱۱).



شکل ۶-۱۱ با خارج شدن لامپ C از مدار، ولتاژ باتری بین لامپ‌های A و B تقسیم شده و در نتیجه روشنایی آن‌ها بیش‌تر می‌شود.

پرسش ۶-۱

در مدار شکل ۶-۱۲، مقاومت لامپ A بیش‌تر از مقاومت لامپ B است. پس از بستن کلید S، نور لامپ‌ها را با یکدیگر مقایسه کنید. (دلیل کافی بیاورید.)



شکل ۶-۱۲

## ۴-۶ مقاومت معادل در مدارهای متوالی

همان‌طور که دیدیم ولتاژ کل اعمال شده به مدار متوالی، بین تک تک مقاومت‌ها تقسیم می‌شود. پس برای هر یک از مقاومت‌های مدار شکل ۱۳-۶ الف داریم:

$$\Delta V_1 = R_1 I$$

$$\Delta V_2 = R_2 I$$

$$\Delta V_3 = R_3 I$$

با جمع دو طرف این رابطه‌ها داریم:

$$\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 = (R_1 + R_2 + R_3) I$$

یا

$$\Delta V = (R_1 + R_2 + R_3) I$$

اکنون فرض کنید مقاومتی مانند  $R_T$  در اختیار داریم که با اعمال ولتاژ  $\Delta V$  به سر آن، جریان  $I$  از آن عبور کند (مدار شکل ۱۳-۶ ب)، در این صورت داریم:

$$\Delta V = R_T I$$

از مقایسه‌ی دو رابطه‌ی اخیر می‌توان نوشت:

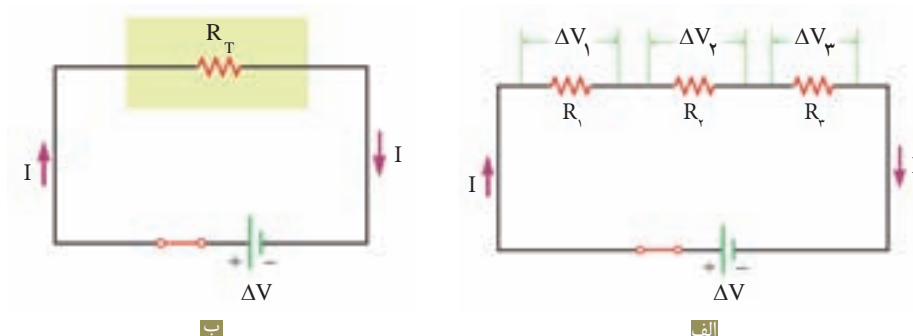
$$R_T I = (R_1 + R_2 + R_3) I$$

یا

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 \quad (۱-۶)$$

در این صورت  $R_T$  را مقاومت معادل  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  می‌نامیم. اگر بیش از سه مقاومت به طور متوالی به یکدیگر وصل شده باشند، مقاومت معادل با تحلیلی مشابه آن‌چه بیان شد از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots \quad (۲-۶)$$

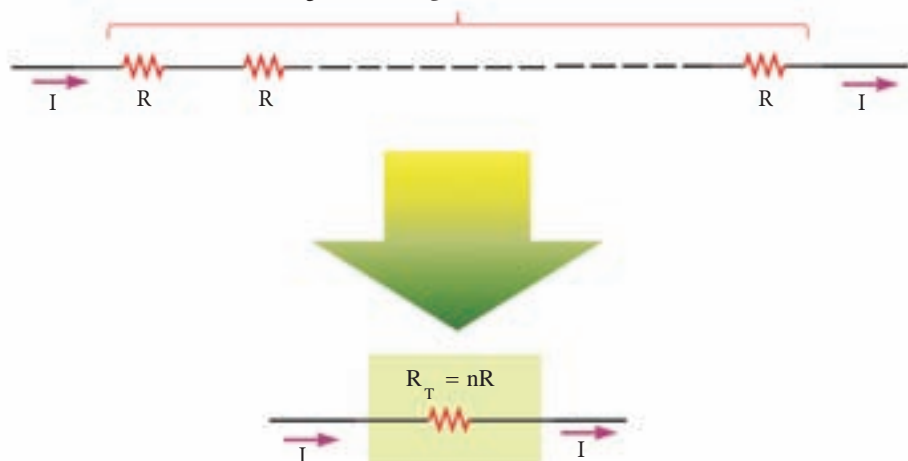


شکل ۱۳-۶ (الف) ولتاژ دو سر باتری بین هر یک از مقاومت‌ها تقسیم می‌شود. (ب)  $R_T$  مقاومت معادل  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  است، زیرا با اعمال ولتاژ  $\Delta V$  به دو سر آن، همان جریان  $I$  از آن می‌گذرد.



در حالت خاصی که  $n$  مقاومت مشابه  $R$  به طور متوالی به یکدیگر وصل شده باشند (شکل ۶-۱۴)، مقاومت معادل از رابطه‌ی  $R_T = nR$  به دست می‌آید.

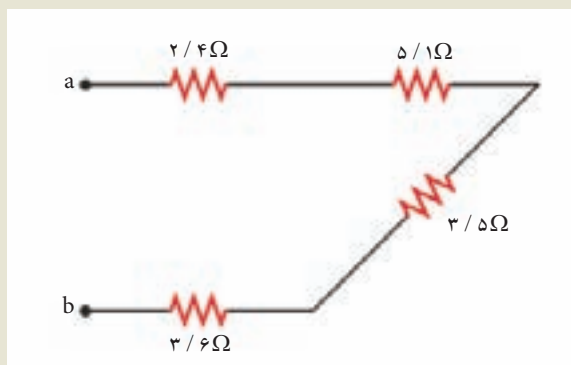
$n$  مقاومت مشابه که به طور متوالی به یکدیگر وصل شده‌اند.



شکل ۶-۱۴

### مثال ۶-۳

شکل ۶-۱۵ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. مقاومت بین دو نقطه‌ی  $a$  و  $b$  چند اهم است؟



شکل ۶-۱۵

حل:

همه‌ی مقاومت‌ها بین دو نقطه‌ی  $a$  و  $b$  به طور متوالی به یکدیگر وصل شده‌اند. پس مقاومت معادل بین این دو نقطه برابر است با:

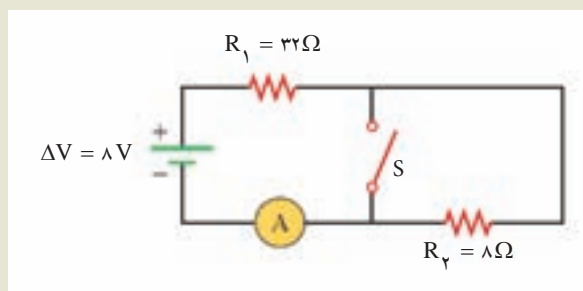
$$R_T = (2/4\Omega) + (5/1\Omega) + (3/5\Omega) + (3/6\Omega) \\ = 14/6\Omega$$

### مثال ۴-۶

در مدار شکل ۱۶-۶ مطلوب است:

الف) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد.

ب) اگر کلید S بسته شود، آمپرسنج چه مقداری را می‌خواند؟



شکل ۱۶-۶

حل:

الف) ابتدا مقاومت معادل مدار را پیدا می‌کنیم:

$$R_T = R_1 + R_2 = (32\Omega) + (8\Omega) = 40\Omega$$

برای پیدا کردن جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد از رابطه‌ی  $\Delta V = RI$  استفاده می‌کنیم. به این ترتیب داریم:

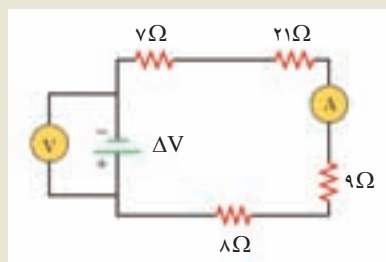
$$I = \frac{\Delta V}{R_T} = \frac{8V}{40\Omega} = 0.2A$$

ب) با بستن کلید S، مقاومت  $R_2$  از مدار حذف می‌شود (چرا؟). به این ترتیب تنها مدار شامل مقاومت  $R_1$  و باتری خواهیم داشت. عددی که آمپرسنج در این حالت می‌خواند برابر است با:

$$I = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{8V}{32\Omega} = 0.25A$$

### مثال ۵-۶

اگر آمپرسنج در مدار شکل ۱۷-۶ مقدار  $0.2A$  را بخواند، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد چه قدر است؟



شکل ۱۷-۶

حل:

ابتدا مقاومت معادل مدار را به دست می آوریم:

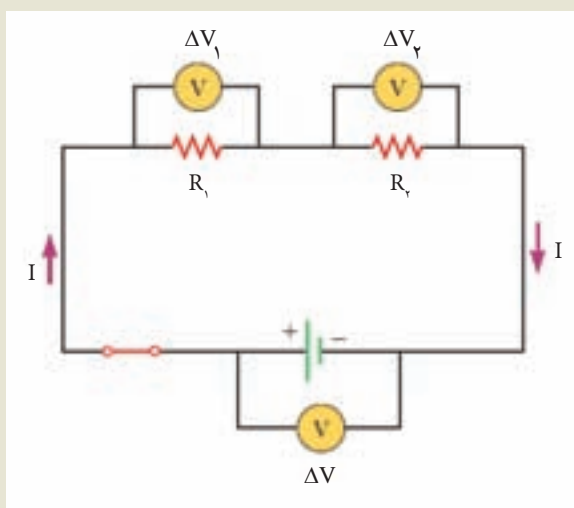
$$R_T = 7\Omega + 21\Omega + 9\Omega + 8\Omega = 45\Omega$$

عددی که ولت سنج نشان می دهد در واقع ولتاژ دو سر باتری است که از رابطه ی  $\Delta V = RI$  به دست می آید. پس داریم:

$$\Delta V = (45\Omega)(0.2A) = 9V$$

#### مثال ۶-۶

مدار شکل ۱۸-۶ شامل دو مقاومت  $R_1$ ،  $R_2$  و یک باتری را در نظر بگیرید که به طور متوالی به یکدیگر وصل شده اند. افت ولتاژ دو سر هر مقاومت را پیدا کنید.



شکل ۱۸-۶

حل:

با توجه به این که  $R_T = R_1 + R_2$ ، جریان  $I$  در مدار برابر است با:

$$I = \frac{\Delta V}{R_T} = \frac{\Delta V}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

از سوی دیگر افت ولتاژ دو سر مقاومت  $R_1$  برابر است با:

$$\Delta V_1 = R_1 I \quad (2)$$

با جای گذاری رابطه ی (۱) در رابطه ی (۲) داریم:

$$\Delta V_1 = \Delta V \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$



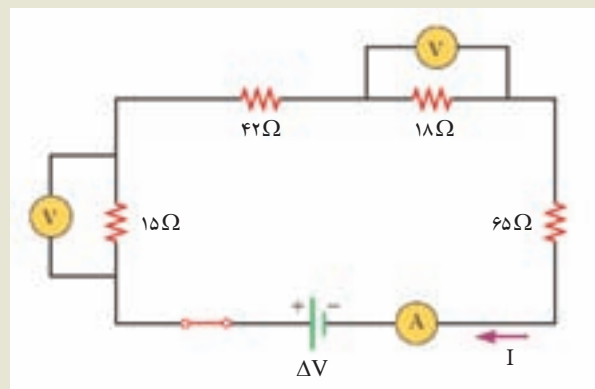
به طریق مشابه، افت ولتاژ دو سر مقاومت  $R_2$  برابر است با:

$$\Delta V_2 = \Delta V \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

دو رابطی اخیر نشان می‌دهند که تقسیم ولتاژ در مقاومت‌های یک مدار متوالی با مقدارهای آن‌ها نسبت مستقیم دارد.

### مثال ۶-۷

در مدار شکل ۱۹-۶ اگر آمپرسنج جریان  $100\text{mA}$  را بخواند، مطلوب است:  
 الف) ولتاژی که باتری به مدار اعمال می‌کند.  
 ب) عددی که هر یک از ولت‌سنج‌ها نشان می‌دهند.



شکل ۱۹-۶

**حل:**

الف) ابتدا مقاومت کل مدار را به دست می‌آوریم:

$$R_T = (15\Omega) + (42\Omega) + (18\Omega) + (65\Omega) = 140\Omega$$

ولتاژ دو سر باتری برابر است با:

$$\Delta V = R_T I = (140\Omega)(100 \times 10^{-3} \text{ A}) = 14\text{V}$$

ب) چون مدار متوالی و جریان در کل مدار ثابت است، ولتاژ دو سر مقاومت  $15\Omega$  اهمی برابر است با:

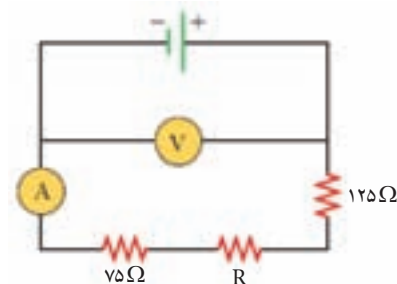
$$\Delta V = RI = (15\Omega)(100 \times 10^{-3} \text{ A}) = 1.5\text{V}$$

همچنین ولتاژ دو سر مقاومت  $18\Omega$  اهمی برابر است با:

$$\Delta V = RI = (18\Omega)(100 \times 10^{-3} \text{ A}) = 1.8\text{V}$$

افت ولتاژ در دو سر هر یک از مقاومت‌های ۴۲ و ۶۵ اهمی را در مدار شکل ۱۹-۶ پیدا کنید و با توجه به نتایجی که در مثال ۶-۷ به دست آوردید، نشان دهید که مجموع افت ولتاژهای دو سر مقاومت‌ها با ولتاژ دو سر باتری برابر است.

در مدار شکل ۲۰-۶ ولت‌سنج و آمپرسنج به ترتیب عددهای ۱۱۰V و ۰/۲A را می‌خوانند. مقاومت R چند اهم است؟



شکل ۲۰-۶

### ۵-۶ نقش رئوستا و پتانسیومتر در مدارهای متوالی

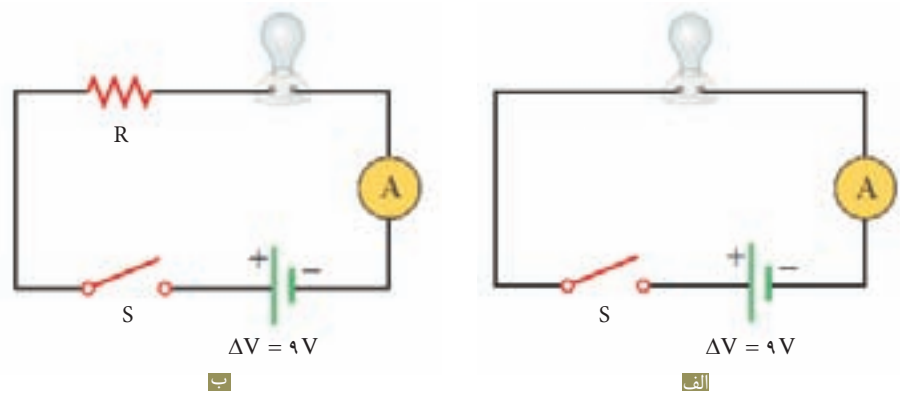
شکل ۲۱-۶ الف مدار شامل یک لامپ رشته‌ای با ولتاژ اسمی ۳V و توان اسمی ۶W را نشان می‌دهد که به همراه کلید S به یک باتری ۹ ولتی وصل شده است. فکر می‌کنید با بستن کلید S چه اتفاقی می‌افتد؟ پاسخ را درست حدس زدید! لامپ می‌سوزد؛ زیرا ولتاژی بیش از ولتاژ اسمی به آن اعمال شده است. یا به عبارت دیگر، جریانی بیش از جریان مجاز از رشته‌ی لامپ عبور کرده است. شدت جریان مجازی که می‌تواند از رشته‌ی لامپ بگذرد برابر است با:

$$I = \frac{P}{\Delta V} = \frac{6W}{3V} = 2A$$

در صورتی که با توجه به ولتاژ ۹ ولتی باتری، شدت جریان ۶A از رشته‌ی لامپ گذشته است (چرا؟) و همین امر سبب سوختن لامپ شده است. برای آن که پس از بستن کلید S لامپ نسوزد، یک راه این است که مقاومت ثابتی با مقدار مناسب را به طور متوالی با لامپ ببندیم (مدار شکل ۲۱-۶ ب).

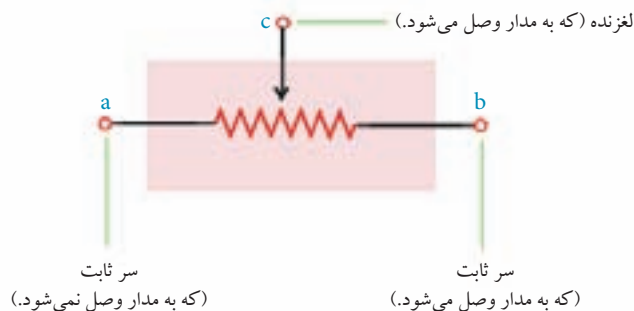
در این صورت دست کم باید ۶V از ولتاژ باتری، دوسر مقاومت R افت کند تا پس از بستن کلید، لامپ بدون آسیب دیدن روشن بماند. در واقع بستن مقاومت R به دنبال

لامپ، سبب کاهش جریان عبوری از رشته‌ی لامپ تا مقدار مجاز شده است.



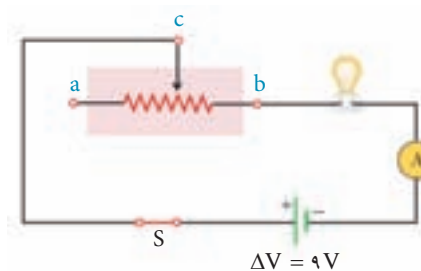
شکل ۲۱-۶ الف) از آن‌جا که ولتاژ باتری خیلی بیش‌تر از ولتاژ اسمی لامپ است، با بستن کلید S جریانی بیش از جریان مجاز از رشته‌ی لامپ می‌گذرد و لامپ می‌سوزد. ب) بستن مقاومت R به طور متوالی با لامپ، سبب کاهش جریان عبوری از رشته‌ی لامپ می‌شود. اگر مقدار مقاومت به درستی انتخاب شده باشد، جریان عبوری از رشته‌ی لامپ از حد مجاز بیش‌تر نخواهد بود و لامپ روشن می‌ماند.

از آن‌جا که پیدا کردن مقاومت ثابت مناسبی که بتوان از آن در مدار شکل ۲۱-۶ ب استفاده کرد، کار چندان ساده‌ای نیست و در برخی موارد حتی غیر ممکن است از مقاومت‌های متغیری استفاده می‌کنیم که رئوس نامیده می‌شوند. مقاومت رئوس نامی تواند از یک کمینه (حدود صفر) تا یک بیشینه (بسته به نیاز ما) تغییر کند. شکل ۲۲-۶ نماد متداول رئوس را در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهد.

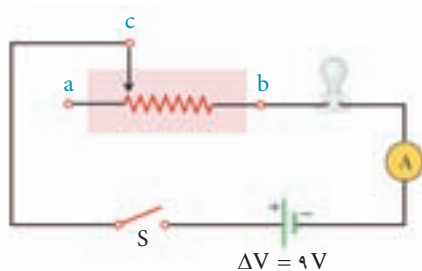


شکل ۲۲-۶ نماد رئوس (مقاومت متغیر) در مدارهای الکتریکی. اگر رئوس از سرهای a و b در مدار قرار گیرد، به صورت یک مقاومت ثابت عمل می‌کند. برای آن که رئوس به عنوان مقاومت متغیر عمل کند باید از سرهای c و b در مدار قرار گیرد.

به کمک رئوس نامی توان به سادگی جریان عبوری از مدار را تنظیم کرد. شکل ۲۳-۶ الف چگونه اتصال رئوس را در مدار شکل ۲۱-۶ الف نشان می‌دهد. ابتدا لغزنده رئوس را در وضعیتی قرار می‌دهیم تا مقاومت رئوس بیشینه باشد. سپس کلید را بسته و به آرامی لغزنده را حرکت می‌دهیم تا مقاومت رئوس کاهش و جریان مناسب از لامپ عبور کند (شکل ۲۳-۶ الف) شدت جریان را می‌توانیم به کمک آمپر سنج بخوانیم.



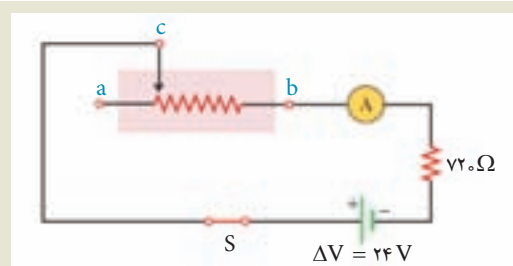
ب



الف

شکل ۲۳-۶ (الف) رئوستا را به طور متوالی به لامپ می‌بندیم و قبل از بستن کلید، لغزنده‌ی آن را در وضعیتی قرار می‌دهیم تا مقاومت رئوستا بیشینه باشد. (ب) پس از بستن کلید، به آرامی لغزنده‌ی رئوستا را حرکت می‌دهیم تا مقاومت آن کاهش یابد و در نتیجه جریان مناسبی از لامپ بگذرد و روشن شود.

## مثال ۸-۶



شکل ۲۴-۶

در مدار شکل ۲۴-۶ وقتی لغزنده‌ی رئوستا در نقطه‌ی a باشد مقاومت آن  $6k\Omega$  و وقتی در نقطه‌ی b باشد مقاومت آن حدود  $12\Omega$  است. شدت جریانی را که آمپرسنج می‌خواند در هر یک از حالت‌های زیر را به دست آورید.  
(الف) لغزنده در نقطه‌ی a باشد.  
(ب) لغزنده در نقطه‌ی b باشد.

**حل:**

(الف) وقتی لغزنده در نقطه‌ی a قرار دارد، مقاومت رئوستا  $6k\Omega$  و با مقاومت  $72\Omega$  به طور متوالی قرار دارند. در این صورت مقاومت معادل برابر است با:

$$R_T = 6000\Omega + 72\Omega = 6720\Omega$$

جریانی که آمپرسنج در این وضعیت می‌خواند برابر است با:

$$I = \frac{\Delta V}{R_T} = \frac{24V}{6720\Omega} \approx 0.0036A = 3.6mA$$

(ب) وقتی لغزنده در نقطه‌ی b قرار دارد، مقاومت معادل برابر است با:

$$R_T = 12\Omega + 72\Omega = 84\Omega$$

جریانی که آمپرسنج در این وضعیت می‌خواند برابر است با:

$$I = \frac{\Delta V}{R_T} = \frac{24V}{84\Omega} \approx 0.286A = 286mA$$

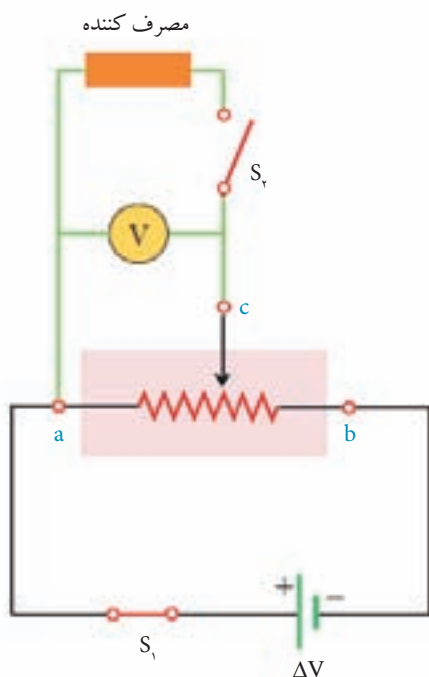
همان‌طور که دیده می‌شود به کمک رئوستای مدار شکل ۲۴-۶، می‌توان شدت جریان را بین مقدار بیشینه‌ی  $286mA$  تا مقدار کمینه‌ی  $3.6mA$  تنظیم کرد.

## رئوسا به عنوان پتانسیومتر

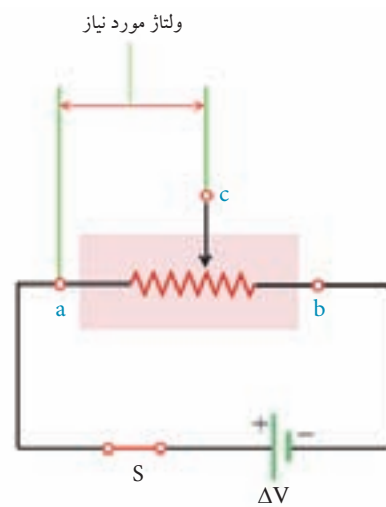
اگر از رئوسا برای دریافت ولتاژی کم‌تر از ولتاژ باتری یا منبع تغذیه استفاده شود، در این صورت یک پتانسیومتر خواهیم داشت. این موضوع در مدار شکل ۶-۲۵ نشان داده شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود هر سه سر رئوسا (دو سر ثابت و یک سر لغزنده) در مدار استفاده شده است و با اتصال دو سیم به سر ثابت  $a$  و سر لغزنده‌ی  $c$  رئوسا، می‌توان ولتاژ مورد نیاز را با جابه‌جا کردن لغزنده دریافت کرد.

برای مثال فرض کنید ولتاژ یک باتری  $24V$  و ولتاژ اسمی مصرف کننده‌ای که می‌خواهیم از آن استفاده کنیم  $3V$  باشد، در این صورت مطابق مدار شکل ۶-۲۶، آن‌قدر لغزنده را جابه‌جا می‌کنیم تا ولت‌سنج عدد  $3V$  را نشان دهد. سپس کلید  $S_p$  را می‌بندیم تا مصرف کننده به طور ایمن شروع به کار کند.

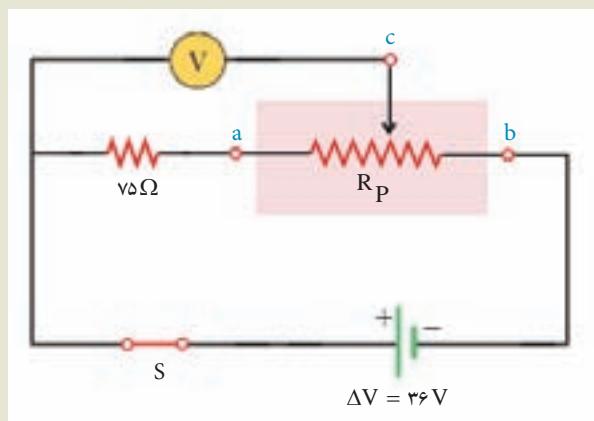


شکل ۶-۲۶ پس از آن که ولت‌سنج، ولتاژ مورد نیاز مصرف کننده را نشان دهد، کلید  $S_p$  را می‌بندیم تا مصرف کننده (مثلاً یک لامپ) شروع به کار کند.



شکل ۶-۲۵ به کمک رئوسا می‌توان ولتاژی کم‌تر از ولتاژ باتری دریافت کرد.

در مار شکل ۶-۲۷ برای آن که ولت سنج دست کم ۱۵V و بیشینه ۳۶V را بخواند، مقاومت پتانسیومتر  $R_p$  چه قدر باید باشد؟



شکل ۶-۲۷

**حل:**

برای آن که ولت سنج عدد ۱۵V را بخواند باید لغزنده در نقطه‌ی a قرار گیرد. در این صورت افت ولتاژ دو سر مقاومت ۷۵ اهمی برابر ۱۵ ولت خواهد رسید. در نتیجه جریان عبوری از مدار برابر است با:

$$I = \frac{15V}{75\Omega} = \frac{1}{5} A = 0.2A$$

چون ۱۵V از ولتاژ باتری دو سر مقاومت ۷۵ اهمی افت می‌کند، بقیه ولتاژ دو سر مقاومت  $R_p$  افت خواهد کرد. به این ترتیب داریم:

$$\begin{aligned} R_p I &= \text{افت ولتاژ در مقاومت } R_p \\ (36V - 15V) &= R_p (0.2A) \\ 21V &= R_p (0.2A) \Rightarrow R_p = 105\Omega \end{aligned}$$

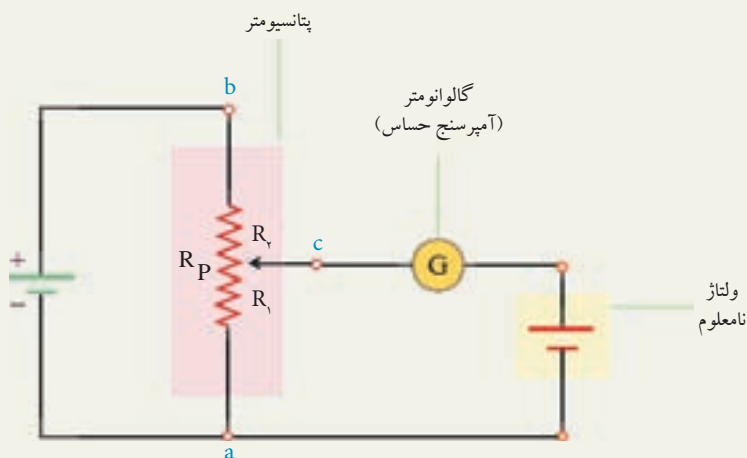
### مطالعه‌ی آزاد

#### پتانسیومتر و کاربردهای آن

پتانسیومتر (پتانسیل سنج)، وسیله‌ای الکتریکی است که قطعه‌ی سیمی مقاوم (یا از ماده‌ی مقاوم الکتریکی) با مقاومت  $R_p$  تشکیل شده است و روی آن یک سر لغزنده

قرار دارد که با سیم مقاوم اتصال الکتریکی برقرار می‌کند. پتانسیومتر سه محل اتصال الکتریکی دارد که عبارت‌اند از: سرهای ثابت  $a$  و  $b$  در دو سر سیم مقاوم و سر اتصال لغزنده  $c$  (شکل ۶-۲۸). پیچ تنظیم صدای رادیو یا وسایل صوتی دیگر، پتانسیومتری ساده و ارزان قیمت است. اما پتانسیومتر دقیق، وسیله‌ای گران‌قیمت است که برای اندازه‌گیری ولتاژ با دقت زیاد به کار برده می‌شود.

نام پتانسیومتر یا پتانسیل‌سنج از آن جا گرفته شده است که این وسیله می‌تواند مقدارهای مختلف ولتاژ، میان سر اتصال  $c$  و یک از دو سر سیم (مثلاً نقطه‌ای  $a$ ) را «بسنجد». فرض کنید وسیله‌ای با ولتاژ نامعلوم به دو سر  $a$  و  $c$  از طریق گالوانومتر وصل شده است. لغزنده  $c$  را آن قدر جا به جا می‌کنیم تا هیچ جریانی از گالوانومتر عبور نکند. در این شرایط ولتاژ نامعلوم برابر  $\frac{R_1}{R_P}(V_b - V_a)$  است که در آن  $(V_b - V_a)$  همان ولتاژ باتری است که برای ما معلوم است. همچنین  $R_P$  مقاومت کل سیم مقاوم پتانسیومتر و  $R_1$  مقاومت بین لغزنده و سر  $a$  پتانسیومتر است.

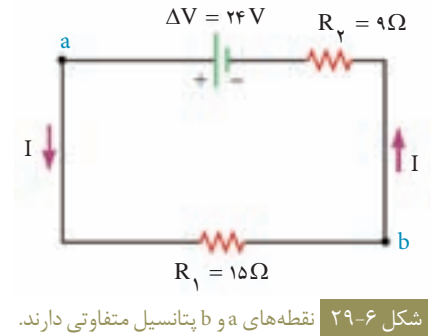


شکل ۶-۲۸ نمودار ساده از پتانسیومتر، برای اندازه‌گیری ولتاژ نامعلوم

با استفاده از پتانسیومتر بسیار دقیق می‌توان ولتاژها را تا پنج رقم با معنی و تا حد میکرو ولت هم اندازه‌گیری کرد. اما، فرایند اندازه‌گیری با پتانسیومتر کند و دستگاه اندازه‌گیری پر حجم است. در حال حاضر، بیش‌تر اندازه‌گیری‌های دقیق ولتاژ با استفاده از ولت‌سنج‌های رقمی (دیجیتال) دقیق انجام می‌گیرند. پتانسیومتر را برای درجه‌بندی ولت‌سنج رقمی می‌توان به کار برد.

## ۶-۶ اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار

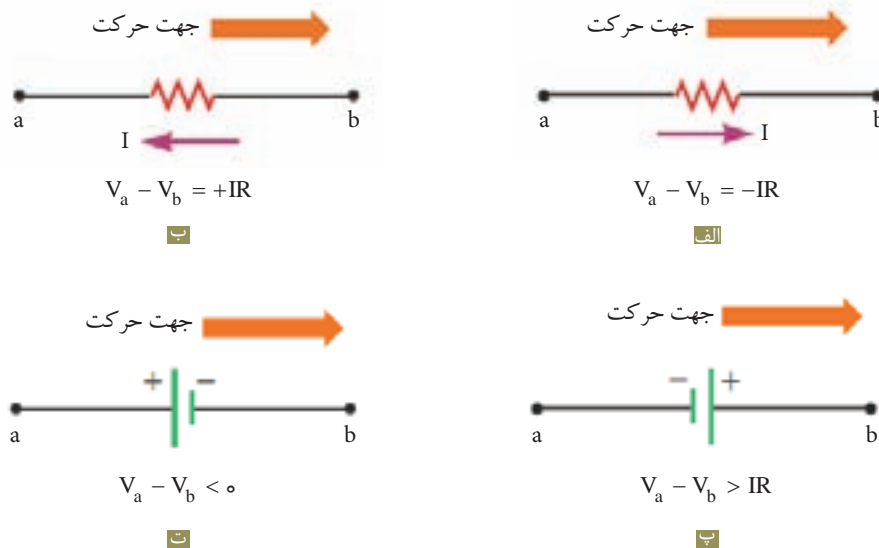
اغلب می‌خواهیم اختلاف پتانسیل یا ولتاژ بین دو نقطه از یک مدار را پیدا کنیم. مثلاً در مدار شکل ۶-۲۹، اختلاف پتانسیل  $V_a - V_b$  بین دو نقطه‌ی a و b چه قدر است؟ پیش از یافتن پاسخ، نکاتی را از فصل‌های قبلی یادآوری می‌کنیم. همان‌طور که می‌دانیم اگر در جهت خط‌های میدان الکتریکی حرکت کنیم پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد. چون جهت قراردادی جریان و جهت میدان الکتریکی در یک مدار یکسان گرفته می‌شوند، در نتیجه جهت جریان الکتریکی در یک مدار از پتانسیل بیش‌تر به پتانسیل کم‌تر است.<sup>۱</sup> بنابراین، در مدار شکل ۶-۲۹ پتانسیل نقطه‌ی a بیش‌تر از پتانسیل نقطه‌ی b است.



شکل ۶-۲۹ نقطه‌های a و b پتانسیل متفاوتی دارند.

جهت میدان الکتریکی درون باتری از پایانه‌ی مثبت به طرف پایانه‌ی منفی است. بنابراین اگر داخل باتری از پایانه‌ی مثبت به پایانه‌ی منفی برویم پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد.

همچنین اگر داخل باتری از پایانه‌ی منفی به طرف پایانه‌ی مثبت حرکت کنیم، پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد. آنچه بیان شد در شکل ۶-۳۰ به طور خلاصه آمده است.



شکل ۶-۳۰ قاعده‌هایی برای تعیین اختلاف پتانسیل در سر یک مقاومت و باتری (فرض شده است باتری آرمانی و بدون مقاومت درونی است). در شکل (ب) جهت حرکت از پایانه‌ی منفی به طرف پایانه‌ی مثبت باتری و در شکل (پ) جهت حرکت از پایانه‌ی مثبت به طرف پایانه‌ی منفی است.

۱ - شکل ۳-۳ را دوباره و با دقت بیش‌تر ببینید.



دوباره به مدار شکل ۶-۲۹ باز می‌گردیم. جریان  $I$  در این مدار برابر است با:

$$I = \frac{\Delta V}{R_1 + R_v} = \frac{24V}{15\Omega + 9\Omega} = 1A$$

اگر در جهت جریان از نقطه‌ی  $a$  به نقطه‌ی  $b$  برویم، خواهیم داشت:

$$V_a - IR_1 = V_b \Rightarrow V_a - V_b = IR_1 = (1A)(15\Omega) = 15V$$

چنانچه در خلاف جهت جریان از نقطه‌ی  $a$  به نقطه‌ی  $b$  برویم، خواهیم داشت:


$$V_a - \Delta V + IR_v = V_b$$

$$V_a - V_b = \Delta V - IR_v = 24V - (1A)(9\Omega) = 15V$$

همان‌طور که دیده می‌شود اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی یک مدار، ارتباطی به این که در جهت جریان یا در خلاف جهت جریان حرکت کنیم، ندارد.

**توجه:** برای یافتن اختلاف پتانسیل (ولتاژ) بین هر دو نقطه‌ای از یک مدار، از نقطه‌ای شروع می‌کنیم و مدار را با پیگیری مسیری دلخواه (در جهت جریان یا خلاف جهت جریان) تا نقطه‌ی دیگر می‌پیماییم و تغییر پتانسیل‌هایی را که با آن‌ها مواجه می‌شویم به طور جبری با هم جمع می‌کنیم.

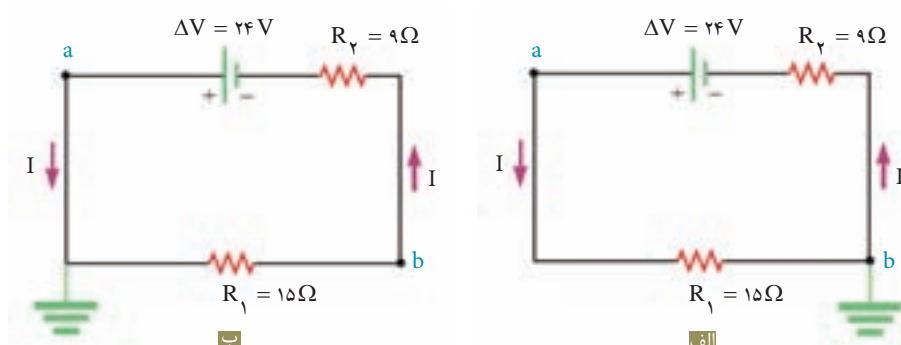
### اتصال به زمین یک مدار

شکل ۶-۳۱ الف همان مدار شکل ۶-۲۹ است با این تفاوت که نقطه‌ی  $b$  مستقیماً به زمین متصل شده است، که این با نماد عمومی  نشان داده می‌شود. اتصال به زمین یک مدار معمولاً به معنی اتصال مدار از طریق مسیری رسانا به سطح زمین (در واقع به خاک‌ها و سنگ‌های مرطوب رسانای الکتریکی زیر سطح زمین) است. در اینجا چنین اتصالی فقط به این معنی است که پتانسیل در نقطه‌ی اتصال به زمین مدار، صفر تعریف شده است. بنابراین در مدار شکل ۶-۳۱ الف، پتانسیل در نقطه‌ی  $b$  به صورت  $V_b = 0$  تعریف می‌شود. آن‌گاه می‌توان نوشت:

$$V_a - V_b = 15V \Rightarrow V_a = 15V$$

یعنی پتانسیل در نقطه‌ی  $a$  برابر  $15V$  است.

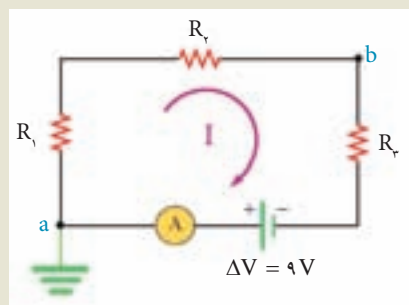
شکل ۳۱-۶ ب همان مدار را نشان می‌دهد، با این تفاوت که اکنون نقطه‌ی a به زمین متصل شده است. بنابراین، پتانسیل در آن جا به صورت  $V_a = 0$  تعریف می‌شود. اکنون در می‌یابیم که پتانسیل در نقطه‌ی b برابر  $V_b = -15V$  است.



شکل ۳۱-۶ (الف) نقطه‌ی b مستقیماً به زمین متصل شده است. (ب) نقطه‌ی a مستقیماً به زمین متصل شده است.

### مثال ۱۰-۶

در مدار شکل ۳۲-۶، اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی a و b را پیدا کنید. نقطه‌ی a به زمین وصل شده است. مقاومت‌های مدار را  $R_λ = 12Ω$ ،  $R_γ = 23Ω$ ،  $R_ρ = 10Ω$  بگیرد.



شکل ۳۲-۶

**حل:**

ابتدا جریانی را که آمپرسنج در مدار می‌خواند پیدا می‌کنیم. چون مقاومت‌ها به طور متوالی به یکدیگر وصل شده‌اند، داریم:

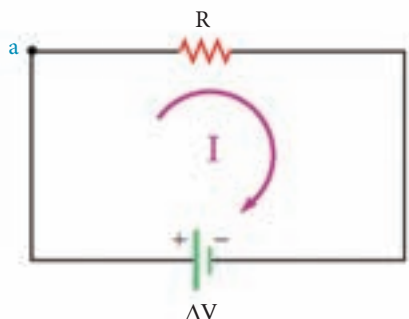
$$I = \frac{\Delta V}{R_T} = \frac{9V}{12\Omega + 23\Omega + 10\Omega} = 0.2A$$

برای به دست آوردن اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی a و b از نقطه‌ی a در جهت جریان شروع می‌کنیم تا به نقطه‌ی b برسیم. به این ترتیب داریم:

$$V_a - IR_\lambda - IR_\gamma = V_b$$

$$V_a - V_b = I(R_\lambda + R_\gamma) = (0.2A)(12\Omega + 23\Omega) = 7V$$

در مدار شکل ۳۲-۶، از نقطه‌ی a بر خلاف جهت جریان شروع کنید تا به نقطه‌ی b برسید. اختلاف پتانسیل بین این دو نقطه را پیدا کنید و با نتیجه‌ی مثال ۱۰-۶ مقایسه کنید.



شکل ۳۳-۶ مدار تک‌حلقه‌ای که در آن مقاومت R به دو سر باتری با ولتاژ  $\Delta V$  وصل شده است. جریان I در کل مدار یکسان است.

### ۶-۷ قانون ولتاژ کیرشهف

فرض کنید از نقطه‌ی دلخواهی (مثلاً نقطه‌ی a) در مدار شکل ۳۳-۶ شروع کنیم و در یکی از دو جهت، مدار را دور بزنیم و هر جا با اختلاف پتانسیل‌ها مواجه شدیم آن‌ها را به طور جبری با هم جمع کنیم. آن گاه وقتی به نقطه‌ی شروع باز می‌گردیم، باید دوباره به همان پتانسیل رسیده باشیم که از آن شروع کرده‌ایم.

آنچه را بیان کردیم می‌توان در قانون ولتاژ کیرشهف یا (قاعده‌ی حلقه‌ی کیرشهف) به صورت زیر مطرح کرد:

**قانون ولتاژ کیرشهف:** جمع جبری اختلاف پتانسیل‌هایی که در هر دور زدن کامل حلقه‌ای از مدار با آن مواجه می‌شوید، باید برابر صفر باشد.

این قانون (یا قاعده) معادل آن است که گفته شود هر نقطه روی یک کوه دارای فقط یک ارتفاع از سطح دریاست. اگر از نقطه‌ای شروع کنید و پس از دور زدن کوه دوباره به آن نقطه باز گردید، جمع جبری تغییر ارتفاع‌هایی که با آن‌ها مواجه بوده‌اید باید برابر صفر باشد. در مدار شکل ۳۳-۶، اگر از نقطه‌ی a در جهت جریان شروع کنیم، به مقاومت R می‌رسیم که افت ولتاژ دو سر آن برابر  $-IR$  است. سپس به باتری می‌رسیم که باید از پایانه‌ی منفی به پایانه‌ی مثبت آن برویم. در این صورت اختلاف پتانسیل به اندازه‌ی  $\Delta V$  افزایش می‌یابد. بنابراین قانون ولتاژ کیرشهف را برای این مدار به صورت زیر می‌توان نوشت:

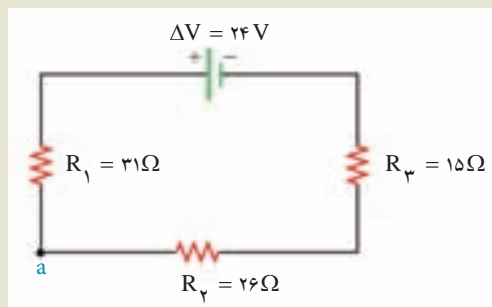
$$-IR + \Delta V = 0 \Rightarrow \Delta V = IR$$

اگر از نقطه‌ی a در خلاف جهت جریان شروع کنیم، به پایانه‌ی مثبت باتری می‌رسیم که باید از داخل باتری عبور کنیم تا به پایانه‌ی منفی برسیم. در این صورت ولتاژ به اندازه‌ی  $-\Delta V$  کاهش می‌یابد. سپس به مقاومت R می‌رسیم که با افزایش اختلاف پتانسیل  $+IR$  مواجه می‌شویم. بنابراین:

$$-\Delta V + IR = 0 \Rightarrow \Delta V = IR$$

که با نتیجه‌ی قبلی یکسان است.

قانون ولتاژ کیرشهف را در مدار شکل ۳۴-۶ بررسی کنید.



شکل ۳۴-۶

حل:

ابتدا جریان  $I$  را در حلقه‌ی مدار به دست می‌آوریم. چون مقاومت‌ها به طور متوالی به هم وصل شده‌اند، داریم:

$$I = \frac{\Delta V}{R_T} = \frac{24V}{31\Omega + 26\Omega + 15\Omega} = \frac{1}{3} A$$

اگر در جهت جریان از نقطه‌ی  $a$  شروع کنیم تا به ترتیب از مقاومت  $R_2$  و دیگر قطعه‌های مدار بگذریم، خواهیم داشت:

$$-IR_1 - IR_2 + \Delta V - IR_3 = 0$$

توجه کنید که باید داخل باتری و از پایانه‌ی منفی آن به طرف پایانه‌ی مثبت حرکت کنیم، در نتیجه افزایش ولتاژ داریم.

$$\Delta V = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

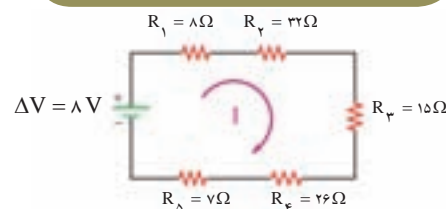
$$24V = \left(\frac{1}{3} A\right)(31\Omega + 26\Omega + 15\Omega)$$

در نتیجه:

$$24V = \left(\frac{1}{3} A\right)(72\Omega) = 24V$$

#### تمرین ۴-۶

قانون ولتاژ کیرشهف را در مدار شکل ۳۵-۶ بررسی کنید.



شکل ۳۵-۶

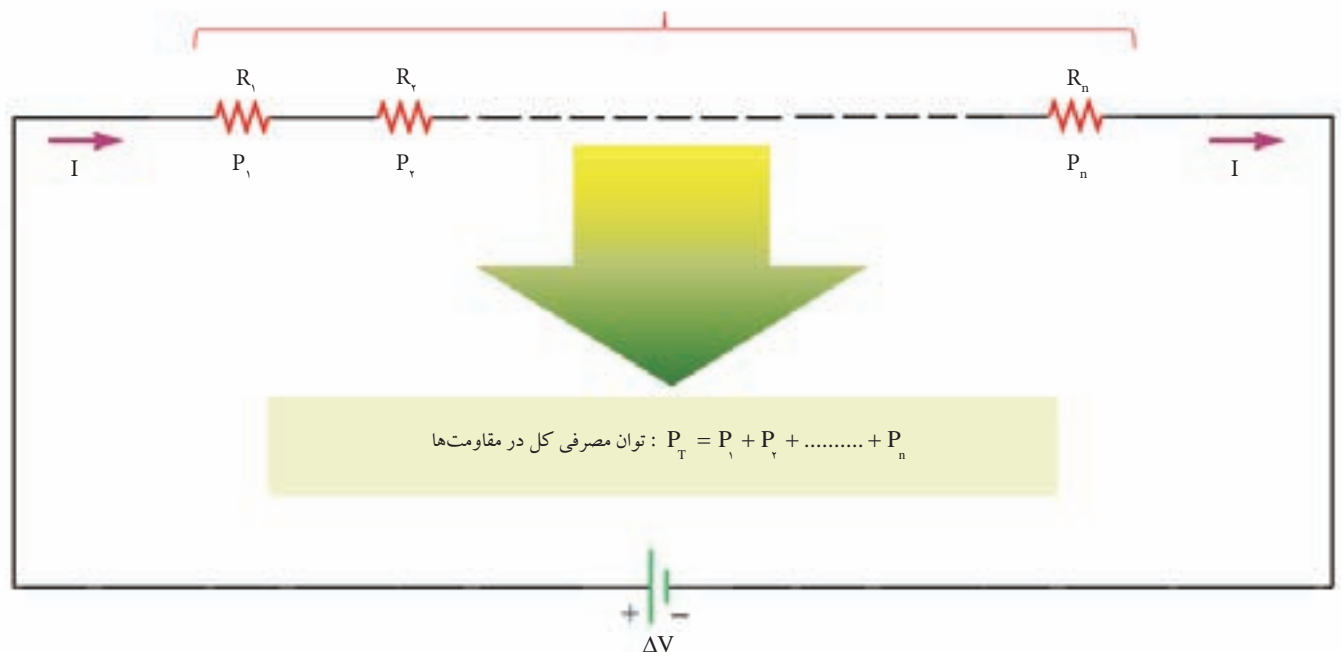


## ۸-۶ توان مصرفی در مدارهای متوالی

توان مصرفی کل در یک مدار متوالی یا تک حلقه، برابر مجموع توان‌هایی است که در هر یک از مقاومت‌های مدار مصرف می‌شود. مدار شکل ۶-۳۶، تعداد  $n$  مقاومت را نشان می‌دهد که با یک باتری به طور متوالی وصل شده‌اند. توان مصرفی کل در مقاومت‌ها برابر است با:

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

$n$  مقاومت که به طور متوالی به یکدیگر وصل شده‌اند.

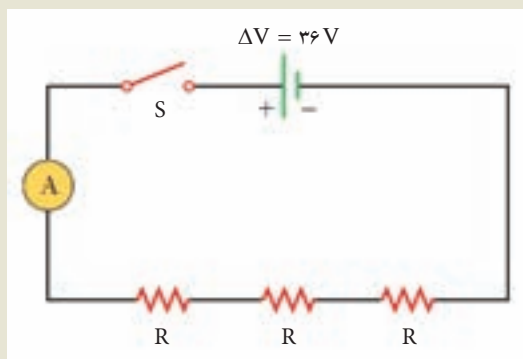


شکل ۶-۳۶ مداری تک حلقه شامل  $n$  مقاومت و یک باتری. توان تولیدی توسط باتری در مقاومت‌ها و سایر اجزای مدار مصرف می‌شود.

۶

### مثال ۶-۱۲

در مدار شکل ۶-۳۷ همه‌ی مقاومت‌ها مشابه و مقدار هر یک برابر  $10\Omega$  است. اگر توان مجاز هر مقاومت  $40W$  باشد:  
 الف) آیا پس از بستن کلید  $S$ ، مقاومت‌ها می‌سوزند؟  
 ب) در صورتی که مقاومت‌ها نسوزند، توان مصرفی کل را به دست آورید.



شکل ۶-۳۷

حل:

الف) با توجه به فرض‌های مسئله، توان مجاز هر مقاومت ۱۰ اهمی برابر ۲W است. بنابراین بیشینه‌ی جریان مجازی که می‌تواند از هر مقاومت بگذرد تا نسوزد، برابر است با:

$$P_m = RI_m^2 \Rightarrow 40W = (10\Omega)I_m^2 \Rightarrow I_m = 2A$$

یعنی اگر پس از بستن کلید S، جریانی بیش از ۲A از مدار و در نتیجه مقاومت‌ها بگذرد، مقاومت‌ها می‌سوزند. اکنون جریانی را که پس از بستن کلید S، از آمپرسنج و در نتیجه مقاومت‌ها می‌گذرد، به دست می‌آوریم:

$$I = \frac{\Delta V}{R_T} = \frac{36V}{3 \times (10\Omega)} = 1/2A$$

چون جریان ایجاد شده توسط باتری کم‌تر از جریان مجاز مقاومت‌هاست، بنابراین با بستن کلید S، مقاومت‌ها نمی‌سوزند. ب) توان مصرفی در هر مقاومت برابر است با:

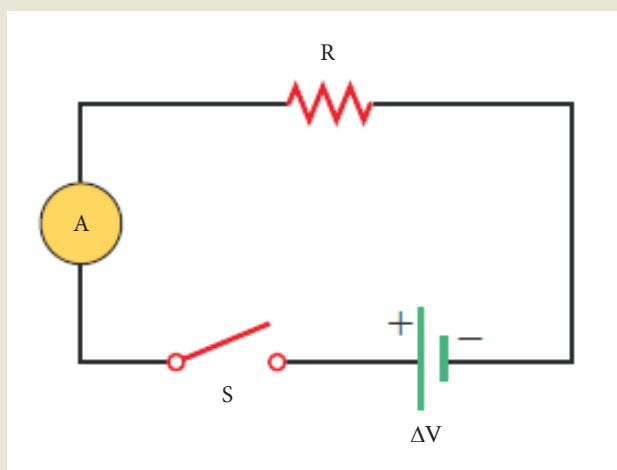
$$P = RI^2 = (10\Omega)(1/2A)^2 = 14/4W$$

توان کل مصرفی برابر است با:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 = 14/4W + 14/4W + 14/4W = 43/2W$$

### مثال ۶-۱۳

الف) توانی که یک باتری با مشخصات ۲۲۰V و ۱۰mA می‌تواند تولید کند، چه قدر است؟  
ب) اگر این باتری را مطابق مدار شکل ۶-۳۸ به مقاومتی با توان مجاز ۲W وصل کنیم، پس از بستن کلید S چه اتفاقی می‌افتد؟



شکل ۶-۳۷

حل:

الف) توان تولیدی باتری برابر است با:

$$P = I \Delta V = (10 \times 10^{-3} \text{ A})(220 \text{ V}) = 2.2 \text{ W}$$

ب) چون توان تولیدی باتری، بیش تر از توان مجاز مقاومت است، پس از بستن کلید S، مقاومت بیش از حد مجاز گرم می شود و می سوزد.

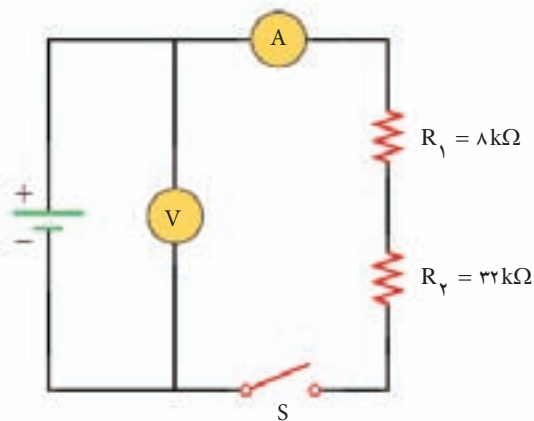
#### تمرین ۵-۶

توان مجاز مقاومت های  $R_1$  و  $R_2$  در مدار شکل ۳۹-۶ به ترتیب ۱ و ۴ وات است. اگر پس از بستن کلید S، آمپرسنج عدد ۵mA را بخواند:

الف) عددی که ولت سنج نشان می دهد چه قدر است و این مقدار نشان دهنده ی چیست؟

ب) توان مصرفی در هر مقاومت و توان کل مصرفی را حساب کنید و ببینید آیا مقاومت ها پس از بستن کلید S می سوزند یا خیر.

پ) توان تولیدی توسط باتری را پیدا کنید.

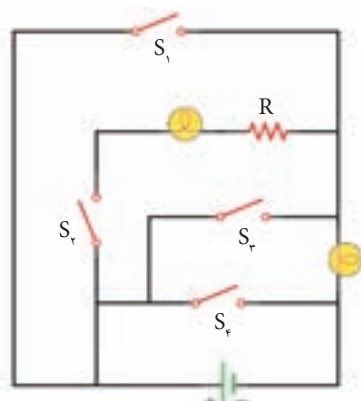


شکل ۳۹-۶



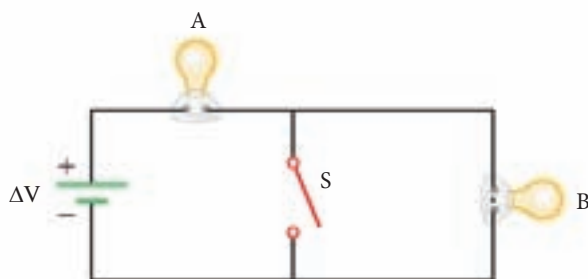
## پرسش‌های مفهومی

- ۱- در مدار شکل ۴۰-۶ با بستن کدامیک از کلیدها:  
 الف) یک مدار کامل شامل تمامی قطعه‌ها تشکیل می‌شود؟  
 ب) دو سر باتری اتصال کوتاه می‌شود؟



شکل ۴۰-۶

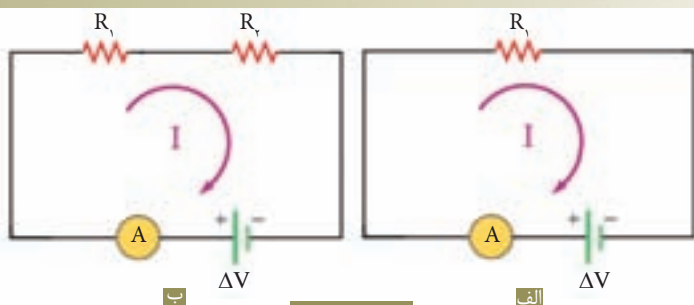
- ۲- در مدار شکل ۴۱-۶ لامپ‌های A و B مشابه‌اند. پس از بستن کلید S چه تغییری در نور هر یک از لامپ‌ها رخ دهد؟



شکل ۴۱-۶

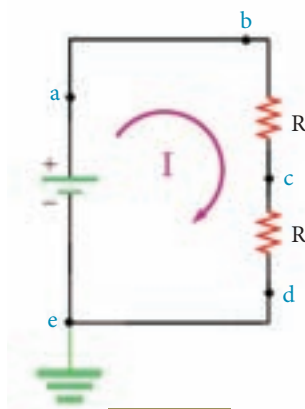
- ۳- مقاومت  $R_1$  به یک باتری بسته می‌شود (شکل ۴۲-۶ الف) و سپس مقاومت  $R_2$  به طور متوالی اضافه می‌گردد (شکل ۴۲-۶ ب).  
 الف) ولتاژ دو سر مقاومت  $R_1$  را در هر دو حالت با هم مقایسه کنید.  
 ب) جریانی را که آمپرسنج در هر مدار می‌خواند با هم مقایسه کنید.  
 پ) مقاومت معادل در مدار شکل ۴۲-۶ ب نسبت به مقاومت  $R_1$  بیش‌تر است یا کم‌تر و یا برابر با آن است؟





شکل ۴۲-۶

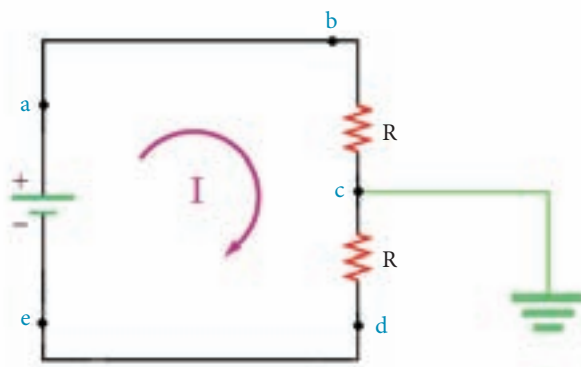
۴- اگر ولتاژ دو سر باتری در مدار شکل ۴۳-۶ برابر ۱۰ ولت باشد، پتانسیل الکتریکی هر یک از نقطه‌های a، b، c و d چه قدر است؟  
(پتانسیل الکتریکی نقطه‌ی e صفر است.)



شکل ۴۳-۶

۵- در مدار شکل ۴۴-۶ پتانسیل الکتریکی نقطه‌های b و d به ترتیب ۱۲V + و ۱۲V - است.

الف) پتانسیل نقطه‌های a و e چه قدر است؟  
ب) ولتاژ دو سر باتری چه قدر است؟



شکل ۴۴-۶

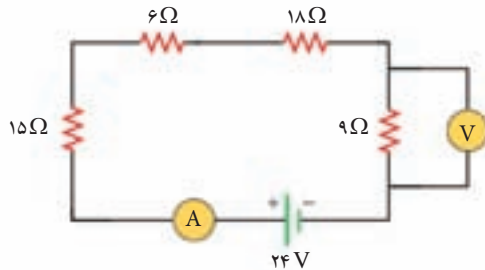
### مسئله‌ها

۱- در مدار شکل ۴۵-۶ مطلوب است:

الف) مقاومت معادل مدار.

ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد.

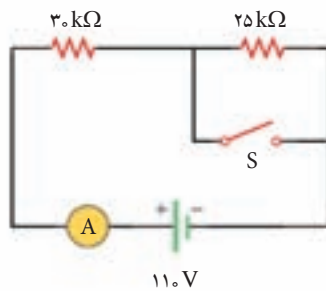
پ) مقداری که ولت‌سنج می‌خواند.



شکل ۴۵-۶

۲- الف) در مدار شکل ۴۶-۶، عددی که آمپرسنج می‌خواند چه قدر است؟

ب) اگر کلید S بسته شود، آمپرسنج چه عددی را نشان می‌دهد؟

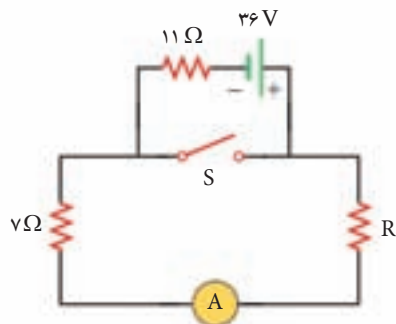


شکل ۴۶-۶

۳- در مدار شکل ۴۷-۶، عددی که آمپرسنج می‌خواند برابر  $5A$  است.

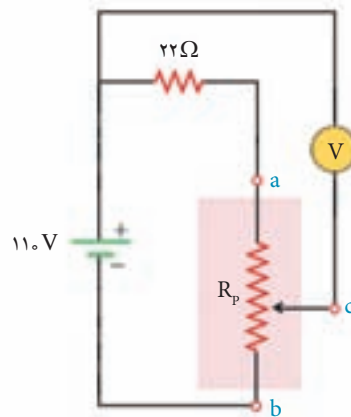
الف) مقاومت R چه قدر است؟

ب) اگر کلید S بسته شود، آمپرسنج چه عددی را نشان می‌دهد؟



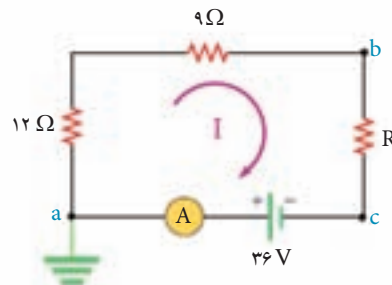
شکل ۴۷-۶

۴- در مدار شکل ۴۸-۶ برای دریافت ولتاژ از ۲۲V تا ۱۱۰V، مقاومت پتانسیومتر  $R_p$  چه قدر باید باشد؟



شکل ۴۸-۶

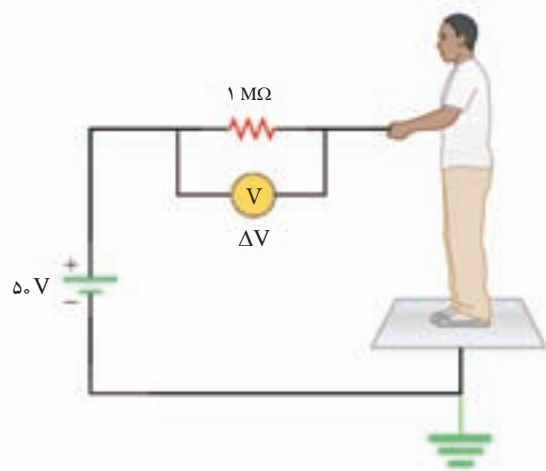
۵- در مدار شکل ۴۹-۶ اگر آمپر سنج مقدار  $\frac{1}{3}A$  را نشان دهد، مطلوب است:  
الف) مقاومت  $R$ .  
ب) پتانسیل الکتریکی نقطه‌های  $b$  و  $c$ .



شکل ۴۹-۶

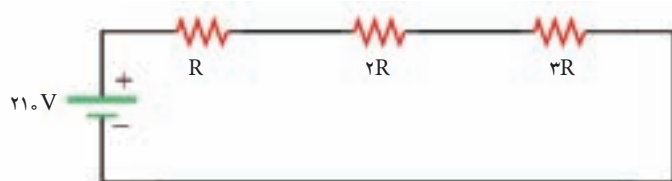
۶- در برخی از حرفه‌ها، پوشیدن کفش‌های با مقاومت الکتریکی مناسب در حین کار لازم است. شکل ۵۰-۶ مدار را نشان می‌دهد که در مؤسسه‌های استاندارد برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی کفش‌های تولیدی استفاده می‌شود. شخصی با پوشیدن کفش، روی صفحه‌ای فلزی که به زمین اتصال دارد می‌ایستد و با دست خود سر سیمی را می‌گیرد تا یک مدار تشکیل شود. اگر ولت‌سنج اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  را دو سر مقاومت  $1M\Omega$  بخواند، نشان دهید مقاومت کفش از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{50V - \Delta V}{\Delta V}$$



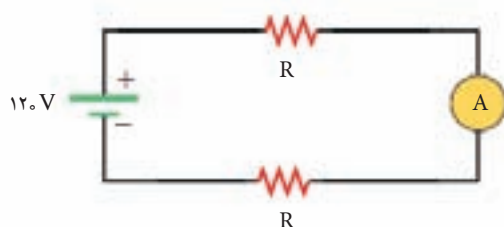
شکل ۵۰-۶

۷- اگر مقاومت  $R = 10\Omega$  باشد، قانون ولتاژ کیرشهف را برای مدار شکل ۵۱-۶ بررسی کنید.



شکل ۵۱-۶

۸- دو مقاومت مشابه  $R = 10k\Omega$  با توان مجاز  $5W$  را به طوری متوالی به یک باتری  $120$  ولتی می‌بندیم (مدار شکل ۵۲-۶). توان مصرفی هر مقاومت و توان تولید شده توسط باتری را حساب کنید.



شکل ۵۲-۶

# مدارهای الکتریکی

## قسمت دوم



هرگاه به درون تلویزیون، رایانه، دستگاه‌های پخش فایل‌های صوتی و تصویری، و یا سایر دستگاه‌های برقی مورد استفاده در زندگی امروزی نگاه کنید مدارهایی را می‌بینید که بسیار پیچیده‌اند. خواه مدار باسیم درست شده باشد و خواه به صورت مدار مجتمع بر تراشه‌های نیم‌رسانا، اغلب شامل تعدادی منبع، مقاومت و اجزای دیگری است که در یک شبکه به هم وصل شده‌اند.

## سپمای فصل هفتم

- ۱-۷ اتصال موازی مقاومت‌ها
- ۲-۷ مقاومت معادل در مدارهای موازی
- ۳-۷ قانون جریان کیرشهف
- ۴-۷ توان مصرفی در مدارهای موازی
- ۵-۷ مدارهای ترکیبی (اتصال‌های متوالی – موازی)
- ارزشیابی فصل هفتم



## هدف‌های آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما فرا می‌گیرید:

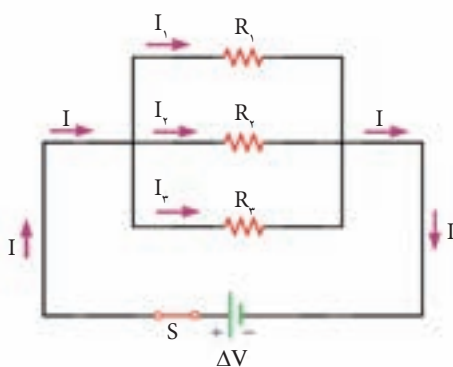
- ویژگی‌های مهم اتصال موازی مقاومت‌ها چیست.
- مقاومت معادل در اتصال موازی چگونه به دست می‌آید.
- قانون جریان کیرشهف چیست و چگونه در مدارهای موازی به کار می‌رود.
- توان مصرفی در مدارهای موازی چگونه محاسبه می‌شود.

## مدارهای الکتریکی (۲)

در قسمت اول مدارهای الکتریکی، با اتصال متوالی مقاومت‌ها و نحوه‌ی محاسبه‌ی مقاومت معادل در مدارهای متوالی آشنا شدیم. همچنین کاربرد قانون ولتاژ کیرشهف را در مدارهای تک حلقه یا متوالی بررسی کردیم. افزون بر این‌ها، با چگونگی پیدا کردن توان مصرفی در مدارهای متوالی آشنا شدیم. در این فصل که موضوع آن همچنان مدارهای الکتریکی است، بحث خود را به مدارهای موازی و مدارهای ترکیبی جریان مستقیم (dc) محدود می‌کنیم. با چگونگی محاسبه‌ی مقاومت معادل و توزیع جریان در مدارهای موازی آشنا خواهیم شد. پس از آن قانون جریان کیرشهف را در مدارهای موازی بررسی خواهیم کرد.

### ۷-۱ اتصال موازی مقاومت‌ها

یک مدار ساده‌ی موازی در شکل ۷-۱ نشان داده شده است. سه مقاومت به طور موازی به یک باتری وصل شده‌اند. عبارت «به طور موازی» به معنی آن است که یک سرِ مقاومت‌ها مستقیماً به یکدیگر و سر دیگر آن‌ها نیز مستقیماً به یکدیگر وصل شده است، و یک اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  به دو سر این مقاومت‌های به هم متصل شده، اعمال شده است. بنابراین هر سه مقاومت دارای اختلاف پتانسیل یکسان  $\Delta V$  در دوسرشان هستند، که موجب برقراری جریانی در هر کدام می‌شود.

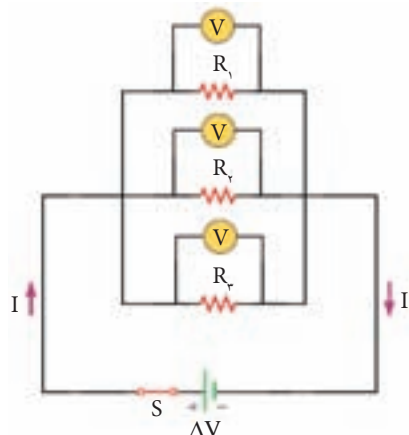


شکل ۷-۱ مدار موازی شامل سه مقاومت. به تمام مقاومت‌ها، ولتاژ یکسانی اعمال می‌شود.



## ● ویژگی‌های مهم اتصال موازی

۱- ولتاژ یا اختلاف پتانسیل دو سر هر مقاومت یکسان است (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷ تمام ولت‌سنج‌ها در مدار موازی، ولتاژ یکسانی را می‌خوانند.

۲- جریان کل مدار بین شاخه‌های موازی تقسیم می‌شود. چون ولتاژ دو سر هر شاخه یکسان است، مقدار جریان در هر شاخه با مقاومت آن نسبت عکس دارد (رابطه‌ی

$$\Delta V = IR$$

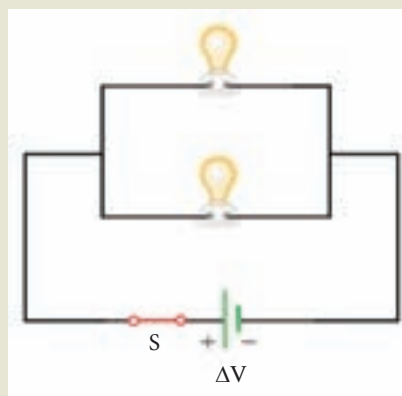
برای هر شاخه جداگانه به کار می‌رود).

۳- جریان کل مدار، مجموع جریان در شاخه‌های موازی آن است ( $I = I_1 + I_2 + I_3$ ).

این مجموع برابر جریان باتری یا هر منبع دیگر ولتاژ است.

### مثال مفهومی ۱-۷

شکل ۳-۷ مداری شامل دو لامپ و باتری را نشان می‌دهد که به طور موازی به یکدیگر بسته شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، آیا لامپ دیگر همچنان روشن می‌ماند؟

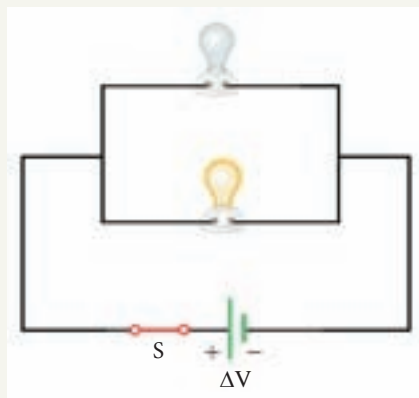


شکل ۳-۷



پاسخ:

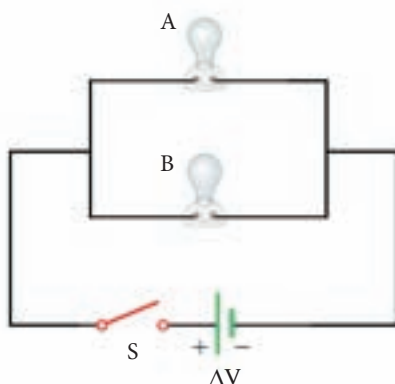
با سوختن یکی از لامپ‌ها، همچنان جریان از لامپ دیگری می‌گذرد و روشن می‌ماند (شکل ۷-۴). به همین دلیل در سیم‌کشی خانه‌ها، از مدارهای موازی استفاده می‌شود.



شکل ۷-۴ با سوختن یکی از لامپ‌ها، لامپ دیگر همچنان روشن می‌ماند.

پرسش ۷-۱

در مدار شکل ۷-۵، مقاومت لامپ A بیش‌تر از مقاومت لامپ B است. پس از بستن کلید S، نور لامپ‌ها را با یکدیگر مقایسه کنید. (راهنمایی: به دومین ویژگی مهم اتصال موازی توجه کنید.)



شکل ۷-۵ دو لامپ با مقاومت‌های متفاوت که به طور موازی به یک باتری بسته شده‌اند.

## ۷-۲ مقاومت معادل در مدارهای موازی

همان‌طور که دیدیم، جریان کل مدار بین شاخه‌های موازی تقسیم می‌شود. به این ترتیب برای مدار شکل ۷-۶ الف می‌توان نوشت:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

چون ولتاژ دو سر هر شاخه یکسان است، با توجه به رابطه  $\Delta V = RI$  داریم:

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

از دو رابطه داریم:

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

اکنون فرض کنید مقاومتی مانند  $R_T$  در اختیار داریم که با ولتاژ  $\Delta V$  به دو سر آن، جریان  $I$  از آن عبور کند (مدار شکل ۶-۷ ب). در این صورت داریم:

$$I = \frac{\Delta V}{R_T}$$

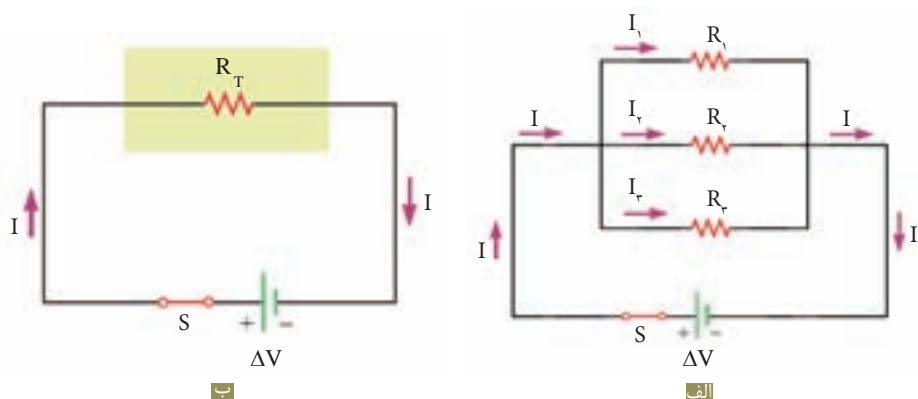
مقایسه‌ی دو رابطه‌ی اخیر، به رابطه‌ی زیر می‌انجامد:

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

یا:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (۷-۱)$$

در این صورت  $R_T$  را مقاومت معادل  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  می‌نامیم.



شکل ۶-۷ (الف) جریان کل مدار بین هر یک از مقاومت‌ها تقسیم می‌شود. (ب)  $R_T$  مقاومت معادل  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  است، زیرا با اعمال ولتاژ  $\Delta V$  به دو سر آن، همان جریان  $I$  از آن می‌گذرد.

اگر بیش از سه مقاومت به طور موازی به یکدیگر وصل شده باشند، مقاومت معادل با تحلیلی مشابه آن‌چه بیان شد از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

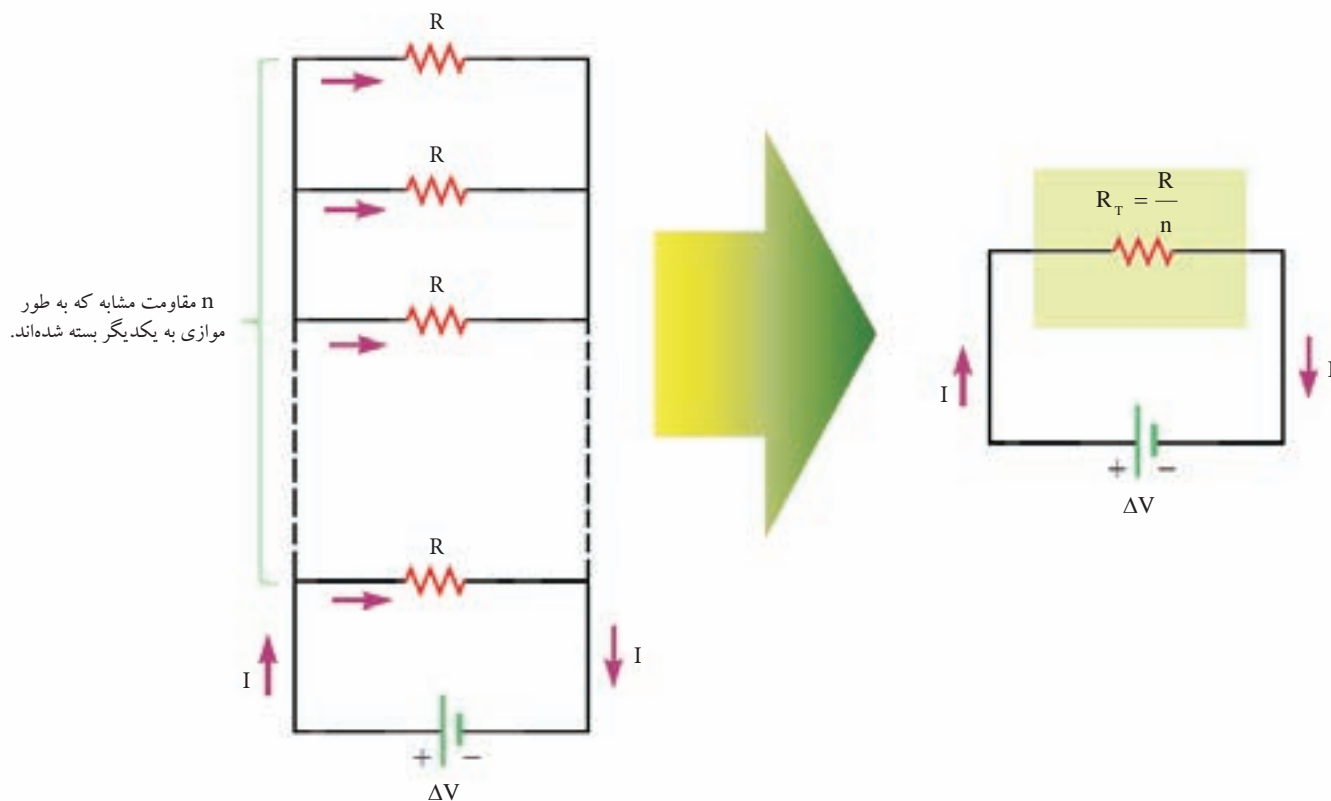
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \dots \quad (۷-۲)$$



برای حالتی که دو مقاومت وجود دارد، مقاومت معادل برابر حاصل ضرب آن دو مقاومت بخش بر مجموع آن‌هاست؛ یعنی:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (۳-۷)$$

در حالت خاصی که  $n$  مقاومت مشابه  $R$  به طور موازی به یکدیگر وصل شده باشند (مدار شکل ۷-۷)، مقاومت معادل از رابطه‌ی  $R_T = \frac{R}{n}$  به دست می‌آید.

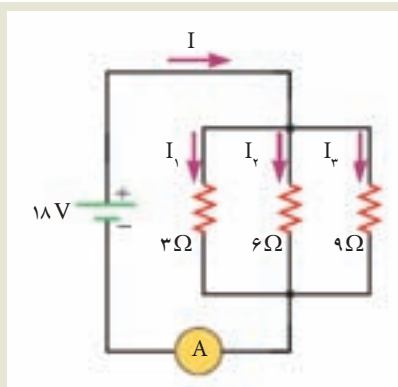


شکل ۷-۷ تعداد  $n$  مقاومت مشابه  $R$  که به طور موازی وصل شده‌اند. جریان عبوری از هر مقاومت یکسان و برابر  $\frac{I}{n}$  می‌گذرد.



- اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در مدارهای موازی
- اندازه‌گیری جریان در مدارهای موازی

**توجه:** هرگاه دو یا چند مقاومت به طور موازی به هم وصل شوند، مقاومت معادل آن‌ها کوچک‌تر از هر یک از مقاومت‌های موجود در آن ترکیب می‌شود.



شکل ۸-۷

در مدار شکل ۷-۸ مقاومت‌ها به طور موازی بسته شده‌اند.

الف) مقاومت معادل مدار را پیدا کنید.

ب) جریان را در هر مقاومت به دست آورید.

پ) آمپرسنج چه جریانی را می‌خواند؟

حل:

با استفاده از رابطه‌ی ۷-۱ داریم:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{3\Omega} + \frac{1}{6\Omega} + \frac{1}{9\Omega} = \frac{11}{18\Omega} \Rightarrow R_T = \frac{18\Omega}{11} = 1/64\Omega$$

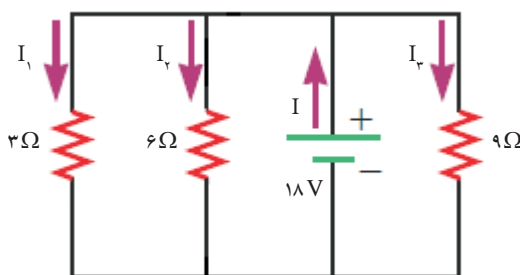
ب) با استفاده از رابطه‌ی  $\Delta V = RI$ ، جریان عبوری از هر مقاومت برابر است با:

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{18V}{3\Omega} = 6A, \quad I_2 = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{18V}{6\Omega} = 3A, \quad I_3 = \frac{\Delta V}{R_3} = \frac{18V}{9\Omega} = 2A$$

پ) عددی که آمپرسنج می‌خواند برابر است با:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 6A + 3A + 2A = 11A$$

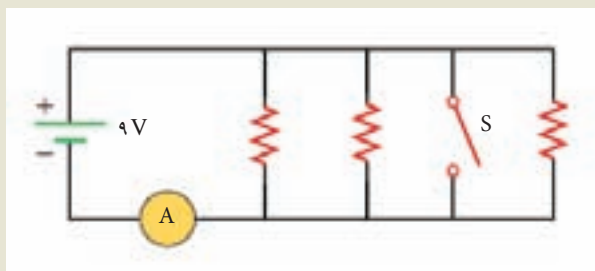
مقاومت معادل و جریان عبوری از مقاومت‌ها در مدار شکل ۷-۹، چه تفاوتی با مدار شکل ۸-۷ در مثال ۷-۲ دارد؟



شکل ۹-۷

### مثال ۳-۷

در مدار شکل ۷-۱۰ همه‌ی مقاومت مشابه و مقدار هر کدام برابر آمپرسنج می‌خواند به وجود می‌آید؟



شکل ۷-۱۰

**حل:**

پیش از بستن کلید S، مقاومت معادل برابر با:

$$R_T = \frac{R}{3} = \frac{3\Omega}{3} = 1\Omega$$

بنابراین جریانی که آمپرسنج در این حالت می‌خواند با توجه به رابطه‌ی  $\Delta V = RI$  برابر است با:

$$9V = (1\Omega)I_1 \Rightarrow I_1 = 9A$$

پس از بستن کلید S، دو سر آخرین مقاومت اتصال کوتاه شده و از مدار خارج می‌شود. بنابراین مقاومت معادل در این حالت

$$R_T = \frac{R}{2} = \frac{3\Omega}{2} = 1.5\Omega$$

برابر است با:

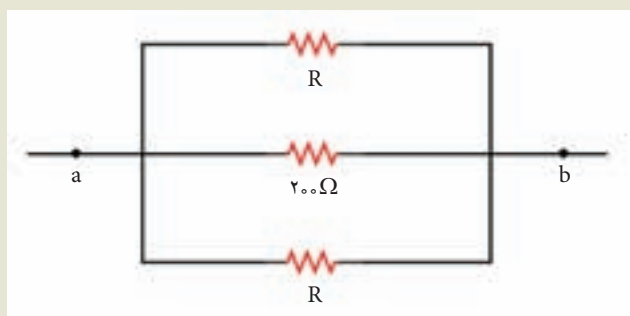
جریانی که آمپرسنج در این حالت می‌خواند برابر است با:

$$9V = (1.5\Omega)I_2 \Rightarrow I_2 = 6A$$

به این ترتیب با بستن کلید S، جریانی که آمپرسنج می‌خواند از ۹A، به اندازه‌ی ۳A کاهش می‌یابد و به مقدار ۶A می‌رسد. این مثال ساده نشان می‌دهد که هر چه تعداد لامپ‌های بیش‌تری را در خانه روشن کنیم جریان بیش‌تری از کنتور کشیده می‌شود و برعکس با خاموش کردن لامپ‌های غیر ضروری، جریان کم‌تری از کنتور دریافت می‌شود.

### مثال ۴-۷

شکل ۷-۱۱ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. اگر مقاومت معادل بین دو نقطه‌ی a و b برابر  $75\Omega$  باشد، مقدار مقاومت R چه قدر است؟



شکل ۷-۱۱

حل:

چون سه مقاومت موازی اند، از رابطه ی ۷-۱ داریم:

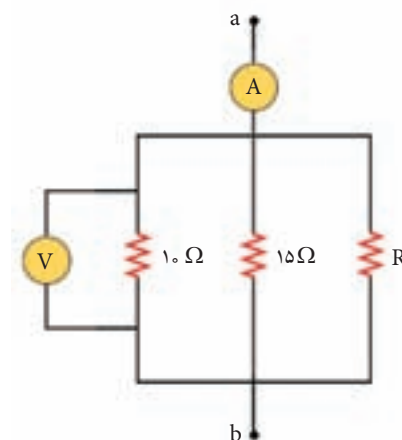
$$\frac{1}{75\Omega} = \frac{1}{R} + \frac{1}{200\Omega} + \frac{1}{R} = \frac{400\Omega + R}{(200\Omega)R}$$

یا:

$$(200\Omega)R = (75\Omega)(400\Omega + R) \Rightarrow (125\Omega)R = (75\Omega)(400\Omega) \Rightarrow R = 240\Omega$$

### تمرین ۷-۱

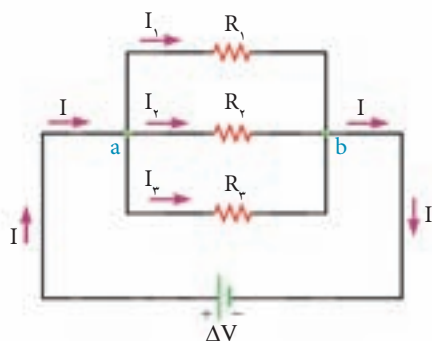
شکل ۷-۱۲ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می دهد. اگر ولت سنج و آمپر سنج به ترتیب عدد های ۸۷، ۲A را بخوانند:  
(الف) مقاومت R چه قدر است؟  
(ب) چه جریانی از هر کدام از مقاومت ها می گذرد؟



شکل ۷-۱۲

### ۷-۳ قانون جریان کیرشهف

پیش از بیان قانون جریان کیرشهف، ابتدا لازم است با اصطلاح **نقطه ی گره** یا **نقطه ی انشعاب** آشنا شویم. در یک مدار به نقطه ای که در آن سرهای سه سیم رسانا یا بیش تر به هم می رسند، نقطه ی گره یا نقطه ی انشعاب گفته می شود. هر کدام از نقطه های a و b در مدار شکل ۷-۱۳ یک نقطه ی انشعاب هستند.



شکل ۷-۱۳

قانون جریان کیرشهف (یا قاعده ی انشعاب کیرشهف) می گوید مجموع جریان های ورودی ( $I_{in}$ ) به هر نقطه ی گره باید با مجموع جریان خروجی ( $I_{out}$ ) از آن برابر باشد. شکل ۷-۱۴ جریان های ورودی و خروجی به یک نقطه ی گره را نشان می دهد. بنابر قانون جریان کیرشهف می توان نوشت:

## شبیه‌سازی



- جریان و ولتاژ در مدارهای موازی

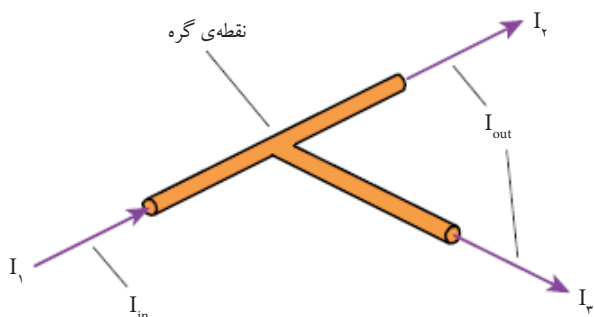
## بیش‌تر بدانید



- آشنایی با صفحه‌های لمسی

$$I_1 = I_v + I_r$$

جریان ورودی ( $I_{in}$ )      جریان‌های خروجی ( $I_{out}$ )



شکل ۷-۱۴ کاربرد قانون جریان کیرشهف برای یک نقطه‌ی گره ( $I = I_v + I_r$ ).

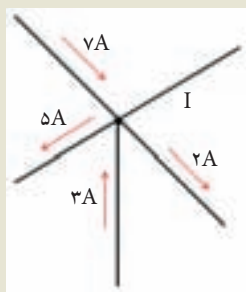
رابطه‌ی بالا را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$I_1 - I_v - I_r = 0$$

به این ترتیب قانون جریان کیرشهف را به صورت دیگری نیز می‌توان بیان کرد.

یعنی: جمع جبری جریان‌ها در یک گره صفر است.

## مثال ۷-۵



شکل ۷-۱۵

شکل ۷-۱۵ بخشی از یک مدار را نشان می‌دهد. بزرگی و جهت جریان  $I$  در سیم بالا سمت راست

چيست؟

**حل:**

با توجه به شکل، جریان‌های ورودی برابرند با:

$$I_{in} = 7A + 3A = 10A$$

همچنین جریان‌های خروجی برابرند با:

$$I_{out} = 5A + 2A = 7A$$

از آن‌جا که بنا به قانون جریان کیرشهف باید جریان‌ها ورودی و خروجی برابر باشند، جهت جریان  $I$  باید خروجی باشد تا

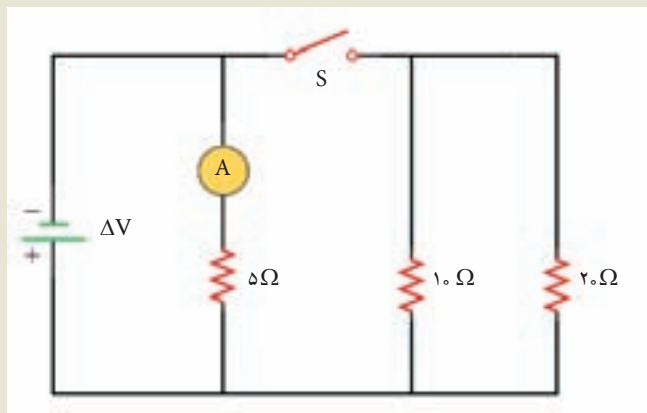
بتوان نوشت:

$$7A + I = 10A \Rightarrow I = 3A$$





جریانی که آمپرسنج مدار شکل ۷-۱۸ می‌خواند به باز یا بسته بودن کلید S بستگی ندارد و همواره برابر  $2A$  است.  
 الف) توان مصرفی در مقاومت  $5$  اهمی و توان تولید شده توسط باتری چه قدر است؟  
 ب) وقتی کلید S بسته می‌شود، توان مصرفی کل در مقاومت‌ها را به دست آورید و با توان تولیدی باتری مقایسه کنید.



شکل ۷-۱۸

حل:

الف) با توجه به این که جریان  $2A$  از مقاومت  $5$  اهمی می‌گذرد، توان مصرف شده در این مقاومت برابر است با:

$$P = RI^2 = (5\Omega)(2A)^2 = 20W$$

ولتاژ دو سر باتری برابر است با:

$$\Delta V = (5\Omega)(2A) = 10V$$

به این ترتیب توان تولیدی باتری برابر است با:

$$P = I\Delta V = (2A)(10V) = 20W$$

همان‌طور که دیده می‌شود توان تولیدی باتری با توان مصرف شده در مقاومت  $5$  اهمی یکسان است.

ب) با بسته شدن کلید S، ولتاژ دو سر باتری به هر یک از مقاومت‌های موازی  $10$  و  $20$  اهمی نیز اعمال می‌شود. به این ترتیب توان مصرفی در هر مقاومت برابر است با:

مقاومت  $5$  اهمی:  $P_1 = 20W$

مقاومت  $10$  اهمی:  $P_2 = \frac{\Delta V^2}{R} = \frac{(10V)^2}{10\Omega} = 10W$

مقاومت  $20$  اهمی:  $P_3 = \frac{\Delta V^2}{R} = \frac{(10V)^2}{20\Omega} = 5W$

به این ترتیب توان مصرفی کل توسط مقاومت‌ها برابر است با:

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 = 20\text{ W} + 10\text{ W} + 5\text{ W} = 35\text{ W}$$

برای به دست آوردن توان تولیدی باتری، ابتدا مقاومت معادل مدار را به دست می‌آوریم:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{5\Omega} + \frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{20\Omega} = \frac{7}{20\Omega} \Rightarrow R_T = \frac{20}{7}\Omega$$

پس توان تولیدی باتری برابر است با:

$$P = \frac{\Delta V^2}{R_T} = \frac{(10\text{ V})^2}{(\frac{20}{7}\Omega)} = 35\text{ W}$$

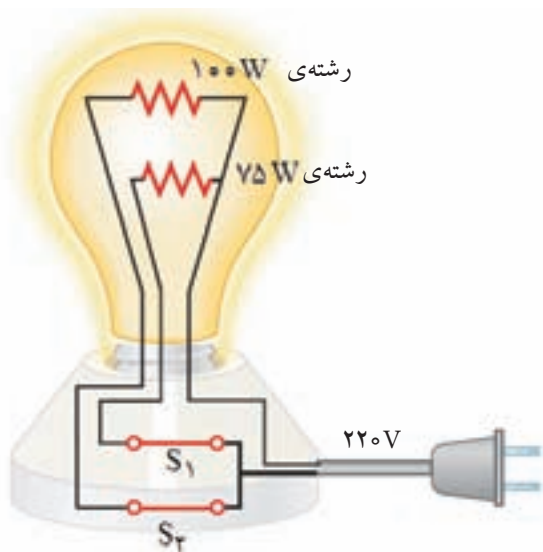
در این حالت نیز توان تولیدی باتری برابر مجموع توانی است که در مقاومت‌ها مصرف می‌شود.

### تمرین ۳-۷

شکل ۷-۱۹ یک لامپ رشته‌ای را نشان می‌دهد که توان مصرفی آن می‌تواند تا ۱۷۵ W برسد.

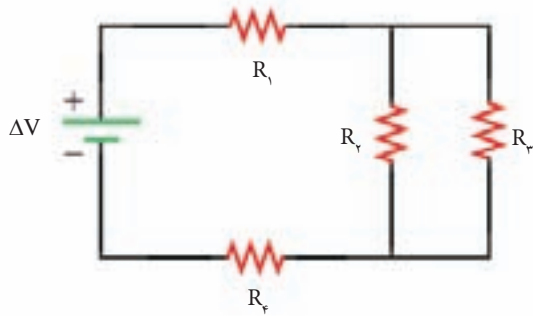
الف) اگر فقط کلید  $S_2$  باز باشد، توان مصرفی لامپ چه قدر است؟

ب) اگر فقط کلید  $S_1$  باز باشد، چه جریانی از منبع تغذیه کشیده می‌شود و توان تولیدی منبع تغذیه چه قدر است؟



شکل ۷-۱۹

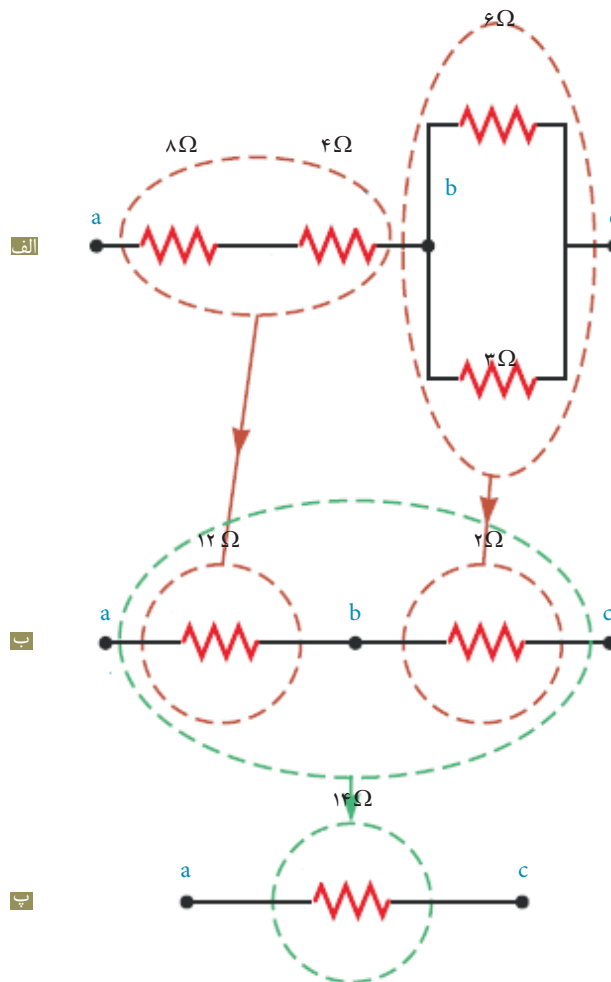
## ۵-۷ مدارای ترکیبی (اتصال‌های متوالی - موازی)



شکل ۷-۲۰ مدار ترکیبی از اتصال‌های متوالی و موازی

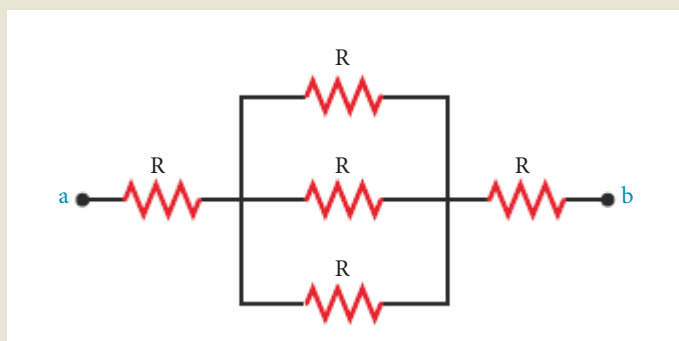
بیشتر مدارهایی که به طور عملی با آن مواجهیم، مدارهای ترکیبی هستند که از اتصال‌های متوالی و موازی تشکیل شده‌اند. شکل ۷-۲۰ یک مدار ترکیبی از اتصال‌های متوالی و موازی را نشان می‌دهد که حل مسائل مربوط به این مدارها، همچنان از قانون‌های حاکم بر مدارهای متوالی و موازی پیروی می‌کند.

برای مثال، نحوه پیدا کردن مقاومت معادل بین دو نقطه‌ی  $a$  و  $c$  در بخشی از یک مدار ترکیبی، در شکل ۷-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۷-۲۱ گام‌های طی شده برای پیدا کردن مقاومت معادل بین دو نقطه‌ی  $a$  و  $c$

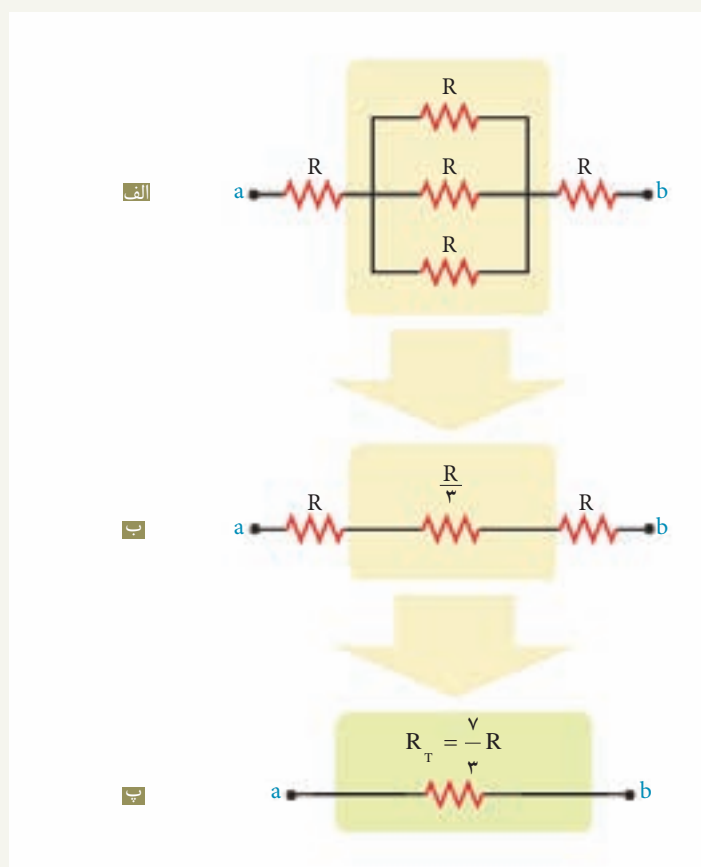
شکل ۷-۲۲ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. مقاومت معادل بین دو نقطه‌ی a و b چه قدر است؟



شکل ۷-۲۲

حل:

چگونگی پیدا کردن مقاومت معادل در دو مرحله‌ی ب و پ در شکل ۷-۲۳ نشان داده شده است.

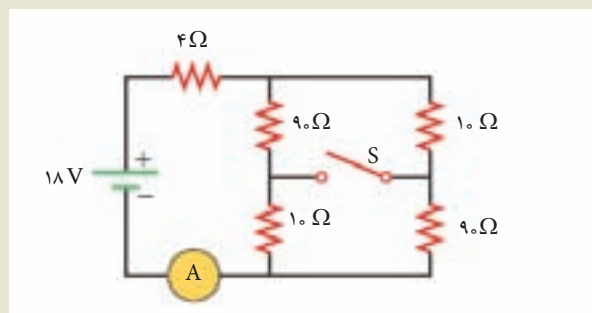


شکل ۷-۲۳

در مدار شکل ۲۴-۷ جریانی را که آمپرسنج می‌خواند در دو حالت زیر پیدا کنید.

الف) کلید S باز است.

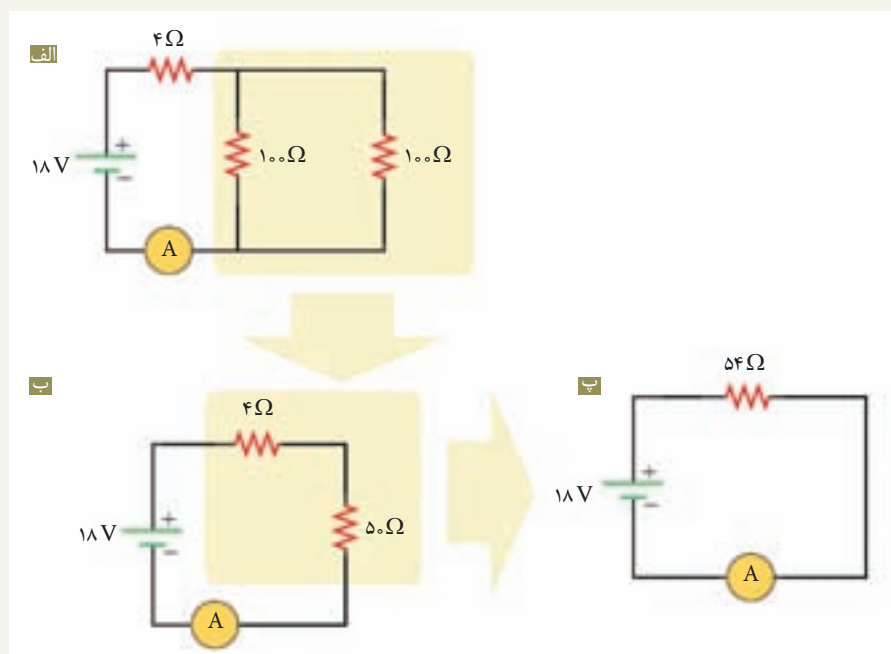
ب) کلید S بسته است.



شکل ۲۴-۷

حل:

الف) وقتی کلید S باز است، مدار شکل ۲۴-۷ به صورت مدار شکل ۲۵-۷ ساده می‌شود.

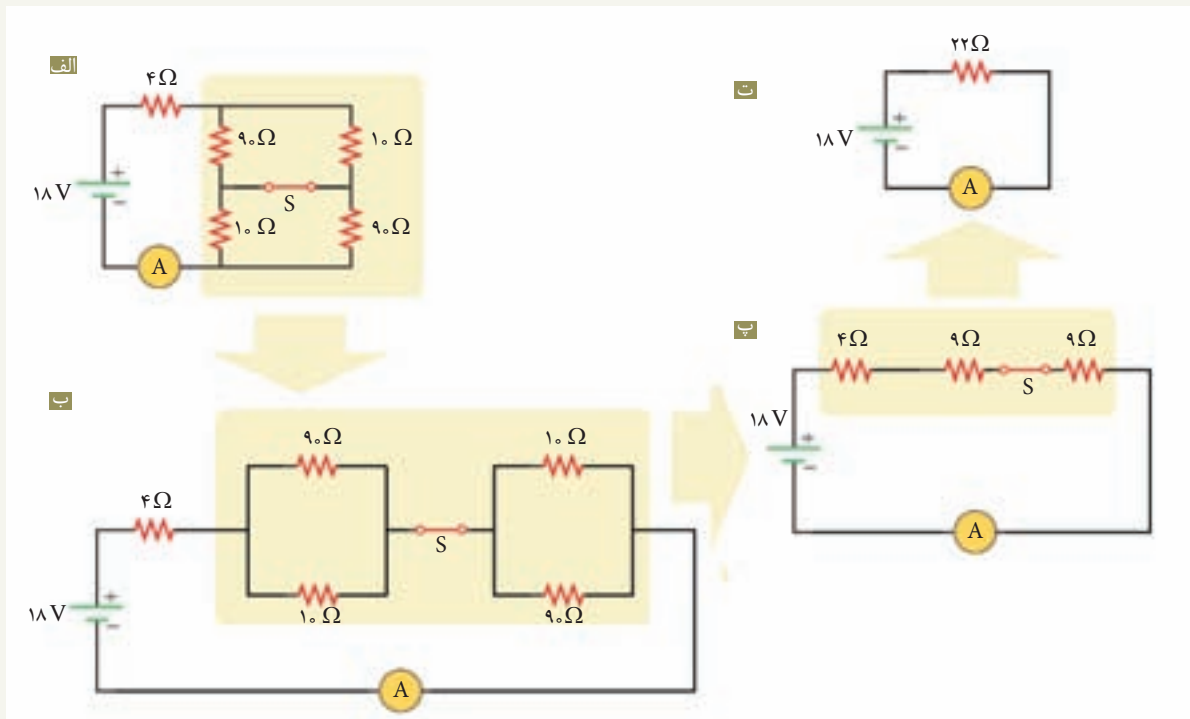


شکل ۲۵-۷

به این ترتیب جریانی که آمپرسنج در این حالت می‌خواند با استفاده از رابطه‌ی  $\Delta V = RI$  برابر است با:

$$I = \frac{18V}{54\Omega} = \frac{1}{3} A$$

ب) وقتی کلید S بسته است، مدار شکل ۲۴-۷ به صورت مدار شکل ۲۶-۷ ساده می شود.

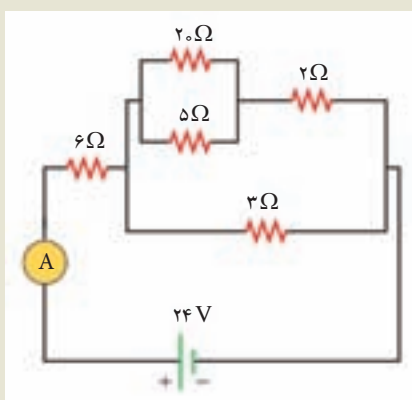


شکل ۲۶-۷

به این ترتیب با توجه به شکل ت و همچنین رابطه ی  $\Delta V = RI$ ، جریانی را که آمپرسنج در این حالت می خواند برابر است با:

$$I = \frac{18V}{22\Omega} = \frac{9}{11} A$$

#### مثال ۱۰-۷



شکل ۲۷-۷

در مدار شکل ۲۷-۷ مطلوب است:

الف) جریانی که آمپرسنج می خواند.

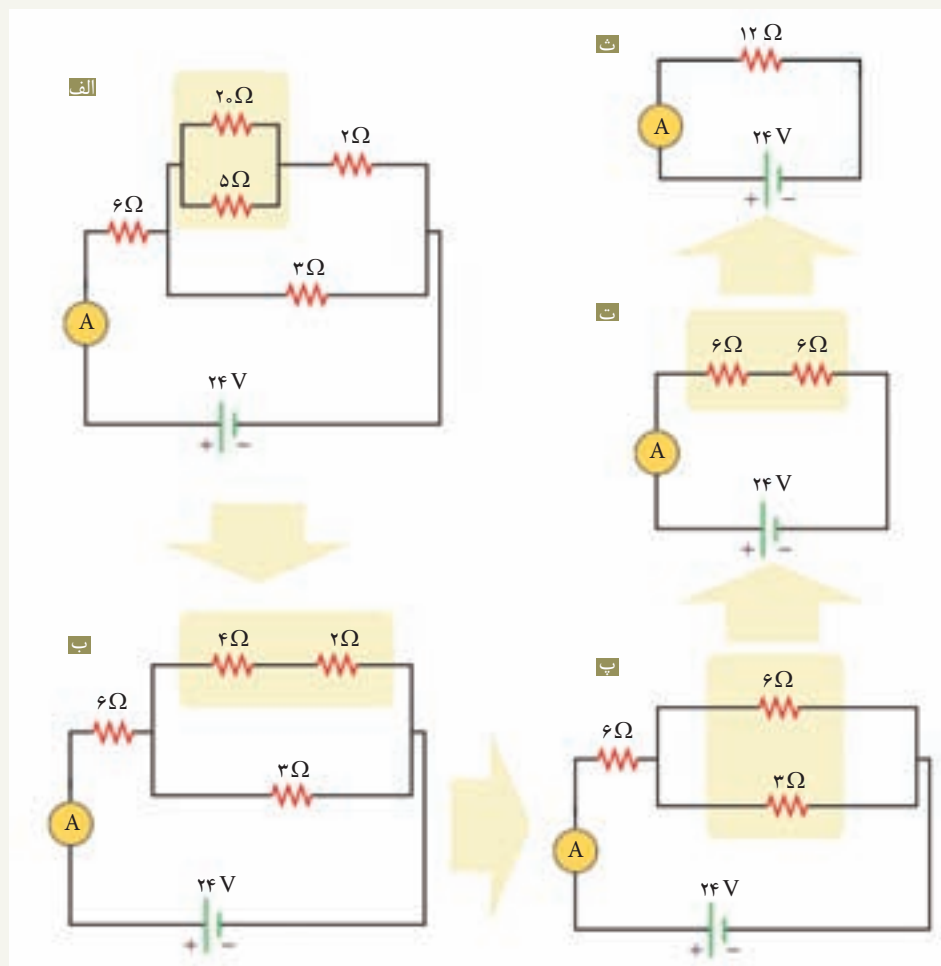
ب) توان مصرف شده در مقاومت ۶ اهمی.

پ) توان تولیدی در باتری.

حل:

الف) ابتدا مقاومت معادل مدار را مطابق گام‌های نشان داده شده در شکل ۲۸-۷ پیدا می‌کنیم. با توجه به شکل ۲۸-۷ ث، مقاومت معادل ۱۲ اهم است. به این ترتیب جریانی که آمپرسنج می‌خواند برابر است با:

$$I = \frac{24V}{12\Omega} = 2A$$



شکل ۲۸-۷

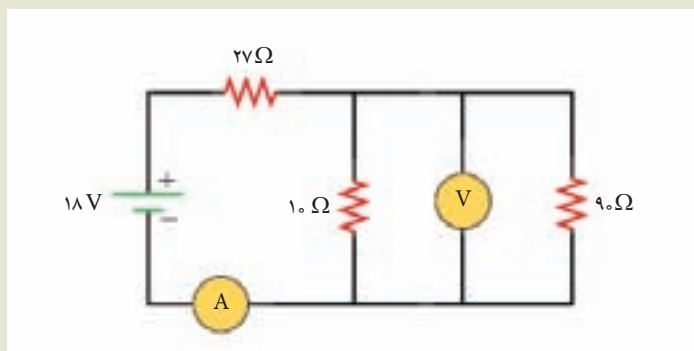
ب) جریانی که از مقاومت ۶ اهمی در مدار شکل ۲۷-۷ می‌گذرد، همان جریانی است که از آمپرسنج می‌گذرد. پس توان مصرف شده در این مقاومت برابر است با:

$$P = RI' = (6\Omega)(2A)^2 = 24W$$

پ) توان تولیدی مولد، با توجه به این که مقاومت معادل مدار ۱۲Ω به دست آمد، برابر است با:

$$P = R_T I'^2 = (12\Omega)(2A)^2 = 48W$$

در مدار شکل ۷-۲۹ مطلوب است:  
 الف) جریانی که آمپرسنج می‌خواند.  
 ب) افت ولتاژ دو سر هر یک از مقاومت‌ها.  
 پ) جریانی که از مقاومت ۱۰ اهمی می‌گذرد.

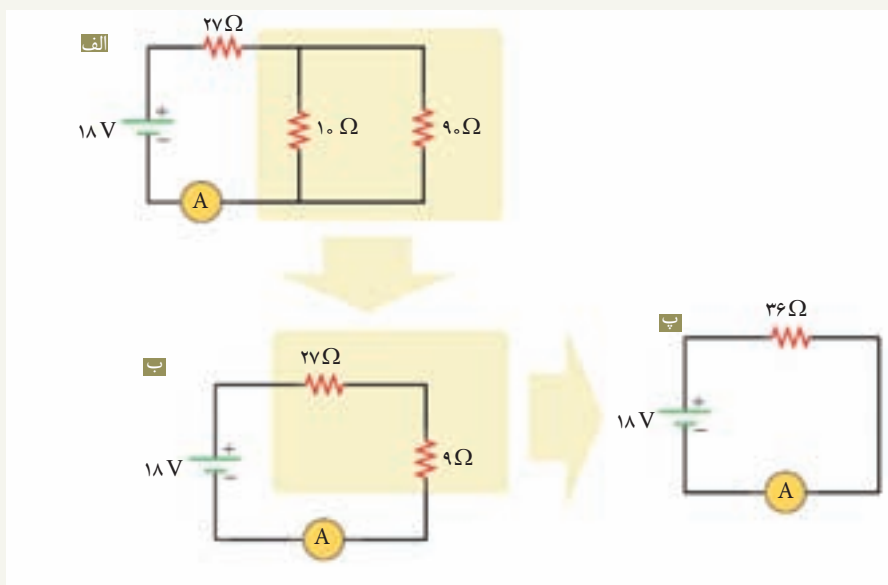


شکل ۷-۲۹

حل:

الف) مقاومت معادل مدار بنا بر گام‌های نشان داده شده در شکل ۷-۳۰ برابر ۳۶ اهم است. در این مرحله ولت‌سنج را از مدار خارج کرده‌ایم. به این ترتیب جریان عبوری از آمپرسنج برابر است با:

$$I = \frac{18V}{36\Omega} = 0.5A$$



شکل ۷-۳۰



ب) با توجه به رابطه  $\Delta V = RI$ ، افت ولتاژ دو سر مقاومت ۲۷ اهمی برابر است با:

$$\Delta V = (27\Omega)(0.5A) = 13.5V$$

چون  $13.5V$  از ولتاژ دو سر باتری، در مقاومت ۲۷ اهمی افت می‌کند، بقیه ولتاژ باتری دو سر مقاومت‌های ۱۰ و ۹۰ اهمی افت می‌کند. بنابراین عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد، در واقع افت ولتاژ دو سر هر یک از این مقاومت‌هاست. پس افت ولتاژ دو سر مقاومت‌های ۱۰ و ۹۰ اهمی یکسان و برابر است با:

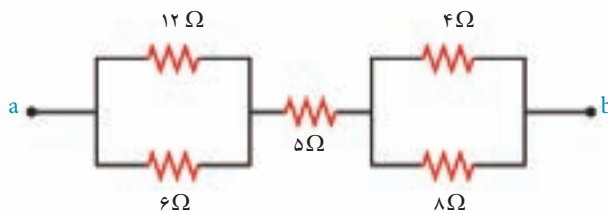
$$\Delta V = 18V - 13.5V = 4.5V$$

پ) با توجه به رابطه  $\Delta V = RI$ ، جریانی که از مقاومت ۱۰ اهمی می‌گذرد برابر است با:

$$I = \frac{4.5V}{10\Omega} = 0.45A$$

#### تمرین ۴-۷

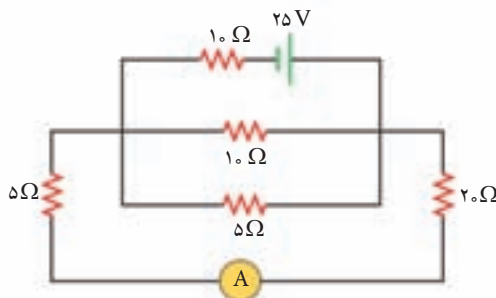
شکل ۷-۳۱ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. مقاومت معادل بین دو نقطه‌ی a و b را پیدا کنید.



شکل ۷-۳۱

#### تمرین ۵-۷

در مدار شکل ۷-۳۲ مطلوب است:  
 الف) جریانی که آمپر سنج می‌خواند.  
 ب) توان تلف شده در هر یک از مقاومت‌ها.  
 پ) توان تولیدی توسط باتری.

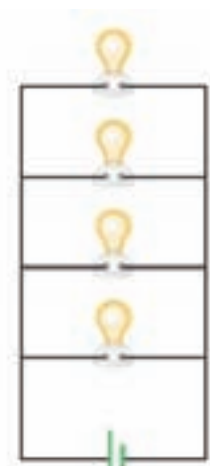


شکل ۷-۳۲



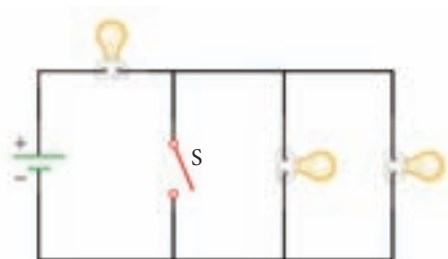
### پرسش‌های مفهومی

- ۱- اگر یکی از لامپ‌های مدار موازی شکل ۳۳-۷ بسوزد، چه اتفاقی برای جریان عبوری از رشته‌ی لامپ‌های دیگر می‌افتد؟



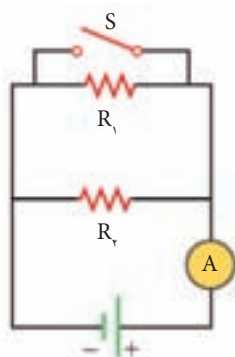
شکل ۳۳-۷

- ۲- در مدار شکل ۳۴-۷ همه‌ی لامپ‌ها مشابه‌اند. با بستن کلید S، چه اتفاقی می‌افتد؟



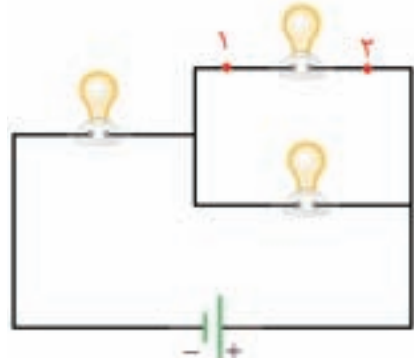
شکل ۳۴-۷

- ۳- با بستن کلید S در مدار شکل ۳۵-۷ جریانی که آمپر سنج می‌خواند چه تغییری می‌کند؟



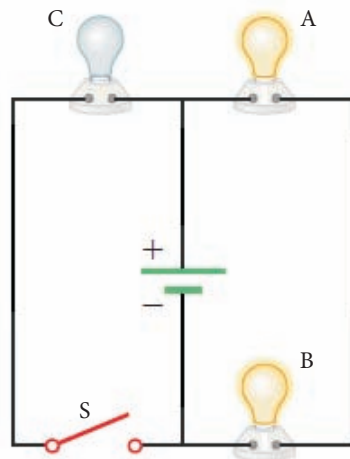
شکل ۳۵-۷

۴- همه‌ی لامپ‌ها در مدار شکل ۳۶-۷ مشابه‌اند. اگر دو نقطه‌ی ۱ و ۲ را توسط سیم بدون مقاومتی به هم وصل کنیم چه تغییری در نور لامپ‌ها رخ می‌دهد؟



شکل ۳۶-۷

۵- با بستن کلید S در مدار شکل ۳۷-۷، چه تغییری در نور هر یک از لامپ‌ها رخ می‌دهد؟



شکل ۳۷-۷

۶- وقتی دو مقاومت یکسان به صورت موازی به هم متصل شوند، کدام یک از موارد زیر برای هر دو مقاومت یکی می‌شود؟

(الف) ولتاژ دو سر آن‌ها،

(ب) توان تلف شده‌ی هر کدام از آن‌ها،

(پ) جریانی که از هر یک می‌گذرد.

اگر مقاومت‌ها با هم فرق داشته باشند، آیا پاسخ شما به موارد بالا تغییر می‌کند،

توضیح دهید.

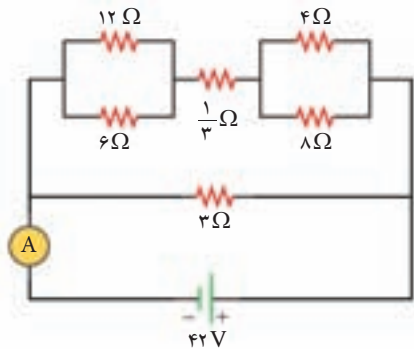
### مسئله‌ها

۱- شکل ۷-۳۸ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. مقاومت معادل بین دو نقطه‌ی a و b را پیدا کنید.

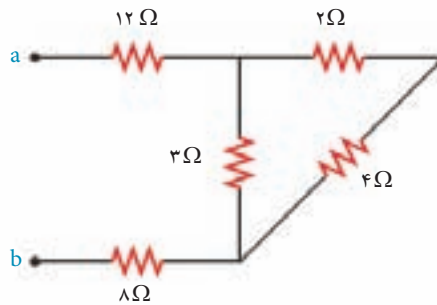
۲- در مدار شکل ۷-۳۹ مطلوب است:

(الف) مقاومت معادل مدار.

(ب) جریانی که آمپرسنج می‌خواند.



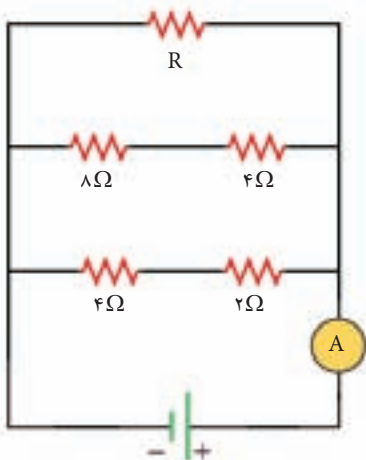
شکل ۷-۳۹



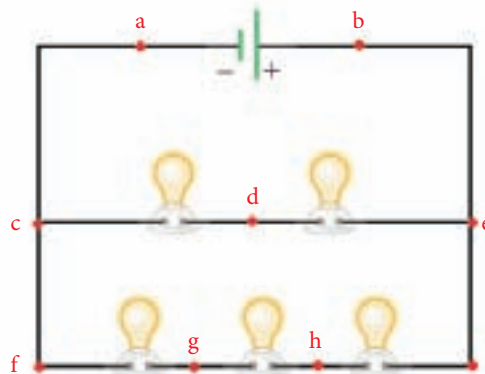
شکل ۷-۳۸

۳- در مدار شکل ۷-۴۰ همه‌ی لامپ‌ها مشابه‌اند و ولت‌سنج اختلاف پتانسیل ab را ۶ ولت می‌خواند. ولت‌سنج اختلاف پتانسیل‌های cd، fg، gh و hi را چند ولت می‌خواند؟

۴- در مدار شکل ۷-۴۱ آمپرسنج جریان ۴A را می‌خواند. مقاومت R چه قدر است؟



شکل ۷-۴۱



شکل ۷-۴۰

۵- در مدار شکل ۴۲-۷ مطلوب است:

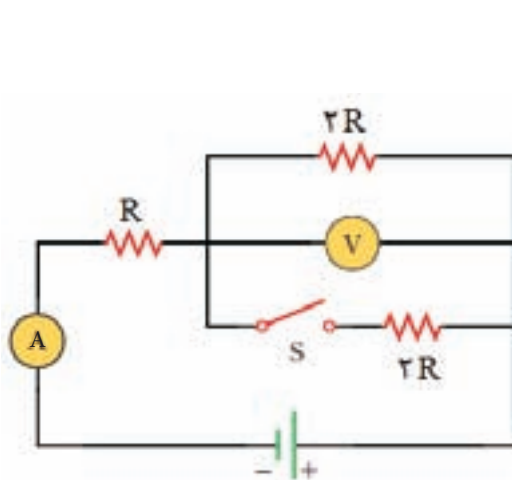
الف) جریانی که آمپرسنج می خواند.

ب) توان کل مصرف شده در مقاومت ها.

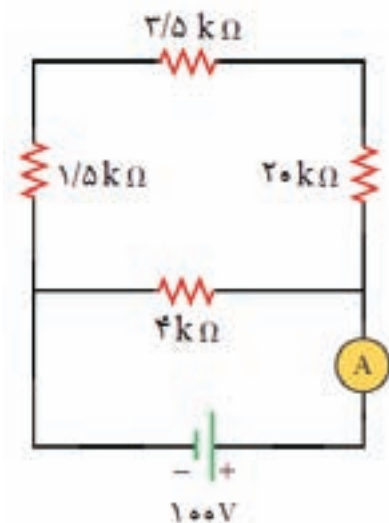
پ) توان تولیدی در باتری.

۶- در مدار شکل ۴۳-۷ ابتدا کلید S باز است. اگر کلید را ببندیم، مقداری که

ولت سنج و آمپرسنج می خوانند چند برابر می شوند؟



شکل ۴۳-۷



شکل ۴۲-۷

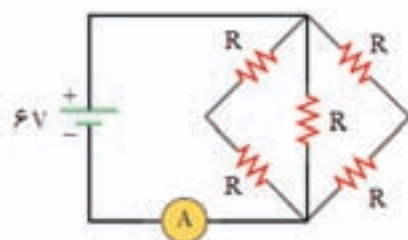
۷- در مدار شکل ۴۴-۷ مطلوب است:

الف) مقاومت معادل مدار.

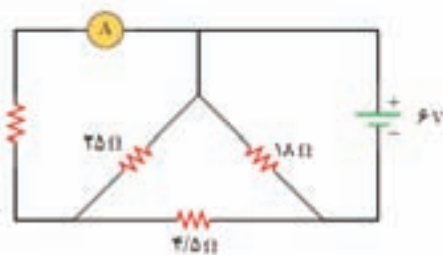
ب) جریانی که آمپرسنج می خواند.

پ) توان مصرف شده در مقاومت ۱۲ اهمی.

۸- در مدار شکل ۴۵-۷ اگر آمپرسنج عدد ۲A را بخواند، مقاومت R چه قدر است؟

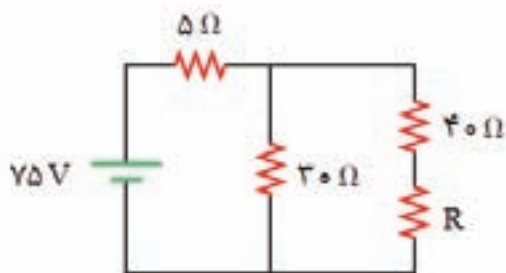


شکل ۴۵-۷



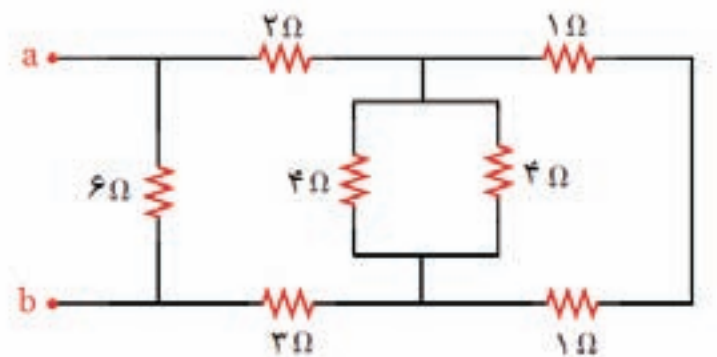
شکل ۴۴-۷

۹- توان مصرف شده در مقاومت  $R$  در مدار شکل ۴۶-۷ برابر ۲۰ وات است. مقدار مقاومت  $R$  را تعیین کنید.



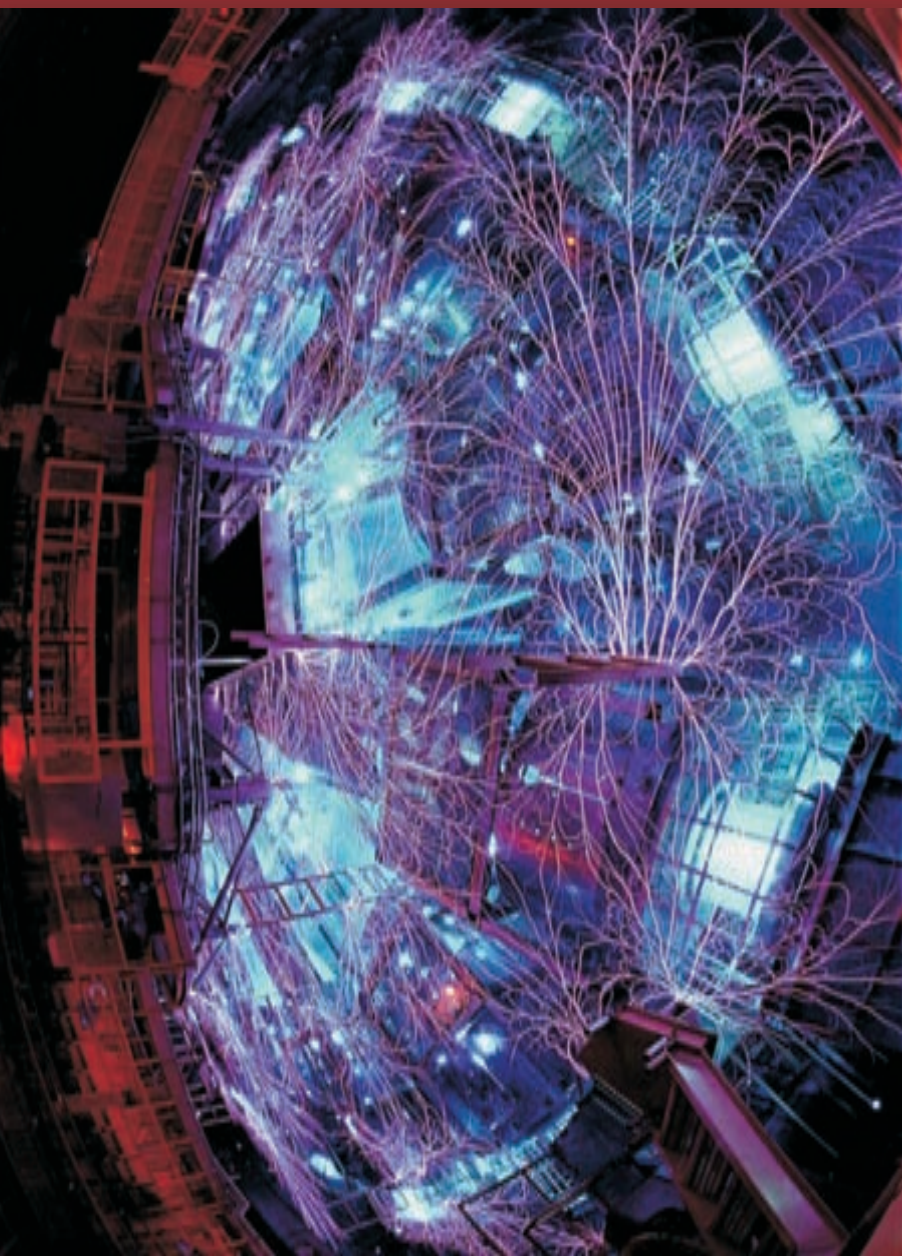
شکل ۴۶-۷

۱۰- الف) شکل ۴۷-۷ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. مقاومت معادل بین دو نقطه‌ی  $a$  و  $b$  چه قدر است؟  
 ب) در صورتی که به دو نقطه‌ی  $a$  و  $b$  اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت اعمال شود، جریان عبوری از مقاومت ۶ اهمی چه قدر است؟



شکل ۴۷-۷

# خازن، ظرفیت و دی الکتریک ها



شکل بالا ماشینی موسوم به ماشین Z را نشان میدهد که در آن با بهره‌گیری از شمار زیادی از خازن‌های موازی، خازن معادل عظیمی ایجاد می‌شود. به همین جهت حتی در اختلاف پتانسیل نه چندان زیاد می‌توان مقدار زیادی انرژی ذخیره کرد. قوس‌های الکتریکی نشان داده شده مربوط به لحظه‌ای است که خازن‌ها در حال تخلیه‌ی انرژی خود به هدفی معین هستند. این امر سبب می‌شود تا هدف تا دمای بالاتر از ۲ میلیارد درجه‌ی سانتی‌گراد گرم شود.

## سیمای فصل هشتم

- ۸-۱ خازن
- ۸-۲ باردار کردن (شارژ) خازن
- ۸-۳ تخلیه‌ی (دشارژ) خازن
- ۸-۴ ظرفیت خازن
- ۸-۵ ظرفیت خازن تخت
- ۸-۶ خازن با دی‌الکتریک
- ۸-۷ ثابت زمانی خازنی
- ۸-۸ انرژی ذخیره شده در خازن
- ۸-۹ اتصال متوالی و موازی خازن‌ها
- ارزشیابی فصل هشتم





## هدف‌های آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما فرا می‌گیرید:

- ماهیت خازن‌ها و ساختمان آن‌ها را شرح دهید.
- چگونگی باردار کردن و تخلیه‌ی خازن را توضیح دهید.
- ظرفیت خازن چیست و نقش دی‌الکتریک در ظرفیت خازن چگونه است.
- عوامل مؤثر در ظرفیت خازن تخت (مسطح) چیست.
- ثابت زمانی چیست و چه نقشی در مداری شامل خازن و مقاومت ایفا می‌کند.
- چگونگی محاسبه‌ی مقدار انرژی ذخیره‌شده در یک خازن.
- شیوه‌های تحلیل خازن‌هایی که به طور مدار متوالی یا موازی به هم متصل شده‌اند.

## ظرفیت و دی‌الکتریک‌ها

یکی از هدف‌های درس مبانی برق، توضیح مبنای علمی وسایل کاربردی است که توسط مهندسان طراحی می‌شود. تمرکز این فصل روی وسیله‌ی بسیار شناخته شده‌ای است که می‌تواند انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند و آن را در زمان کوتاهی آزاد کند. این وسیله خازن نامیده می‌شود که می‌توان آن را به شکل‌های مختلفی ساخت (شکل ۸-۱). در این فصل ضمن آشنایی با ویژگی‌های مختلف خازن، رفتار آن را در مدارهای جریان مستقیم بررسی خواهیم کرد. افزون بر این‌ها با چگونگی به هم بستن خازن‌ها به یکدیگر آشنا خواهیم شد.



شکل ۸-۱ خازن‌های هزاران مورد استفاده‌ی عملی دارند و صنعت برق و الکترونیک عصر حاضر نمی‌تواند بدون آن‌ها وجود داشته باشد. خازن‌ها یکی از اجزای اصلی مدارهای به کار رفته در دستگاه‌هایی از قبیل رادیو، تلویزیون، گوشی تلفن همراه، فلاش دوربین‌های عکاسی، پردازنده‌ی رایانه‌ها، حس‌گرهای کیسه‌ی هوای اتومبیل‌ها و لیزرهای تپی است.

## ۸-۱ خازن

انرژی الکتریکی را می‌توان در وسیله‌ای موسوم به خازن ذخیره کرد که تقریباً در تمام مدارهای الکترونیکی وجود دارند (شکل ۸-۲). خازن به‌عنوان انبار انرژی الکتریکی عمل می‌کند.

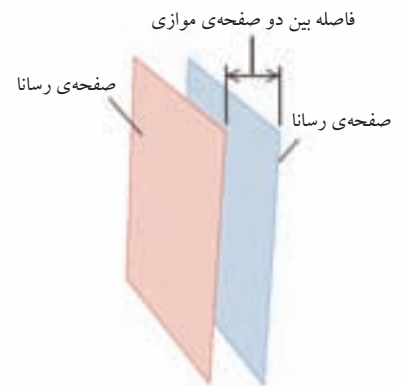
مثلاً باتری یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در فلاش آن ذخیره می‌کند. این انرژی ذخیره شده در مدت بسیار کوتاهی به صورت فوران نوری درخشان در هنگام فلاش زدن دوربین آزاد می‌شود.



شکل ۸-۲ خازن در یک مدار الکترونیکی

رایج‌ترین و ساده‌ترین نوع خازن، که به آن خازن مسطح یا تخت گفته می‌شود از یک جفت صفحه‌ی رسانای موازی تشکیل شده است که در فاصله‌ی اندکی از یکدیگر قرار گرفته‌اند، اما با هم تماس ندارند (شکل ۸-۳).

نمادی که برای نشان دادن یک خازن در مدارهای الکتریکی به کار می‌بریم ( $\parallel$ ) مبتنی بر ساختار یک خازن مسطح است، ولی از آن برای نمایش خازن‌ها با هر شکل هندسی‌ای استفاده می‌شود.

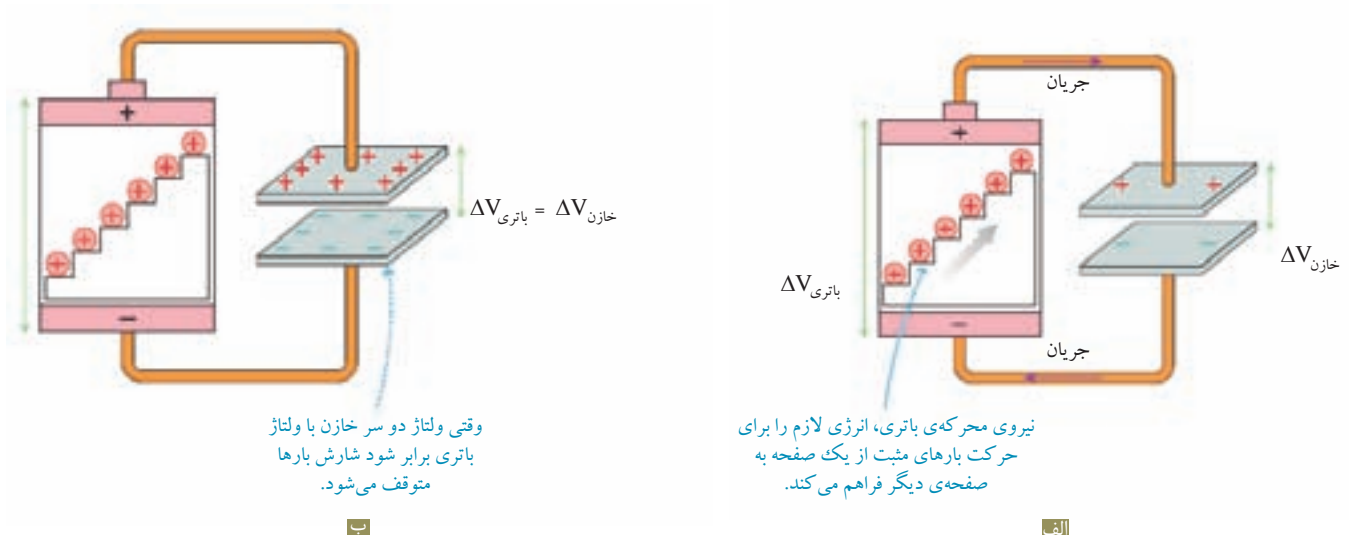


شکل ۸-۳ یک خازن مسطح از دو صفحه‌ی مشابهی رسانا ساخته شده است که به‌طور موازی و به فاصله‌ی اندکی از یکدیگر قرار دارند.

## ۸-۲ باردار کردن (شارژ) خازن

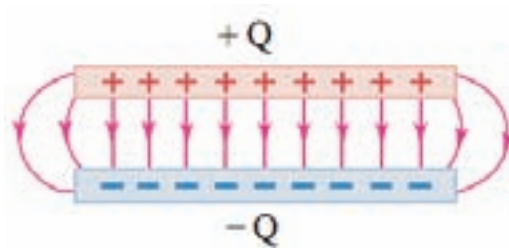
وقتی صفحه‌های یک خازن را به پایانه‌های یک باتری، مانند شکل ۸-۴ الف متصل کنیم، بارهای مثبت توسط باتری از یک صفحه به صفحه‌ی دیگر منتقل و سبب برقرار شدن جریان در مدار می‌شوند. (در اینجا نیز مانند فصل‌های قبل از جهت قراردادی جریان برای توجیه و بررسی موضوع استفاده کرده‌ایم.) در واقع بارهای مثبت توسط

باتری از یک صفحه‌ی خازن به صفحه‌ی دیگر پمپ می‌شوند و این کار تا زمانی ادامه می‌یابد تا ولتاژ دو سر خازن با ولتاژ دو سر باتری برابر شود (شکل ۴-۸ ب). پس از این شارش بارهای مثبت و در نتیجه جریان متوقف و گفته می‌شود که خازن باردار (شارژ) شده است.



شکل ۴-۸ الف) خازن در حال شارژ شدن، در این مرحله ولتاژ دو سر خازن کمتر از ولتاژ باتری است. ب) فرایند شارژ شدن یک خازن وقتی تکمیل می‌شود که ولتاژ دو صفحه‌ی خازن با ولتاژ پایانه‌های باتری برابر باشد.

صفحه‌های خازن دارای بار مساوی و با علامت مخالف‌اند. صفحه‌ی مثبت به پایانه‌ی مثبت باتری و صفحه‌ی منفی به پایانه‌ی منفی آن متصل است. وجود بارهای مساوی  $+Q$  و  $-Q$  روی هر یک از صفحه‌های خازن مسطح، سبب ایجاد میدان الکتریکی یکنواختی در فضای بین دو صفحه می‌شود (شکل ۵-۸). اگر صفحه‌های خازن به اندازه‌ی کافی به هم نزدیک باشند، میدان الکتریکی نایک‌نواخت در لبه‌های خازن را می‌توان نادیده گرفت.



شکل ۵-۸ اگر فاصله‌ی صفحه‌ها در مقایسه با ابعاد آن‌ها کوچک باشد، پیدایش میدان نایک‌نواخت در لبه‌های خازن ناچیز است.

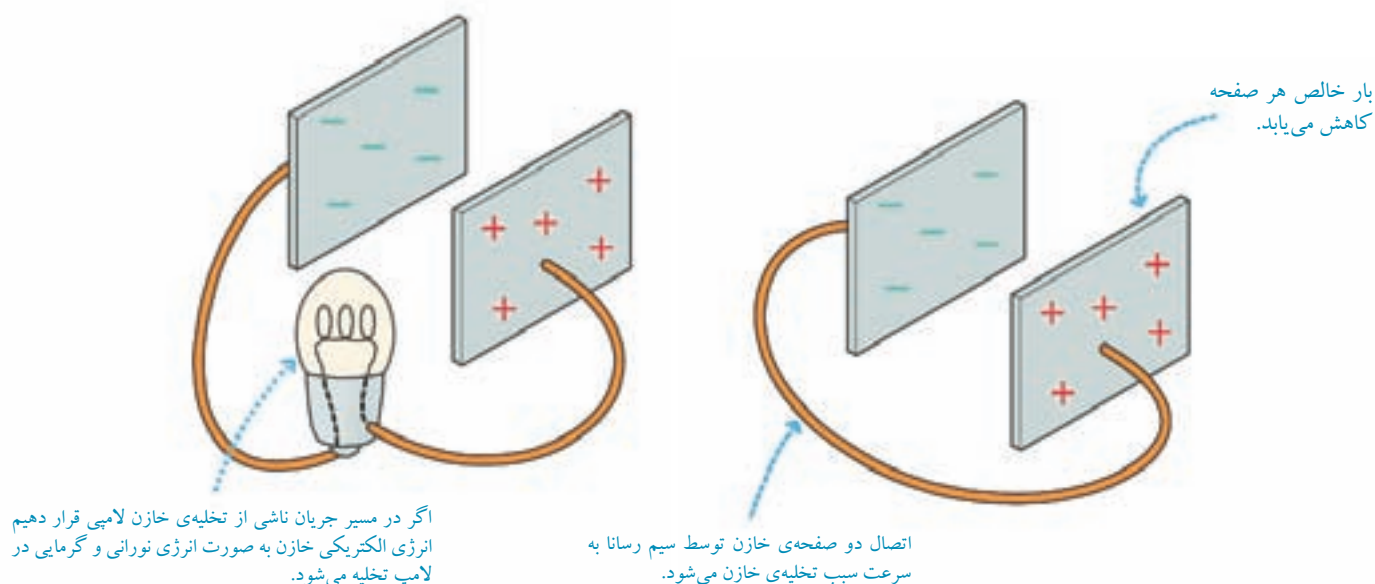
بیش‌تر بدانید



● داستان ساخت اولین خازن

### ۸-۳- تخلیه‌ی (دشارژ) خازن

خازن شارژ شده هنگامی تخلیه می‌شود که مسیر رسانایی بین دو صفحه‌ی آن ایجاد شود (شکل ۸-۶ الف). اگر در مسیر جریان ناشی از تخلیه‌ی خازن مصرف‌کننده‌ای مانند لامپ قرار دهیم، انرژی الکتریکی خازن به صورت انرژی نورانی و گرمایی در لامپ تخلیه می‌شود (شکل ۸-۶ ب).



شکل ۸-۶ (الف) نمایش دشارژ خازن و (ب) انرژی ذخیره شده در خازن در لامپ تخلیه می‌شود.

**توجه:** در صورتی که در مسیر جریان حاصل از تخلیه‌ی خازن قرار بگیرید، ممکن است تجربه‌ای تکان‌دهنده باشد. انتقال انرژی حاصل در صورت زیاد بودن ولتاژ خازن، مانند منبع تغذیه‌ی دستگاه‌های نمایشگر یا تلویزیون، حتی پس از خاموش کردن دستگاه می‌تواند مهلک باشد. این دلیل اصلی علامت‌های هشداردهنده روی این وسیله‌هاست.

#### فعالیت عملی

- ساخت خازن مسطح
- شارژ و دشارژ خازن

### ۸-۴ ظرفیت خازن

شکل ۸-۷ دو رسانای  $a$  و  $b$  را نشان می‌دهد که بزرگی بار آن‌ها یکسان و برابر  $Q$  است. این دو رسانای باردار که به‌طور الکتریکی با یکدیگر در تماس نیستند، تشکیل

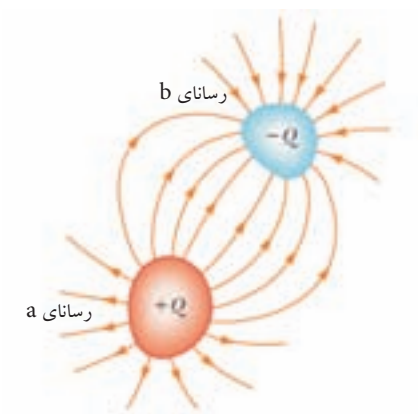
یک خازن می‌دهند. هر خازن، از جمله خازن شکل ۷-۸، دارای ظرفیت معینی است که آن را با نماد  $C$  نمایش می‌دهند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (1-8)$$

که در آن  $\Delta V$  بزرگی اختلاف پتانسیل یا ولتاژ بین دو رساناست. یکای ظرفیت در SI، کولن بر ولت ( $C/V$ ) است که آن را فاراد ( $F$ ) می‌نامند. به این ترتیب:

$$1F = 1 \frac{C}{V}$$

یک فاراد ظرفیت بسیار بزرگی است و مناسب‌ترین واحدهای ظرفیت در بسیاری از کاربردها عبارت‌اند از میکروفاراد ( $1\mu F = 10^{-6} F$ )، نانوفاراد ( $1nF = 10^{-9} F$ ) و پیکوفاراد ( $1pF = 10^{-12} F$ ). برای مثال در فلاش یک دوربین عکاسی، خازنی چند صد میکروفارادی به کار می‌رود در حالی که ظرفیت‌ها در مدار تنظیم رادیو به طور نوعی از  $10$  تا  $100$  پیکوفاراد هستند.



شکل ۷-۸ هر دو رسانای  $a$  و  $b$  که توسط عایقی (مانند هوا) از هم جدا شده باشند یک خازن تشکیل می‌دهند.

بیش‌تر بدانید



● آشنایی با ساختمان خازن‌های مختلف

**توجه:** کمیت‌های  $Q$  و  $\Delta V$  در رابطه‌ی ۱-۸ همواره باید به طور مثبت جای گذاری شوند. همچنین وقتی گفته می‌شود بار خازنی  $Q$  است به معنی این است که صفحه‌ای که پتانسیل الکتریکی آن بیش‌تر است (یعنی به پایانه‌ی مثبت باتری وصل شده است) بار  $+Q$  و صفحه‌ای که پتانسیل الکتریکی آن کم‌تر است بار  $-Q$  دارد.

مثال ۱-۸

دو سر خازنی با ظرفیت  $12pF$  را به پایانه‌های یک باتری  $24$  ولتی وصل می‌کنیم. بار ذخیره شده در خازن پس از شارژ کامل چقدر است؟

**حل:** با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$C = 12pF = 12 \times 10^{-12} F, \Delta V = 24V, Q = ?$$

با بازنویسی رابطه‌ی ۱-۸ به صورت زیر داریم:

$$Q = C \Delta V = (12 \times 10^{-12} F)(24V) = 288 \times 10^{-12} C = 288pC$$

دو جسم فلزی که با یکدیگر در تماس نیستند، دارای بارهای خالص  $+7.0 \text{ nC}$  و  $-7.0 \text{ nC}$  و اختلاف پتانسیل  $100 \text{ V}$  هستند. ظرفیت این سامانه چقدر است؟

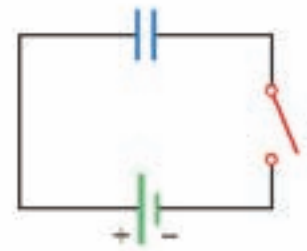
حل:

این سامانه تشکیل خازنی می‌دهد که بار آن  $Q = 7.0 \text{ nC}$  است. به این ترتیب با استفاده از رابطه‌ی ۱-۸ داریم:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{7.0 \times 10^{-9} \text{ C}}{100} = 0.7 \times 10^{-9} \text{ F} = 0.7 \text{ nF}$$

### تمرین ۱-۷

خازن مدار شکل ۸-۸ دارای ظرفیت  $3.0 \mu\text{F}$  و در ابتدا بدون بار است. باتری اختلاف پتانسیل  $120 \text{ V}$  را تأمین می‌کند. مدتی پس از آن که کلید S بسته شود، چقدر بار در خازن ذخیره می‌شود؟



شکل ۸-۸

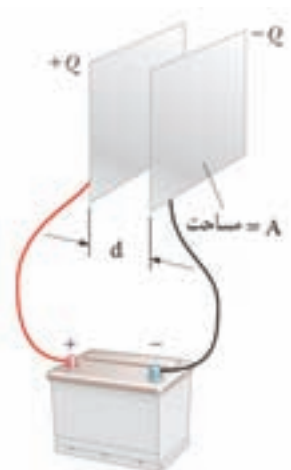
### ۵-۸ ظرفیت خازن تخت

شکل ۹-۸ خازن تختی را نشان می‌دهد که به یک باتری متصل شده و در فضای بین صفحه‌های آن هوا (یا خلأ) وجود دارد. ظرفیت این خازن تنها به عامل‌های هندسی، یعنی مساحت  $A$  هر صفحه و فاصله‌ی جدایی صفحه‌ها  $d$ ، بستگی دارد و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2-8)$$

که در آن  $\epsilon_0$ ، ثابت گذردهی الکتریکی خلأ نامیده می‌شود و مقدار آن بر حسب یکاهای SI برابر است با:

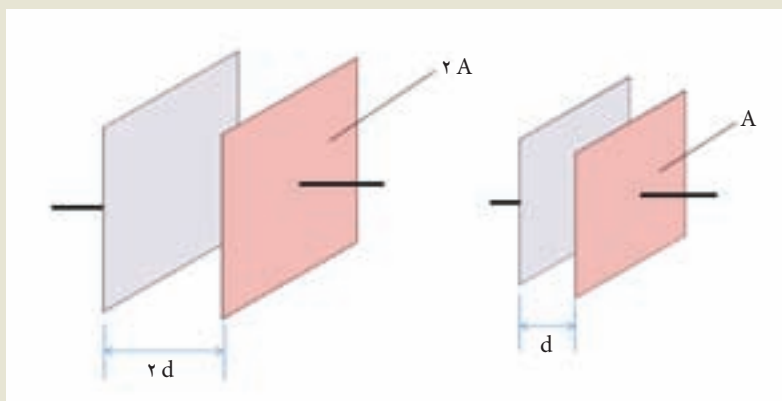
$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 8.85 \text{ pF/m}$$



شکل ۹-۸

ظرفیت خازن تختی که در بین صفحه‌های آن هوا (یا خلأ) قرار دارد تنها به عامل‌های هندسی بستگی دارد. با تغییر هر یک از عامل‌های  $A$  یا  $d$ ، ظرفیت خازن نیز تغییر می‌کند.

شکل ۸-۱۰ دو خازن تخت با مشخصه‌های هندسی متفاوت را نشان می‌دهد که در فضای بین صفحه‌های آن هوا وجود دارد. ظرفیت این خازن‌ها را با هم مقایسه کنید.



ب

الف

شکل ۸-۱۰

پاسخ:

با توجه به رابطه‌ی ۸-۲، ظرفیت خازن الف برابر است با:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

همچنین ظرفیت خازن ب برابر است با:

$$C' = \epsilon_0 \frac{2A}{2d} = \epsilon_0 \frac{A}{d} = C$$

به این ترتیب نتیجه می‌شود با وجود تفاوت در مشخصه‌های هندسی دو خازن، ظرفیت آن‌ها با توجه به آنچه بررسی شد یکسان است.

در نظر داریم خازن تختی به ظرفیت یک فاراد (۱F) بسازیم به طوری که فاصله‌ی بین صفحه‌های آن ۱mm باشد. مساحت هر صفحه‌ی خازن باید چقدر باشد؟ فرض کنید بین صفحه‌های خازن هوا وجود دارد.

حل:

با توجه به داده‌های مسئله و رابطه‌ی ۸-۲ داریم:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$A = \frac{Cd}{\epsilon_0} = \frac{(1F)(1 \times 10^{-3} m)}{8.85 \times 10^{-12} F/m} \\ = 1.1 \times 10^8 m^2$$

که تقریباً با سطح مربعی به ضلع ۱۰ km برابر است!

#### مثال ۸-۵

مساحت هر یک از صفحه‌های خازن مسطحی  $2 m^2$  و فاصله‌ی صفحه‌ها از یکدیگر ۵ mm است. اختلاف پتانسیل ۱۰ کیلوولت به خازن وصل است و بین صفحه‌ها هوا قرار دارد. مطلوب است:

الف) ظرفیت خازن.

ب) بار واقع بر هر صفحه‌ی خازن.

حل:

الف) از رابطه‌ی ۸-۲ داریم:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = \frac{(8.85 \times 10^{-12} F/m)(2 m^2)}{5 \times 10^{-3} m} \\ = 3.54 \times 10^{-9} F = 3.54 nF$$

ب) از رابطه‌ی ۸-۱ داریم:

$$Q = C \Delta V = (3.54 \times 10^{-9} C/V)(1 \times 10^4 V) \\ = 3.54 \times 10^{-5} C = 35.4 \mu C$$

#### تمرین ۸-۲

مساحت هر یک از صفحه‌های خازن مسطحی که به فاصله‌ی ۲ mm از یکدیگر واقع‌اند، برابر  $1200 mm^2$  است. فضای بین صفحه‌ها هواست و اختلاف پتانسیل ۶۴ ولت به صفحه‌ها اعمال می‌شود.

الف) ظرفیت خازن را به دست آورید.

ب) بار ذخیره شده روی هر صفحه‌ی خازن چقدر است؟



## ۸-۶ خازن با دی الکتریک

اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با یک **دی الکتریک** پر کنیم، که ماده‌ای عایق از قبیل روغن، پلاستیک، میکا، کاغذ یا تفلون است، برای ظرفیت آن چه پیش می‌آید؟ مایکل فارادی که کل مفهوم ظرفیت به میزان زیادی مرهون تلاش‌های او است و از همین رویکای SI ظرفیت به اسم او نام‌گذاری شده است، برای نخستین بار در سال ۱۸۳۷ میلادی توجه خود را به این موضوع معطوف کرد. او با انجام آزمایش‌هایی که با وسایل ساده‌ای انجام داد دریافت که ظرفیت یک خازن با ضریب عددی  $\epsilon_r$ ، موسوم به ثابت **دی الکتریک** ماده‌ی عایق، افزایش می‌یابد (شکل ۸-۱۱).



شکل ۸-۱۱ وسایل ساده‌ای که فارادی در سال ۱۸۳۷ میلادی برای بررسی اثر دی الکتریک در ظرفیت خازن‌ها از آن‌ها استفاده کرده است.

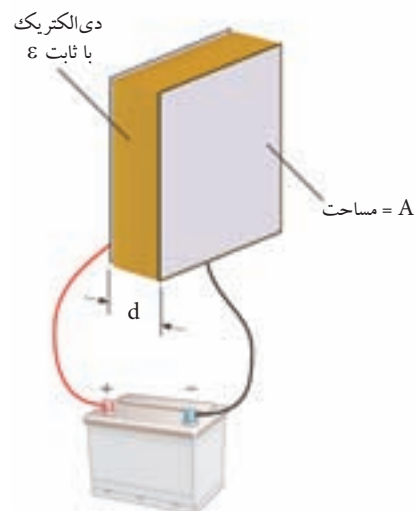
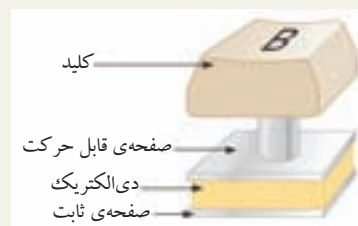
جدول ۸-۱ چند ماده‌ی دی الکتریک و ضریب‌های دی الکتریک آن‌ها را نشان می‌دهد. بنا بر تعریف، ضریب دی الکتریک خلأ برابر با یک است. چون بیش تر هوا، فضای خالی است، ضریب دی الکتریک اندازه‌گیری شده برای هوا تنها اندکی بیش تر از یک است و معمولاً در حل مسئله‌ها مقدار آن را برابر یک در نظر می‌گیریم. اثر دیگر حضور دی الکتریک در خازن، محدود ساختن اختلاف پتانسیلی است که می‌تواند بین صفحه‌های خازن تا مقدار معین  $\Delta V_{\max}$ ، موسوم به ولتاژ فروشکست، اعمال شود. اگر ولتاژ دو سر خازن واقعاً از این مقدار فراتر رود، ماده‌ی دی الکتریک فرو می‌شکند و مسیر رسانایی در بین صفحه‌های خازن تشکیل می‌شود. هر ماده‌ی دی الکتریک دارای مشخصه‌ای موسوم به **قابلیت تحمل دی الکتریک** یا **قدرت دی الکتریک** است، که آن مقدار بیشینه‌ی میدان الکتریکی است که آن ماده می‌تواند بدون فروشکست تحمل کند.

## ستون یاب الکتریکی

بعضی از ابزارهای عملی از شیوه‌ی پاسخ‌گویی خازن به تغییرات ثابت دی الکتریک بهره می‌گیرند. ستون یاب الکتریکی که توسط تعمیرکاران ساختمانی برای یافتن مکان ستون‌های فلزی مخفی درون دیوار به کار می‌رود نمونه‌ای از این ابزارهاست. این ابزار شامل یک صفحه‌ی فلزی همراه با مدارهای وابسته به آن است. این صفحه به‌عنوان نیمی از یک خازن و دیوار به عنوان نیم دیگر آن عمل می‌کند. اگر دستگاه ستون یاب از روی ستون فلزی عبور کند، ثابت دی الکتریک تغییر می‌کند و ظرفیت خازن را تغییر می‌دهد و یک سیگنال (نشانک) فرستاده می‌شود.

### صفحه کلید رایانه

در صفحه کلید رایانه، هر کلید به صفحه‌ای فلزی کوچکی متصل است که نقش یک صفحه از یک خازن با صفحه‌های موازی را ایفا می‌کند (شکل زیر). با فشار دادن کلید، فاصله بین صفحه‌ها کاهش یافته و ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. مدار الکترونیکی این تغییر ظرفیت را آشکار می‌کند و در نتیجه فشار دادن و نوع علامت نوشته شده روی آن را تشخیص می‌دهد.



شکل ۸-۱۲ با قرار گرفتن دی الکتریک بین صفحه‌های یک خازن ظرفیت آن افزایش می‌یابد و میزان افزایش به جنس دی الکتریک بستگی دارد.

در جدول ۸-۱ مقادیر قابلیت تحمل دی الکتریک برای چند ماده‌ی دی الکتریک ارائه شده است. در این کتاب از یکای کیلو ولت بر میلی متر ( $kV/mm$ ) برای این کمیت استفاده شده است.

جدول ۸-۱ چند مشخصه‌ی دی الکتریک‌ها		
قابلیت تحمل دی الکتریک ( $kV/mm$ )	ضریب دی الکتریک ( $\epsilon_r$ ) *	ماده
۳/۱	$1 \approx 1/0.0054$	هوا
۵۹/۱	۲	تفلون
۴۷/۲	۲/۵	کاغذ آغشته به پارافین
۲۴/۱	۲/۶	پلی استیرن
۱۴/۷	۴	روغن
۱۴/۱	۴/۷	پیرکس
۵۹/۱	۵	میکا
۶۳/۰	۷	اکسید آلومینیوم
۷۸/۸	۷/۵	شیشه
۸/۰	۳۱۰	تیتانات استرانسیوم
۳۹/۴	۱۲۰۰	سرامیک

اگر ثابت دی الکتریک ماده‌ای که بین صفحه‌های خازن مسطحی قرار دارد  $\epsilon$  باشد (شکل ۸-۱۲)، در این صورت ظرفیت خازن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (۸-۳)$$

که در آن  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  است. برای مثال اگر ماده‌ی دی الکتریک بین صفحه‌های یک خازن از جنس میکا باشد، در این صورت با توجه به جدول ۸-۱، ثابت دی الکتریک برابر  $\epsilon = 5\epsilon_0$  خواهد بود.

\* در برخی از کتاب‌های درسی ضریب دی الکتریک را با نماد  $K$  نشان می‌دهند.

## آزمایشگاه مجازی



- خازن تخت

## بیش تر بدانید

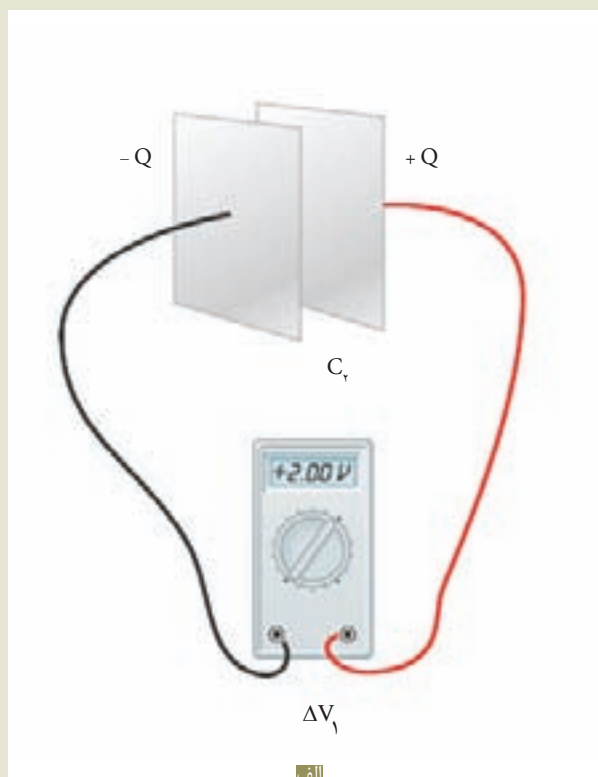
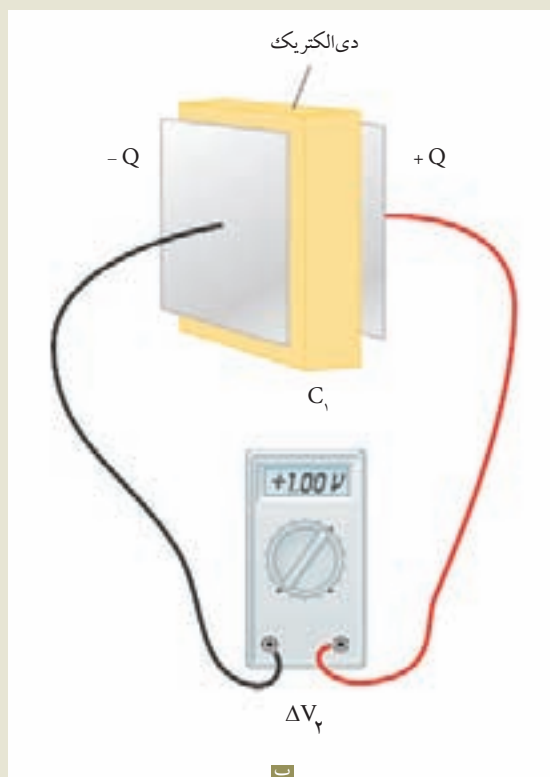


- فروریزش دی الکتریک
- میکروفون خازنی

**توجه:** هیچ دی الکتریک واقعی، عایق کامل یا صد در صد نیست. در نتیجه همواره مقداری نشت جریان بین صفحه‌های باردار یک خازن دی الکتریک دار وجود دارد. مقاومتی که هر دی الکتریک در مقابل عبور جریان نشتی از خود نشان می‌دهد، مقاومت نشتی خازن نامیده می‌شود. این جریان نشتی برای مدت زمانی به اندازه‌ی کافی طولانی سبب می‌شود که بار ذخیره شده در خازن کاهش یابد و سرانجام تخلیه شود.

## مثال ۸-۶

ولتاژ صفحه‌های خازن تختی با ظرفیت  $C_1$  پس از شارژ کامل برابر  $2V$  است (شکل ۸-۱۳ الف). اگر یک قطعه‌ی دی الکتریک بین صفحه‌های خازن وارد کنیم، ظرفیت آن  $C_2$  و ولتاژ صفحه‌ها،  $1V$  می‌شود (شکل ۸-۱۳ ب). الف) ظرفیت خازن را در این دو حالت با هم مقایسه کنید. ب) ضریب دی الکتریک قطعه‌ی بین خازن در شکل ۸-۱۳ ب چقدر است؟



شکل ۸-۱۳

حل:

الف) با توجه به رابطه‌ی ۸-۱، برای هر دو حالت داریم:

$$C_1 = \frac{Q}{\Delta V_1} = \frac{Q}{2V} \Rightarrow Q = 2C_1$$

$$C_2 = \frac{Q}{\Delta V_2} = \frac{Q}{V} \Rightarrow Q = C_2$$

مقایسه دو رابطه‌ی اخیر نشان می‌دهد که  $C_2 = 2C_1$ ، و این بدان معناست که ظرفیت خازن با وارد کردن قطعه‌ی دی‌الکتریک بین صفحه‌های آن به دو برابر افزایش یافته است.

ب) با توجه به رابطه‌های ۸-۲ و ۸-۳ داریم:

$$C_2 = 2C_1 \Rightarrow \epsilon \frac{A}{d} = 2\epsilon_0 \frac{A}{d} \Rightarrow \epsilon = 2\epsilon_0$$

با توجه به این که  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ، داریم:

$$\epsilon_r \epsilon_0 = 2\epsilon_0 \Rightarrow \epsilon_r = 2$$

#### مثال ۸-۷

خازنی دارای صفحه‌های موازی به مساحت  $12\text{cm}^2$  است که  $2\text{mm}$  از هم فاصله دارند. فضای بین صفحه‌ها از کاغذ آغشته به پارافین پر شده است.

الف) ظرفیت خازن را پیدا کنید.

ب) اگر خازن توسط یک باتری ۱۲ ولتی باردار شود، چقدر بار در آن ذخیره می‌شود؟

حل:

الف) با توجه به جدول ۸-۱، ضریب دی‌الکتریک کاغذ آغشته به پارافین  $2/5$  است. به این ترتیب از رابطه‌ی ۸-۳ داریم:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = \frac{(2/5 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}) (12 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{2 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$= 13/2 \times 10^{-13} \text{ F} = 13/2 \text{ pF}$$

ب) با توجه به رابطه‌ی ۸-۱ داریم:

$$Q = C \Delta V = (13/2 \times 10^{-13} \text{ C/V}) (12 \text{ V})$$

$$= 158/4 \times 10^{-13} \text{ C} = 158/4 \text{ pC}$$

اختلاف پتانسیل ثابت ۱۲۷ بین پایانه‌های یک خازن مسطح بدون دی‌الکتریک با ظرفیت ۲۵ / میکروفاراد برقرار شده است.

الف) بار ذخیره شده در خازن چقدر است؟

ب) اگر ورقه‌ای از میکا بین صفحه‌های خازن قرار داده شود و فضای بین صفحه‌ها را به‌طور کامل پر کند، با همان ولتاژ ۱۲۷، بار ذخیره شده در خازن چقدر می‌شود؟

## ۸-۷ ثابت زمانی خازنی

شکل ۸-۱۴ الف مدار شامل یک خازن و باتری را نشان می‌دهد. با بستن کلید S، جریان در مدار برقرار و خازن به سرعت باردار می‌شود. حال اگر مطابق شکل ۸-۱۴ ب در مسیر عبور جریان مقاومت R قرار بگیرد، آیا دوباره با بستن کلید S، خازن به سرعت باردار می‌شود؟ پاسخ منفی است؛ وجود یک مقاومت در مسیر جریان، زمان باردار شدن خازن را طولانی‌تر می‌کند. می‌توان نشان داد که زمان باردار شدن خازن به حاصل ضرب مقاومت R و ظرفیت خازن C بستگی دارد. حاصل ضرب RC ثابت زمانی خازنی نام دارد و با نماد  $\tau$  (بخوانید تاو) نشان داده می‌شود:

$$\tau = RC \quad (۸-۴)$$

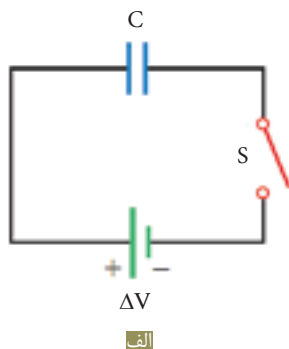
می‌توان نشان داد که در حین نخستین ثابت زمانی  $\tau$ ، بار خازن از صفر به ۶۳ درصد مقدار نهایی خود افزایش می‌یابد. پس از ۵ ثابت زمانی  $\tau$ ، یعنی ۵۲، خازن تا ۹۹ درصد (تقریباً ۱۰۰ درصد) ظرفیت خود باردار می‌شود. همین موضوع نیز در مورد دشارژ یا تخلیه‌ی یک خازن باردار برقرار است. پس از یک ثابت زمان، بار خازن تقریباً به ۳۷ درصد مقدار اولیه کاهش می‌یابد و پس از ۵۲، بار خازن تقریباً به صفر می‌رسد.

در جدول ۸-۲ ارتباط بین تعداد ثابت زمانی و درصد باردار شدن (نسبت به بار نهایی) و درصد بار باقی‌مانده (نسبت به مقدار اولیه‌ی بار) برای یک خازن ارائه شده است.

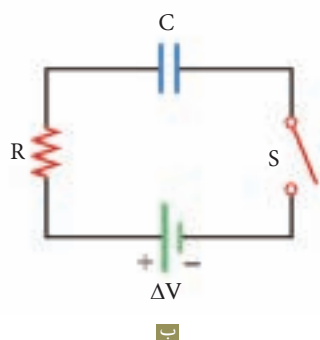
جدول ۸-۲\*

تعداد ثابت زمانی	درصد باردار شدن نسبت به بار نهایی	درصد بار باقی‌مانده نسبت به بار اولیه
۱	۶۳	۳۷
۲	۸۶	۱۴
۳	۹۵	۵
۴	۹۸	۲
۵	۹۹	۱

\* نیازی به حفظ کردن عددهای این جدول نیست.

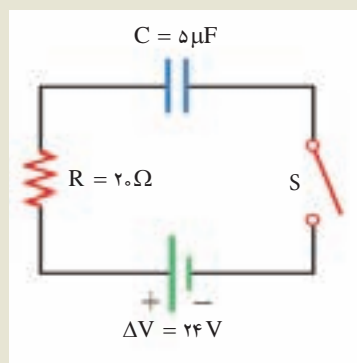


الف



ب

شکل ۸-۱۴ الف) با بستن کلید S، بارها بدون هیچ مقاومتی در مدار شارژ می‌کنند و خازن به سرعت باردار می‌شود. الف) وقتی در مسیر شارژ بارها، مقاومتی قرار گیرد خازن در زمان طولانی‌تری شارژ می‌شود.



شکل ۸-۱۵

پس از بستن کلید S در مدار شکل ۸-۱۵ چه مدت طول می کشد تا:

الف) بار خازن به ۸۶ درصد بار نهایی برسد؟

ب) خازن تقریباً به طور کامل باردار شود؟

حل:

الف) با توجه به رابطه‌ی ۴-۸ ثابت زمانی  $\tau$  برابر است با:

$$\tau = RC = (20\Omega)(5 \times 10^{-6}\text{F}) = 10^{-4}\text{ s}$$

با توجه به جدول ۸-۲، پس از  $2\tau$  بار خازن به ۸۶ درصد مقدار بار نهایی می رسد. به این ترتیب داریم:

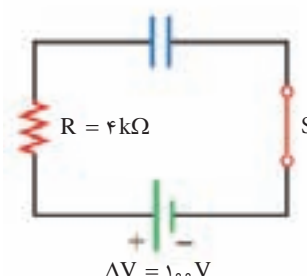
$$t = 2\tau = 2 \times 10^{-4}\text{ s} = 0.2\text{ ms}$$

ب) پس از  $5\tau$ ، تقریباً خازن به طور کامل باردار می شود. پس:

$$t = 5\tau = 5 \times 10^{-4}\text{ s} = 0.5\text{ ms}$$

### تمرین ۵-۸

$$C = 0.2\text{ nF}$$



شکل ۸-۱۶

در مدار شکل ۸-۱۶ خازن به طور کامل باردار و جریانی در مدار برقرار نیست. چه مدت پس از باز کردن کلید S، بار خازن به ۵ درصد بار اولیه می رسد؟

### ۸-۸ انرژی ذخیره شده در خازن

بسیاری از مهم ترین کاربردهای خازن به توانایی آن ها در ذخیره ی انرژی بستگی دارد. انرژی پتانسیل الکتریکی ذخیره شده در یک خازن باردار را می توان به صورت انرژی ذخیره شده در میدان الکتریکی در فضای میان صفحه های آن در نظر گرفت.

می‌توان نشان داد که انرژی ذخیره شده در هر خازن به شکل هندسی آن بستگی ندارد و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 \quad (5-8)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۸-۱، این رابطه را به صورت‌های دیگری نیز می‌توان نوشت:

$$U = \frac{Q^2}{2C} \quad (6-8)$$

$$U = \frac{1}{2} Q \Delta V \quad (7-8)$$

### مثال ۸-۹

یک خازن ۴۵۰ میکروفارادی با ولتاژ ۱۲۰ ولت باردار شده است. انرژی ذخیره شده در این خازن چقدر است؟

**حل:**

با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$C = 450 \mu F = 450 \times 10^{-6} F, \quad \Delta V = 120 V, \quad U = ?$$

از رابطه‌ی ۵-۸ داریم:

$$U = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{1}{2} (450 \times 10^{-6} F) (120 V)^2 = 3.24 J$$

### تمرین ۸-۴

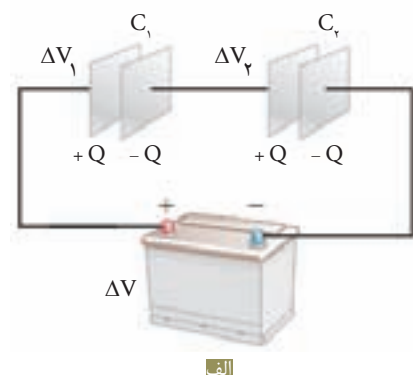
- الف) یک باتری چه مقدار بار باید به یک خازن ۵ میکروفارادی بدهد تا پس از جدا کردن باتری از خازن، ولتاژ بین صفحه‌های آن ۱/۵V شود؟
- ب) در این صورت چه مقدار انرژی در خازن ذخیره شده است؟

## ۸-۹ اتصال متوالی و موازی خازن‌ها

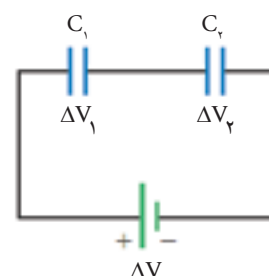
خازن‌ها با ظرفیت‌های استاندارد معین و برای ولتاژهای کاری معین ساخته می‌شوند (شکل ۸-۱). ولی آنچه که در یک کاربرد خاص مورد نظر است ممکن است با این مقدارهای استاندارد یکی نباشد. مقدارهای مورد نیاز را می‌توان با ترکیب کردن خازن‌ها به‌دست آورد. ترکیب‌های بسیاری امکان‌پذیر است ولی ساده‌ترین ترکیب‌ها عبارت‌اند از اتصال متوالی و اتصال موازی.

## خازن‌های متوالی

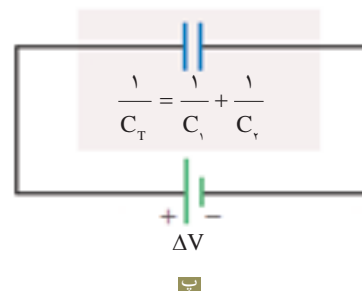
شکل ۸-۱۷ الف اتصال متوالی دو خازن را نشان می‌دهد که به یک باتری متصل شده‌اند. این اتصال به طور طر حوار در شکل ۸-۱۷ ب نشان داده شده است. اختلاف پتانسیل باتری در دو سر خازن‌های متوالی اعمال شده و بار  $Q$  را روی هر یک از آن‌ها ایجاد می‌کند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تنها دو صفحه‌ی ابتدا و انتهای مجموعه‌ی خازن‌ها که به باتری بسته شده است، از باتری بار الکتریکی دریافت می‌کنند و صفحه‌های دیگر از طریق القا باردار می‌شوند.



الف



ب



پ

**توجه:** هرگاه اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  به دو سر چند خازن اعمال شود که به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند، خازن‌ها دارای بار یکسان  $Q$  می‌شوند. مجموع اختلاف پتانسیل‌ها در دو سر تمام خازن‌ها برابر با اختلاف پتانسیل اعمال شده‌ی  $\Delta V$  است.

با مراجعه به شکل ۸-۱۷ ب و همچنین رابطه‌ی ۸-۱ می‌توان نوشت:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \quad (8-8)$$

خازن معادل  $C_T$  ترکیب متوالی، به صورت ظرفیت تک‌خازنی تعریف می‌شود که هرگاه اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  دو سر آن همانند اختلاف پتانسیل ترکیب باشد، بار  $Q$  برای آن با بار ترکیب یکسان شود. برای چنین خازنی که در شکل ۸-۱۷ پ نشان داده شده است داریم:

$$C_T = \frac{Q}{\Delta V} \quad \text{یا} \quad \frac{1}{C_T} = \frac{\Delta V}{Q} \quad (8-9)$$

با ترکیب رابطه‌های ۸-۸ و ۹-۸ در می‌یابیم که:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (8-10)$$

این تحلیل را می‌توانیم به هر تعداد خازن متوالی ادامه دهیم. نتیجه‌ی زیر را برای وارون ظرفیت معادل به دست می‌آوریم:

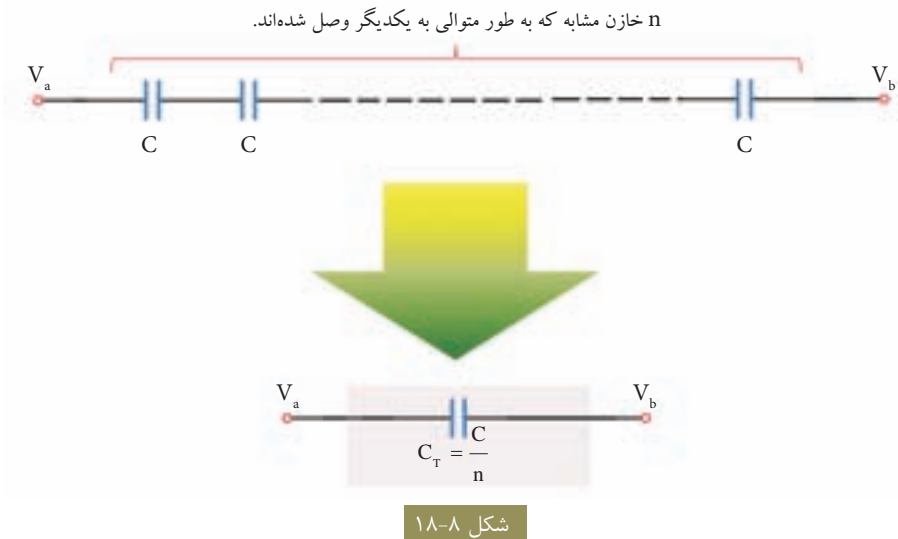
$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (8-11)$$

**شکل ۸-۱۷** (الف) اتصال متوالی دو خازن و یک باتری. (ب) ولتاژ باتری دو سر خازن‌ها تقسیم می‌شود و دارای بار یکسان  $Q$  هستند. (پ) تک‌خازن معادل با ظرفیت  $C_T$  که جایگزین خازن‌های متوالی شده است.

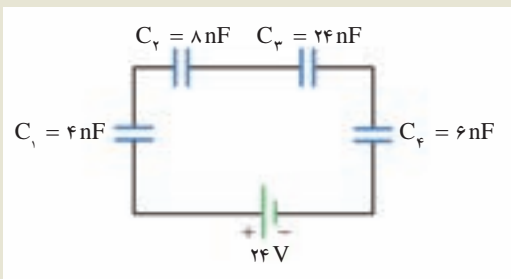


ظرفیت معادل در اتصال متوالی همواره کوچکتر از هر یک از ظرفیت‌های مجزاست. در صورتی که  $n$  خازن مشابه با ظرفیت  $C$  به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شوند، ظرفیت خازن معادل از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید (شکل ۸-۱۸)

$$C_T = \frac{C}{n} \quad (8-12)$$



#### مثال ۸-۱۰



شکل ۸-۱۹

در مدار شکل ۸-۱۹ مطلوب است:

الف) ظرفیت معادل خازن‌ها.

ب) انرژی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها.

**حل:**

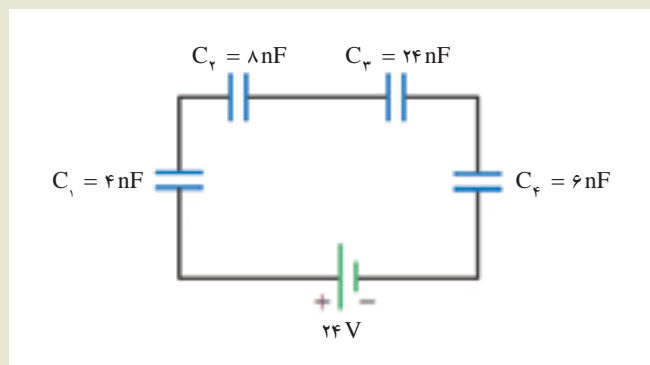
الف) با توجه به رابطه‌ی ۱۱-۱۱ داریم:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{24} + \frac{1}{6} = \frac{6+3+1+4}{24} \Rightarrow C_T = \frac{12}{7} \mu F$$

ب) انرژی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها با انرژی ذخیره شده در خازن معادل یکسان است. به این ترتیب با توجه به

رابطه‌ی ۵-۸ داریم:

$$U = \frac{1}{2} \left( \frac{12}{7} \times 10^{-6} F \right) (24 V)^2 = 494 \times 10^{-6} J \approx 0.5 mJ$$



شکل ۸-۲۰

در مدار شکل ۸-۲۰ ظرفیت خازن‌ها بر حسب میکروفاراد است. اگر انرژی ذخیره در خازن ۶ میکروفارادی برابر ۳۰ mJ باشد، مطلوب است:

- (الف) ظرفیت معادل خازن‌ها.  
 (ب) ولتاژ دو سر هر یک از خازن‌ها و باتری.  
 (پ) مجموع انرژی ذخیره شده در دو خازن.

حل:

(الف) چون خازن‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند، با توجه به رابطه‌ی ۸-۱۰ داریم:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{2+1}{6} = \frac{1}{2} \Rightarrow C_T = 2 \mu\text{F}$$

(ب) از رابطه‌ی ۸-۵، ولتاژ دو سر خازن ۶ میکروفارادی را به‌دست می‌آوریم. به این ترتیب داریم:

$$U_T = \frac{1}{2} C_T (\Delta V_T)^2 \Rightarrow 30 \times 10^{-3} \text{ J} = \frac{1}{2} (6 \times 10^{-6} \text{ F}) (\Delta V_T)^2$$

$$(\Delta V_T)^2 = 10^4 \Rightarrow \Delta V_T = 100 \text{ V}$$

چون در اتصال متوالی خازن‌ها، بار خازن‌ها با یکدیگر برابر است، با توجه به رابطه‌ی ۸-۱ داریم:

$$Q_1 = Q_T \Rightarrow C_1 \Delta V_1 = C_T \Delta V_T$$

$$3 \Delta V_1 = 6 (100 \text{ V}) \Rightarrow \Delta V_1 = 200 \text{ V}$$

همان‌طور که گفته شد در اتصال متوالی، ولتاژ باتری بین خازن‌ها تقسیم می‌شود. یعنی:

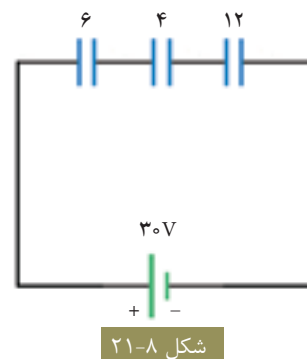
$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_T = 100 \text{ V} + 200 \text{ V} = 300 \text{ V}$$

مشابه مثال ۸-۹ داریم:

$$U = \frac{1}{2} (2 \times 10^{-6} \text{ F}) (300 \text{ V})^2 = 9 \times 10^{-2} \text{ J} = 90 \text{ mJ}$$

در مدار شکل ۸-۲۱ ظرفیت همی خازن‌ها بر حسب پیکوفاراد است. مطلوب است:

- الف) ظرفیت معادل خازن‌ها.  
ب) ولتاژ دو سر هر یک از خازن‌ها.



### خازن‌های موازی

شکل ۸-۲۲ الف اتصال موازی دو خازن را نشان می‌دهد که به یک باتری متصل شده‌اند. در این مورد صفحه‌های سمت چپ دو خازن توسط سیم‌هایی رسانا به هم متصل شده‌اند و یک سطح هم پتانسیل تشکیل داده‌اند، و صفحه‌های سمت راست سطح هم پتانسیل دیگری تشکیل داده‌اند. از این رو در اتصال موازی اختلاف پتانسیل برای همه‌ی خازن‌های مجزا یکسان و برابر است با  $\Delta V = \Delta V_1 = \Delta V_2$ . ولی با توجه به این که بارها از باتری به‌طور مستقل به هر خازن می‌رسند، با توجه به ظرفیت هر خازن، میزان بارهای  $Q_1$  و  $Q_2$  می‌تواند متفاوت باشد. یعنی:

$$Q_1 = C_1 \Delta V_1 \quad \text{و} \quad Q_2 = C_2 \Delta V_2$$

**توجه:** هرگاه اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  به دو سر چند خازن اعمال شود که به‌طور موازی بسته شده‌اند، آن اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  به دو سر هر یک از خازن‌ها نیز اعمال می‌شود. بار کل  $Q$  ذخیره شده روی خازن‌ها برابر با مجموع بارهای ذخیره شده روی همه خازن‌هاست.

بار کل  $Q$  در ترکیب، و در نتیجه بار کل روی خازن معادل برابر است با:

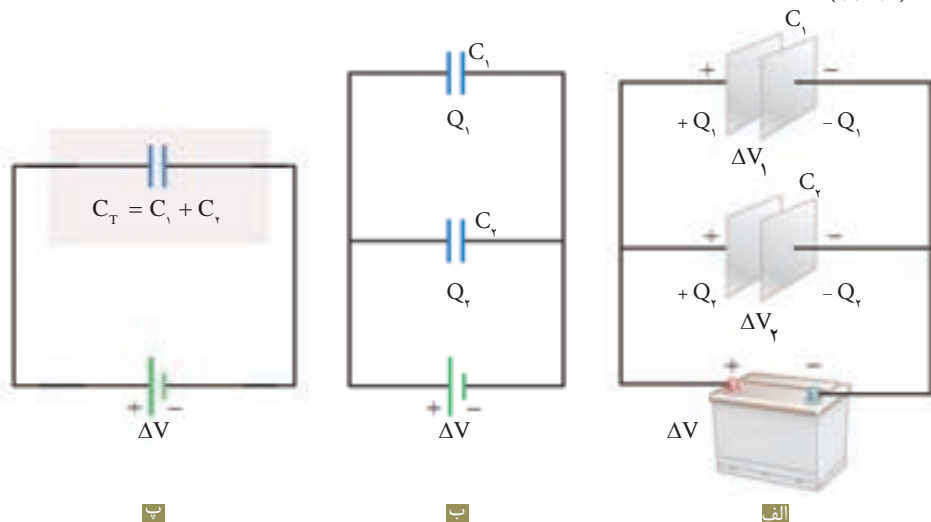
$$Q = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2) \Delta V$$

در نتیجه:

$$\frac{Q}{\Delta V} = C_1 + C_2 \quad (۸-۱۳)$$

ترکیب موازی معادل تک خازنی است با همان بار کل  $Q = Q_1 + Q_2$  و همان اختلاف پتانسیل ترکیب شکل ۸-۲۲ پ. ظرفیت معادل ترکیب،  $C_T$ ، با ظرفیت  $Q / \Delta V$  مربوط به این تک خازن معادل یکسان است. در نتیجه از رابطه ی ۸-۱۳ داریم:

$$C_T = C_1 + C_2 \quad (8-14)$$



شکل ۸-۲۲ (الف) دو خازن که به طور موازی به باتری بسته شده اند. (ب) باتری اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  را به دو سر پایانه های خود و بنابراین به دو سر هر یک از خازن ها اعمال می کند. (پ) خازن معادل، با ظرفیت  $C_T$ ، جایگزین آن ترکیب موازی شده است.

به همین ترتیب می توانیم نشان دهیم که برای هر تعداد از خازن های موازی داریم:

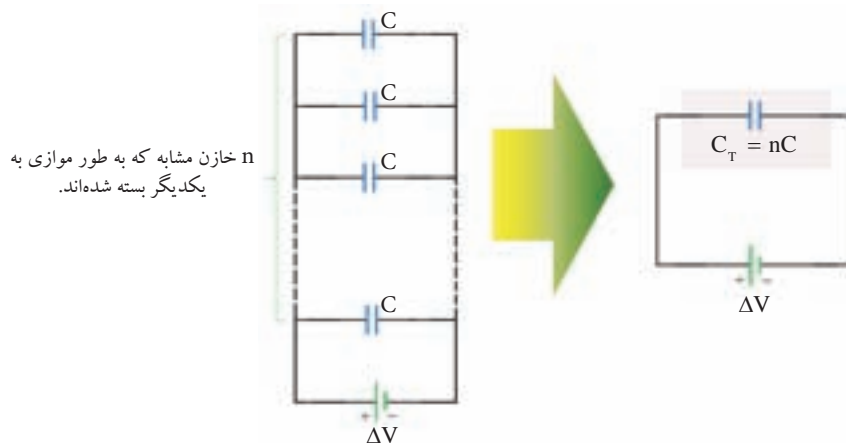
$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (8-15)$$

ظرفیت معادل در اتصال موازی همواره بزرگ تر از هر یک از ظرفیت های مجزا است.

در صورتی که  $n$  خازن مشابه با ظرفیت  $C$  به طور موازی به یکدیگر بسته شوند،

ظرفیت خازن معادل از رابطه زیر به دست می آید (شکل ۸-۲۳):

$$C_T = nC \quad (8-16)$$

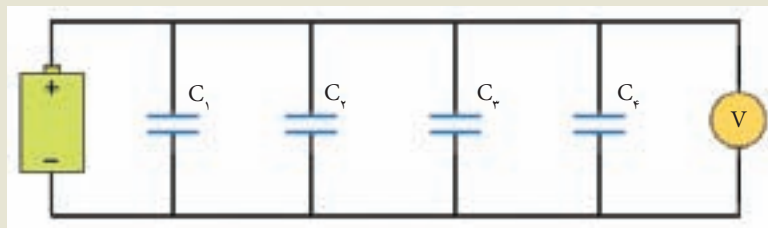


$n$  خازن مشابه که به طور موازی به یکدیگر بسته شده اند.

شکل ۸-۲۳

### مثال ۸-۱۲

در مدار شکل ۸-۲۴ ظرفیت خازن‌ها به ترتیب  $C_1 = 6\mu F$ ،  $C_2 = 12\mu F$ ،  $C_3 = 4\mu F$ ،  $C_4 = 8\mu F$  است و ولت‌سنج عدد



شکل ۸-۲۴

۱۲۰V را می‌خواند. مطلوب است:

الف) ظرفیت معادل خازن‌ها.

ب) بار ذخیره شده در خازن‌های  $C_2$  و  $C_4$ .

پ) انرژی ذخیره شده در خازن  $C_2$ .

**حل:**

الف) چون خازن‌ها به‌طور موازی بسته شده‌اند، با توجه به رابطه‌ی ۸-۱۵ داریم:

$$C_T = 6 + 12 + 4 + 8 = 30\mu F$$

ب) ولت‌سنج ولتاژ دو سر باتری را می‌خواند. چون خازن‌ها به‌طور موازی به یکدیگر و باتری بسته شده‌اند، ولتاژ دو سر

همه‌ی خازن‌ها یکسان و برابر ۱۲۰V است. به این ترتیب با توجه به رابطه‌ی  $Q = C\Delta V$  برای هر یک از خازن‌های ۱۲ و ۸

میکروفارادی داریم:

$$Q_2 = C_2 \Delta V = (12 \times 10^{-6} \text{ C/V}) (120 \text{ V}) = 1.44 \times 10^{-3} \text{ C}$$

$$Q_4 = C_4 \Delta V = (8 \times 10^{-6} \text{ C/V}) (120 \text{ V}) = 9.6 \times 10^{-4} \text{ C}$$

با توجه به رابطه‌ی ۸-۵ داریم:

$$U = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{1}{2} (4 \times 10^{-6} \text{ F}) (120 \text{ V})^2 = 288 \times 10^{-6} \text{ J} = 288 \mu \text{J}$$

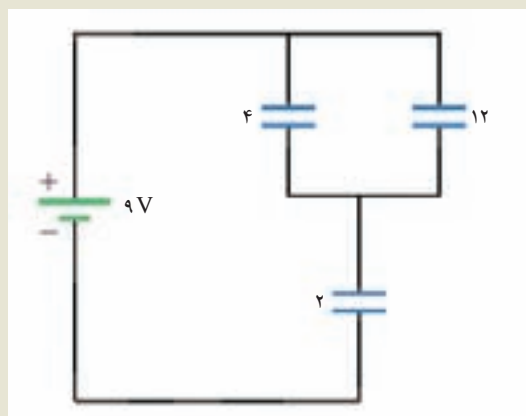
### مثال ۸-۱۳

در این مثال ترکیبی از خازن‌های متوالی و موازی بررسی می‌شود. در

مدار شکل ۸-۲۵ ظرفیت همه‌ی خازن‌ها بر حسب میکروفاراد است.

الف) ظرفیت معادل خازن‌ها.

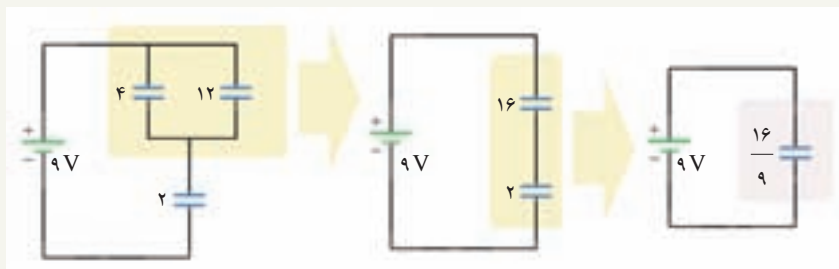
ب) انرژی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها.



شکل ۸-۲۵

حل:

الف) خازن‌های ۴ و ۱۲ میکروفارادی موازی اند و خازن معادل آن‌ها با خازن ۲ میکروفارادی به‌طور متوالی بسته شده است (شکل ۸-۲۶).

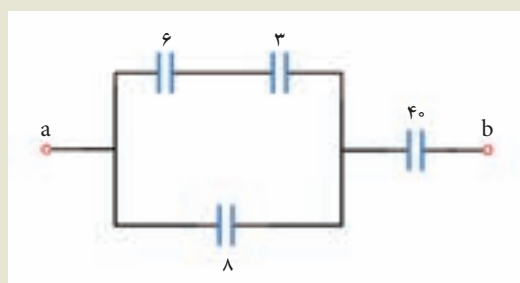


شکل ۸-۲۶

ب) با توجه به این که ظرفیت معادل خازن‌ها  $\frac{16}{9}$  میکروفاراد به‌دست آمد، با استفاده از رابطه‌ی ۸-۵ داریم:

$$U = \frac{1}{2} \left( \frac{16}{9} \times 10^{-6} \text{ F} \right) (9\text{ V})^2 = 72 \times 10^{-6} \text{ J} = 72 \mu\text{J}$$

#### مثال ۸-۱۴

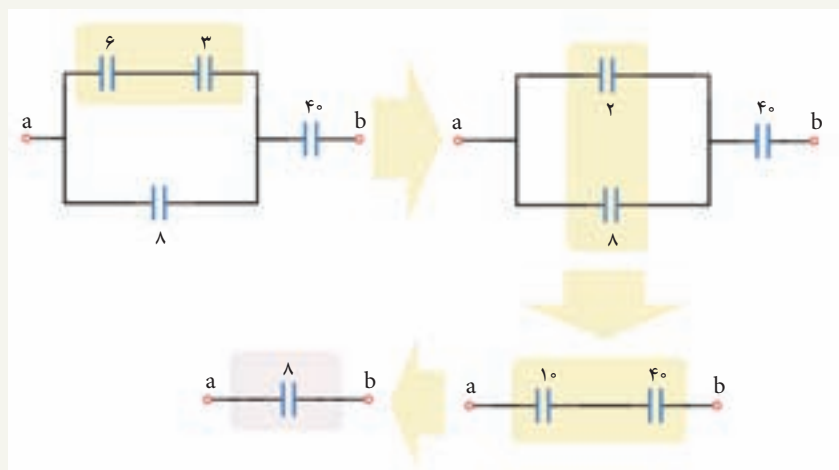


شکل ۸-۲۷

شکل ۸-۲۷ قسمتی از یک مدار، شامل ترکیب متوالی و موازی تعدادی خازن را نشان می‌دهد که ظرفیت آن‌ها بر حسب پیکوفاراد است. ظرفیت معادل این مجموعه خازن‌ها را بین دو نقطه‌ی a و b به‌دست آورید.

حل:

در شکل ۸-۲۷ ظرفیت معادل خازن‌ها به ترتیب در چند مرحله محاسبه شده است و سرانجام ظرفیت معادل بین دو نقطه‌ی a و b برابر ۸ پیکوفاراد به‌دست آمده است.



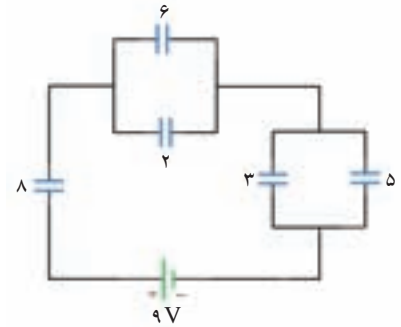
شکل ۸-۲۸

### تمرین ۷-۸

اگر به دو سر نقطه‌های a و b در مدار شکل ۸-۲۷ اختلاف پتانسیل ۱۰۰ ولت اعمال شود، انرژی کل ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها چقدر خواهد شد؟

### تمرین ۸-۸

در مدار شکل ۸-۲۹ ظرفیت همه‌ی خازن‌ها بر حسب میکروفاراد است.  
 الف) ظرفیت معادل خازن‌ها را به دست آورید.  
 ب) ولتاژ دو سر خازن ۸ میکروفارادی را به دست آورید.  
 پ) انرژی کل ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها چقدر است؟

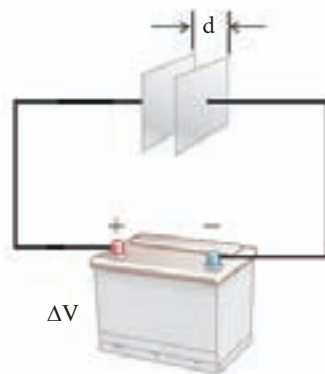


شکل ۸-۲۹



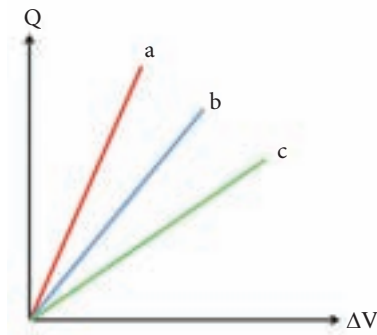
### پرسش‌های مفهومی

- ۱- اگر فاصله‌ی صفحه‌های خازن مسطح را در مدار شکل ۸-۳۰ دو برابر کنیم، هر یک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کنند؟
  - الف) ولتاژ دو سر خازن
  - ب) ظرفیت خازن
  - پ) بار ذخیره شده در خازن



شکل ۸-۳۰

- ۲- شکل ۸-۳۱ نمودارهای بار بر حسب اختلاف پتانسیل را برای سه خازن مسطح نشان می‌دهد که مساحت صفحه‌ها و فاصله‌های جدایی آن‌ها در جدول زیر داده شده است. کدام نمودار مربوط به کدام خازن است؟



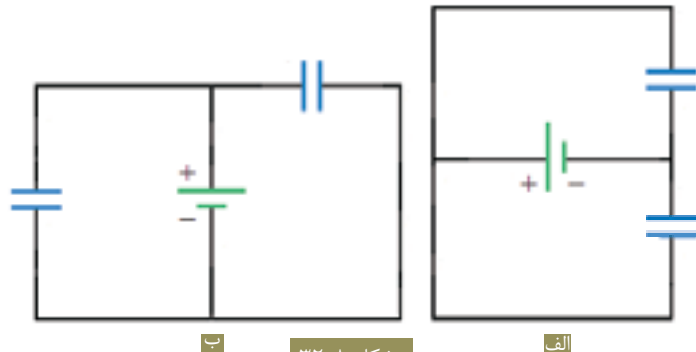
شکل ۸-۳۱

فاصله‌ی دو صفحه	مساحت	خازن
d	A	۱
d	۲A	۲
۲d	A	۳



۳- نشان دهید یکای ثابت زمانی در رابطه  $\tau = RC$ ، ثانیه است، یعنی:  $1s = 1\Omega \times 1F$ .

۴- برای هر یک از مدارهای شکل ۸-۳۲، آیا خازن‌ها به طور متوالی بسته شده‌اند یا موازی و یا هیچ کدام؟



شکل ۸-۳۲

۵- سه خازن مشابه با ظرفیت  $C$  در اختیار داریم. خازن‌ها را به چه صورت به یکدیگر

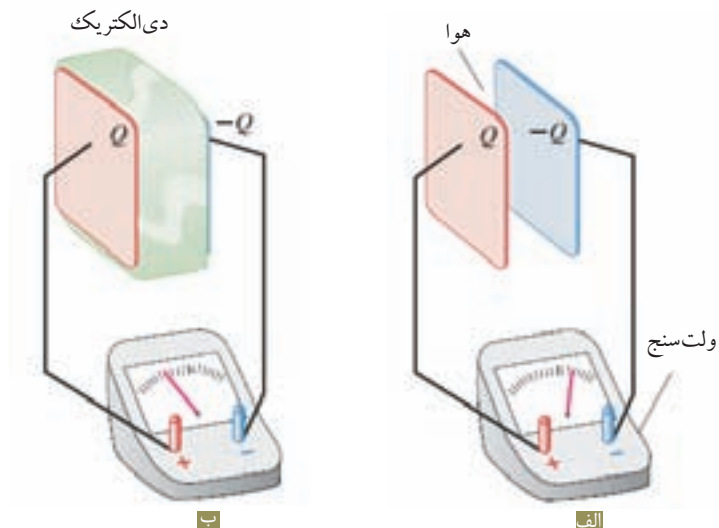
ببندیم تا:

الف) ظرفیت معادل بیشینه شود.

ب) ظرفیت معادل کمینه شود.

۶- شکل ۸-۳۳ اثر وارد کردن دی‌الکتریک بین صفحه‌های موازی یک خازن را

نشان می‌دهد. توضیح دهید چرا ولتاژ در وضعیت (ب) نسبت به وضعیت (الف) کاهش یافته است.



شکل ۸-۳۳

## مسئله‌ها

۱- شکل ۸-۳۴ خازنی به ظرفیت ۲۲۰۰ میکروفاراد را نشان می‌دهد که تا ۱۶V می‌توان به دو سر آن ولتاژ اعمال کرد. در این شرایط چقدر بار در خازن ذخیره می‌شود؟



شکل ۸-۳۴

۲- بار ذخیره شده در خازنی که توسط یک باتری ۱۲ ولتی باردار شده  $14\mu C$  است. پس از مدتی حدود  $4\mu C$  بار خازن به دلیل نشت کاهش می‌یابد و بار آن به  $10\mu C$  می‌رسد. ولتاژ دو سر خازن در این حالت چقدر است؟

۳- ظرفیت خازن تختی  $20\mu C$  و بار ذخیره شده در آن  $40\mu C$  است. اگر فاصله‌ی بین صفحه‌های خازن که از هوا پر شده است ۱mm باشد، بزرگی میدان الکتریکی یکنواخت بین صفحه‌های این خازن چقدر است؟ (راهنمایی: به مثال ۲-۶ مراجعه کنید).

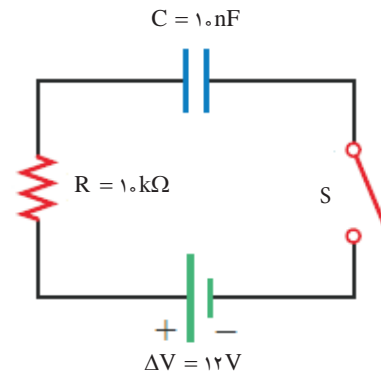
۴- ظرفیت خازن مسطحی را که از دو ورقه‌ی رسانای مستطیل شکل به ابعاد  $2\text{cm} \times 4\text{cm}$  تشکیل شده است، حساب کنید. فرض کنید این دو ورقه‌ی رسانا توسط لایه‌ی نازکی از نایلون به ضخامت  $0.7\text{mm}$  از یکدیگر جدا شده‌اند. ضریب دی‌الکتریک نایلون را  $3/5$  بگیرید.

۵- شکل ۸-۳۵ سه خازن با ظرفیت‌های متفاوت را نشان می‌دهد که بیش‌ترین ولتاژ قابل اعمال به دو سر هر یک از آن‌ها ۴۰۰V است. اگر هر کدام از این خازن‌ها را با ولتاژ ۳۰۰V باردار کنیم، انرژی ذخیره شده در هر یک را به دست آورید.



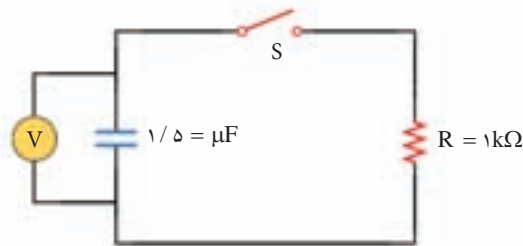
شکل ۸-۳۵

۶- در مدار شکل ۳۶-۸ پیش از بستن کلید  $S$ ، خازن خالی است. اگر کلید  $S$  را به مدت  $20\text{ms}$  در وضعیت بسته نگه داریم، خازن چقدر باردار می‌شود؟



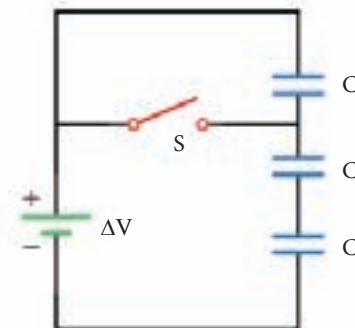
شکل ۳۶-۸

۷- در مدار شکل ۳۷-۸ در ابتدا خازن به طور کامل باردار است و ولت‌سنج عدد ۲۵ ولت را می‌خواند. اگر کلید  $S$  را تنها به مدت  $3\text{ms}$  در حالت بسته نگه داریم، ولتاژ دو سر خازن چقدر خواهد شد؟



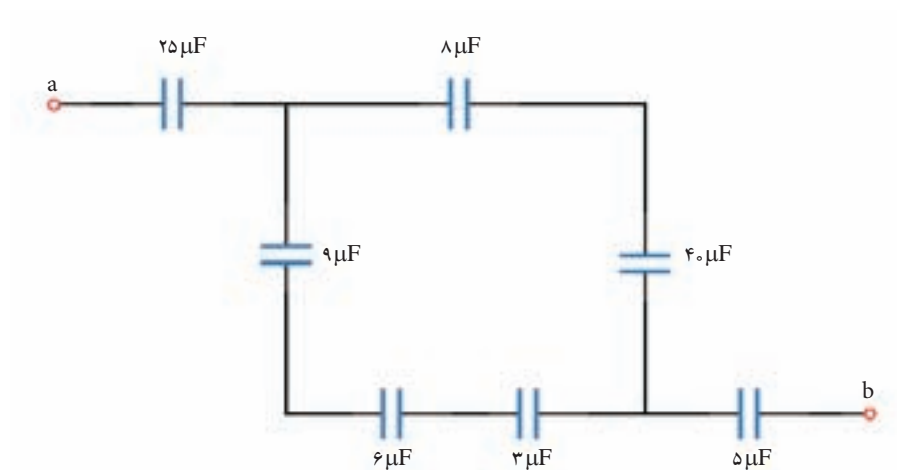
شکل ۳۷-۸

۸- در مدار شکل ۳۸-۸ سه خازن مشابه به طور متوالی به مولدی با ولتاژ  $\Delta V$  وصل شده‌اند و بار ذخیره شده در هر خازن برابر  $Q$  است. پس از بستن کلید  $S$ ، بار هر خازن را بر حسب بار اولیه‌ی آن‌ها، یعنی  $Q$ ، به دست آورید.



شکل ۳۸-۸

۹- شکل ۸-۳۹ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. ظرفیت معادل بین دو نقطه‌ی a و b چقدر است؟



شکل ۸-۳۹

# پیل ها و باتری ها



9

باتری، چشمه‌ای از انرژی پتانسیل الکتریکی است که از تبدیل انواع دیگر انرژی به انرژی الکتریکی حاصل می‌شود، و این انرژی در پایانه‌های باتری در دسترس قرار می‌گیرد.

## سیمای فصل نهم

۹-۱ پیل‌ها و باتری‌ها

۹-۲ انواع پیل‌ها

۹-۳ اتصال پیل‌ها

۹-۴ مقاومت داخلی پیل‌ها

ارزشیابی فصل نهم

## هدف‌های آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما فرا می‌گیرید:

○ تمایز بین پیل‌ها و باتری‌ها چیست.

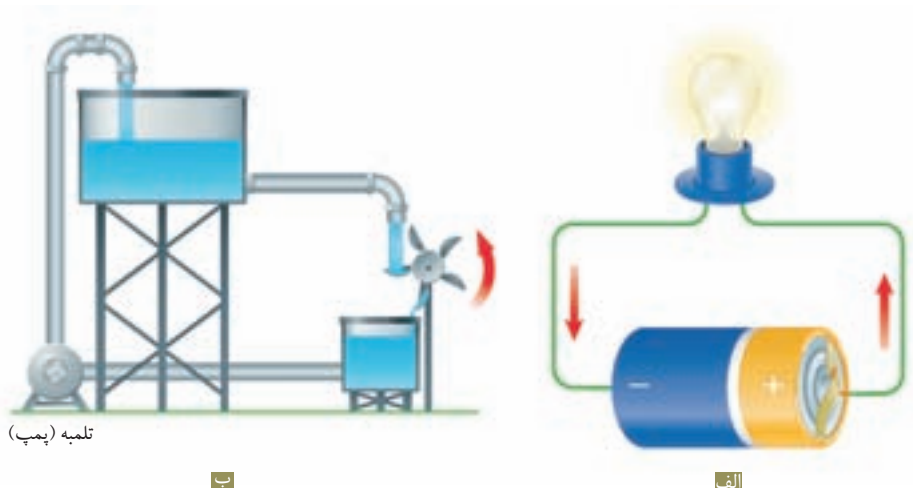
○ اتصال سری یا موازی پیل‌ها به چه صورت انجام می‌گیرد و در چه شرایطی پیل‌ها را به طور متوالی یا موازی به هم وصل می‌کنند.

○ در اتصال ترکیبی و متقابل پیل‌ها به چه نکاتی باید توجه کرد.

○ نقش مقاومت داخلی پیل در افت ولتاژ چگونه حساب می‌شود.

## پیل‌ها و باتری‌ها

برای ایجاد شارش پایا از بارهای الکتریکی درون یک مدار، به وسیله‌ای که بتواند دو سر مدار اختلاف پتانسیل لازم را برقرار کند نیاز داریم. در فصل‌های پیشین دیدیم که باتری با انجام کار روی حامل‌های بار، ولتاژ لازم را برای برقراری جریان در مدار فراهم می‌کند. در واقع باتری یک «پمپ بار» یا وسیله‌ی  $emf$  است و گفته می‌شود باتری،  $emf$  ای برابر  $\mathcal{E}$  را مهیا می‌سازد تا روی حامل‌های بار کار انجام دهد. لفظ  $emf$  از عبارت منسوخ شده‌ی نیروی محرکه‌ی الکتریکی می‌آید، که مربوط به زمانی است که دانشمندان هنوز به خوبی چگونگی کار یک وسیله‌ی  $emf$  را درک نکرده بودند. پیل‌ها، باتری‌ها مولدهای الکتریکی، باتری‌های خورشیدی و پیل‌های سوختی همگی نمونه‌های منبع  $emf$  هستند. هر یک از این وسیله‌ها نوعی انرژی غیر الکتریکی (مانند مکانیکی، شیمیایی، گرمایی و غیره) را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و به مداری که به آن متصل است انتقال می‌دهند (شکل ۹-۱).

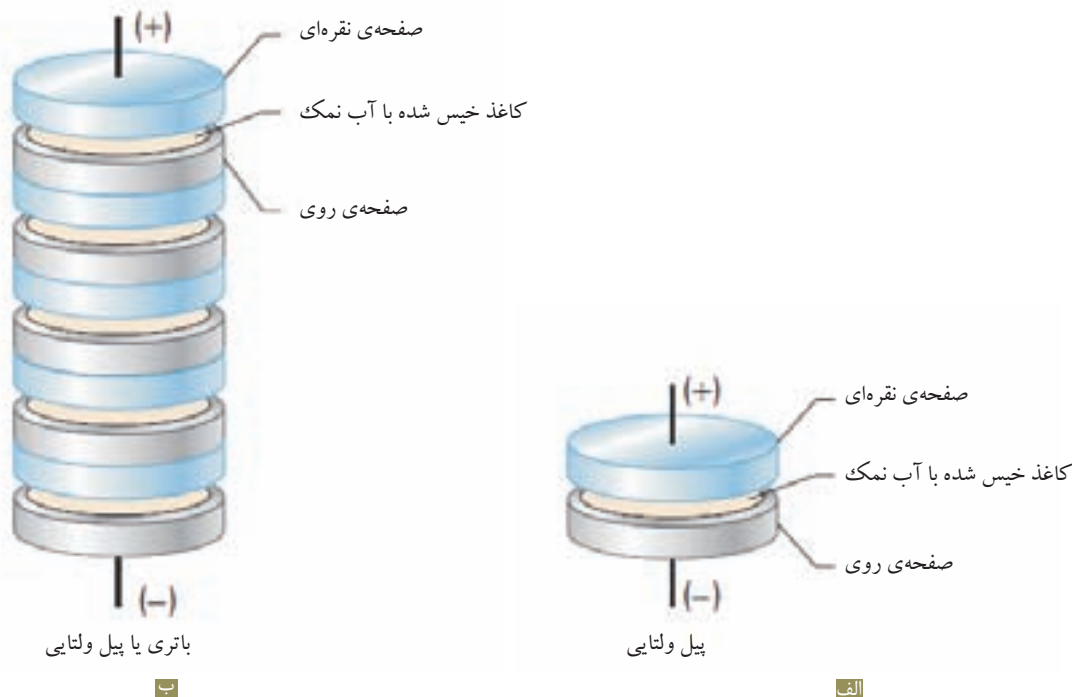


شکل ۹-۱ (الف) باتری مانند یک «پمپ بار»، اختلاف پتانسیل لازم را برای شارش پایایی از حامل‌های بار در مدار فراهم می‌کند. (ب) برای شارش دائم آب درون لوله‌ها باید تلمبه (پمپ) بدون وقفه کار کند.

در این فصل ضمن آشنایی بیش تر با پیل ها و تمایز آن ها با باتری ها، نحوه ی اتصال پیل ها را بررسی می کنیم. همچنین خواهیم دید که چه تفاوتی بین پیل های آرمانی و پیل های واقعی وجود دارد و نقش مقاومت داخلی پیل ها را در افت ولتاژ خواهیم دید.

## ۹-۱ پیل ها و باتری ها

یکی از مهم ترین منابع تأمین اختلاف پتانسیل یا انرژی الکتریکی باتری ها هستند. در سال ۱۸۰۰ میلادی آلساندرو ولتا، دانشمند ایتالیایی موفق به ساخت وسیله ای شد که می توانست برای مدتی اختلاف پتانسیل مورد نیاز را برای برقراری جریان در یک مدار مهیا کند. این وسیله را پیل ولتایی نامیدند. شکل ۹-۲ الف ساختمان یک پیل ولتایی را نشان می دهد که از دو صفحه ی فلزی از جنس روی و نقره تشکیل شده و بین آن ها کاغذی مرطوب شده با آب نمک قرار گرفته است. ولتا با قرار دادن چند پیل روی یک دیگر، پیل بزرگ تری ساخت که قادر بود برای مدت زمان بیش تری جریان تولید کند (شکل ۹-۲ ب). این وسیله را که از ترکیب چند پیل ساخته شده بود باتری نامیدند هر چند از آن موقع تا به حال، گاهی اوقات عامه ی مردم واژه های باتری و پیل را به جای یک دیگر نیز به کار می برند.



شکل ۹-۲ (الف) پیل ها، واحد تشکیل دهنده ی باتری ها هستند. (ب) در یک باتری باید جنس صفحه ی زیرین با جنس صفحه ی بالایی متفاوت باشد. در باتری نشان داده شده، صفحه ی زیرین از جنس روی و آخرین صفحه ی بالایی از جنس نقره است. اگر ترتیب صفحه ها بر عکس شود، تنها جای پایانه های مثبت و منفی جا به جا می شود.



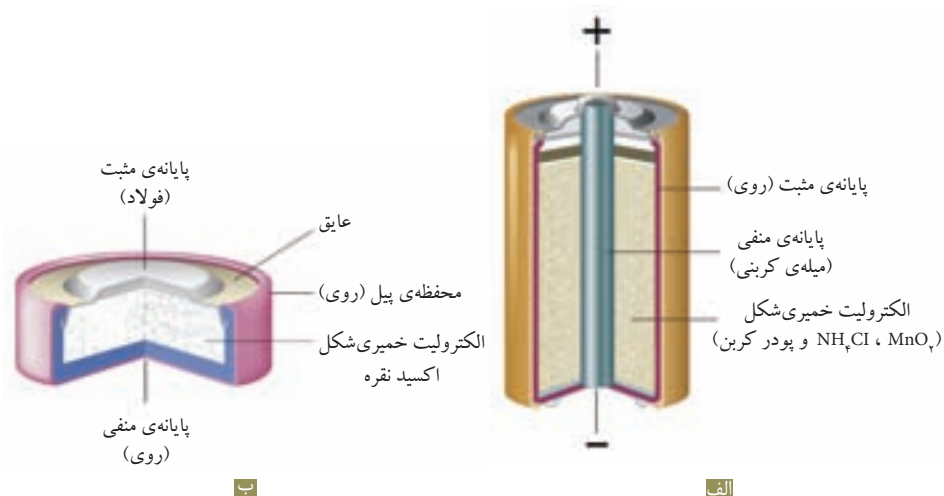
## ۹-۲ انواع پیل‌ها

پیل‌ها به دو دسته‌ی نوع اول و نوع دوم تقسیم‌بندی می‌شوند. پیل‌های نوع اول فقط یک بار قابل استفاده هستند زیرا پس از تخلیه، امکان شارژ کردن (باردار کردن) آن‌ها وجود ندارد. اغلب باتری‌هایی که برای مصرف در چراغ‌های قوه، رادیوها، ساعت‌های دیواری و مچی و کنترل از دورها به فروش می‌رسند از نوع همین پیل‌های نوع اول هستند (شکل ۹-۳).



شکل ۹-۳ انواع مختلف پیل‌های نوع اول که به پیل‌های خشک موسوم‌اند. این پیل‌ها تنها برای یک بار قابل مصرف‌اند زیرا امکان شارژ دوباره را ندارند.

درون پیل‌های نوع اول، که در صنعت به پیل‌های خشک شناخته می‌شوند، از الکترولیت خمیری شکل استفاده می‌شود. شکل ۹-۴ الف ساختمان داخلی پیل‌های روی - کربن و شکل ۹-۴ ب ساختمان داخلی پیل‌های اکسید - نقره را نشان می‌دهد.



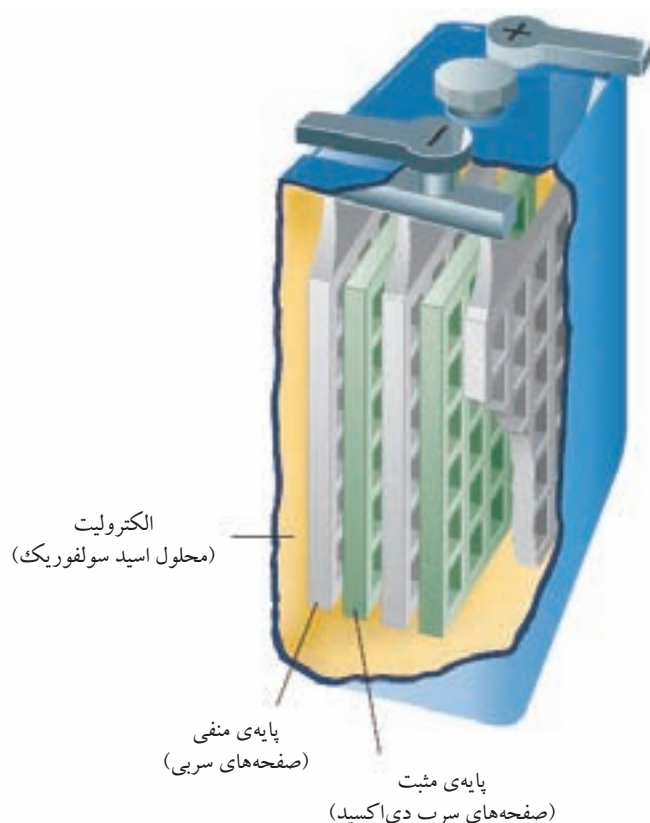
شکل ۹-۴ ساختمان داخلی دو نوع پیل خشک

پیل‌های نوع دوم می‌توانند به دفعات پر و خالی شوند. در برخی از این پیل‌ها، که در آن‌ها از فلزات نیکل و کادمیوم به عنوان الکترود و پتانسیوم هیدروکسید به عنوان الکترولیت استفاده می‌شود (باتری‌های Ni-CD)، واکنش معکوس تخلیه‌ی شیمیایی نیز امکان‌پذیر است و لذا به دفعات قابل پر شدن هستند (شکل ۹-۵). اکثر پیل‌های Ni-CD در گوشی‌های تلفن همراه، رایانه‌های قابل حمل، دستگاه‌های MP3 و MP4 مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۹-۵ انواع پیل‌های قابل شارژ Ni-CD

متداول‌ترین پیل الکترولیتی نوع دوم، باتری اتومبیل است که در صنعت به پیل‌های تر موسوم‌اند. الکترودهای باتری اتومبیل از جنس سرب و سرب دی اکسید، و الکترولیت آن محلول اسید سولفوریک است (شکل ۹-۶). در طول دوره‌ی تخلیه (دشارژ)، سرب و اسید سولفوریک به ترتیب به سولفات سرب و آب تبدیل می‌شوند. پس از تخلیه‌ی باتری اگر، جریان برق در باتری معکوس شود، آب و سولفات سرب دوباره به ترتیب به اسید سولفوریک و سرب تبدیل می‌شوند.



شکل ۹-۶ اجزای تشکیل دهنده‌ی باتری‌های اتومبیل که به دفعات می‌توانند پر و خالی (شارژ و دشارژ) شوند.

#### بیش‌تر بدانید

- پیل‌های سوختی هیدروژنی
- باتری‌های خورشیدی
- پیل الکترولیتی

#### شبیه‌سازی

- پیل الکترولیتی

#### فعالیت عملی

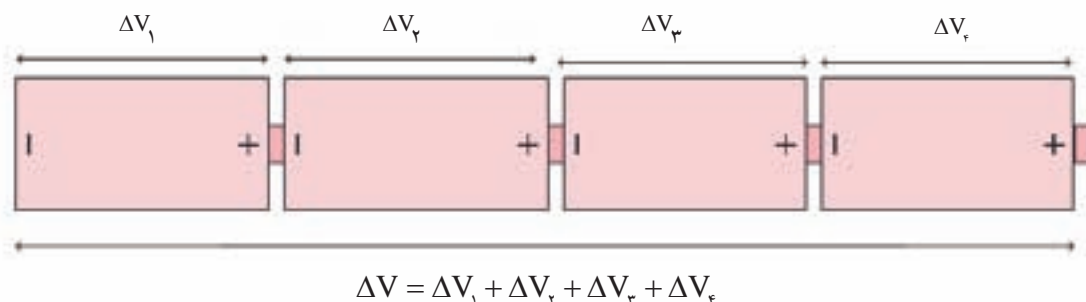
- ساخت پیل میوه‌ای

### ۹-۳ اتصال پیل‌ها

پیل‌ها را به دو صورت متوالی و موازی می‌توان به یکدیگر متصل کرد.

● **اتصال متوالی:** در اتصال متوالی پیل‌ها، باید قطب مثبت هر پیل به قطب منفی پیل دیگر اتصال یابد (شکل ۹-۷). در این صورت ولتاژ کل ایجاد شده برابر با مجموع ولتاژ تک تک پیل‌های متوالی شده است. یعنی:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 + \Delta V_4$$



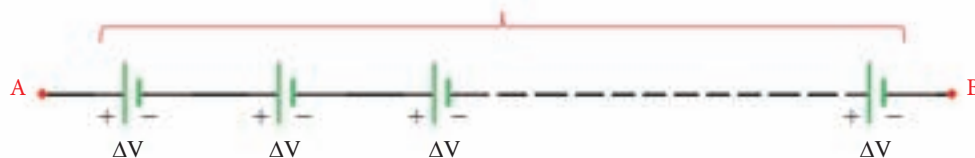
شکل ۹-۷ اتصال متوالی چند پیل با ولتاژهای متفاوت

همان‌طور که دیده می‌شود از اتصال متوالی باتری‌ها زمانی می‌توان استفاده کرد که ولتاژ مورد نیاز بیش‌تر از مقدار ولتاژ یک پیل باشد. همچنین در اتصال متوالی پیل‌ها ضرورتی ندارد که ولتاژ پیل‌ها با یکدیگر برابر باشد.

اگر  $n$  پیل مشابه به‌طور متوالی به یکدیگر وصل شوند (شکل ۹-۸)، ولتاژ کل برابر است با:

$$\Delta V_{AB} = n\Delta V$$

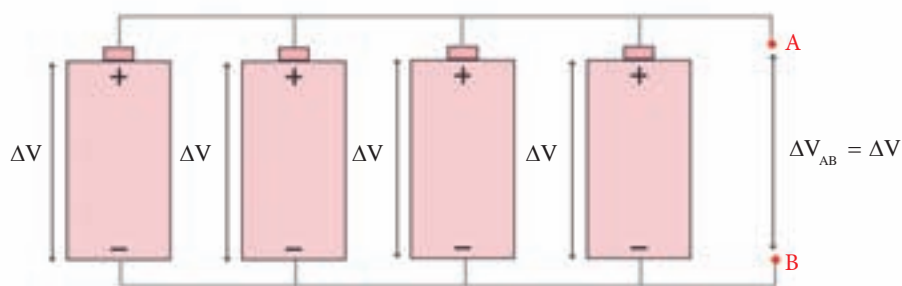
$n$  پیل مشابه که به‌طور متوالی به یکدیگر وصل شده‌اند.



$$\Delta V_{AB} = n\Delta V$$

شکل ۹-۸ اتصال متوالی  $n$  پیل مشابه

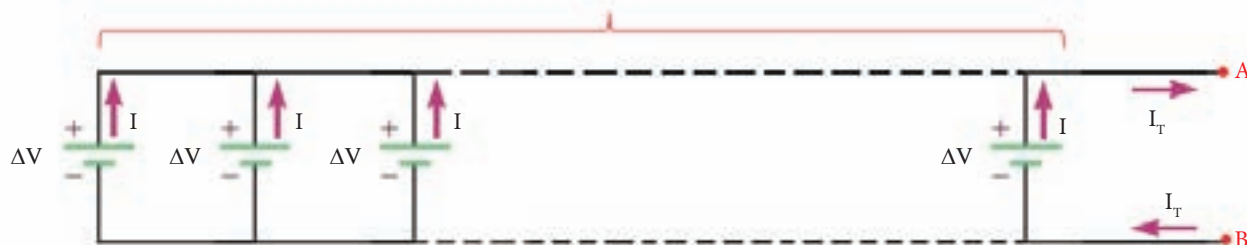
● **اتصال موازی:** در اتصال موازی پیل‌ها، قطب‌های هم‌نام به یکدیگر وصل می‌شوند (شکل ۹-۹). از اتصال موازی پیل‌ها زمانی استفاده می‌شود که جریان مورد نیاز بیش‌تر از میزان جریان‌دهی یک پیل باشد. در اتصال موازی پیل‌ها، مساوی بودن ولتاژ همه‌ی پیل‌ها ضروری است و ولتاژ ایجاد شده برابر ولتاژ هر یک از پیل‌هاست.



شکل ۹-۹ اتصال موازی پیل‌ها، در اتصال موازی پیل‌ها، باید ولتاژ دو سر پایانه‌های همه‌ی پیل‌ها یکسان باشد.

شکل ۹-۱۰ تعداد  $n$  پیل مشابه را نشان می‌دهد که به طور موازی به یکدیگر وصل شده‌اند. در این حالت نیز ولتاژ کل ایجاد شده با ولتاژ هر یک از پیل‌ها برابر است و جریان کل برابر مجموع جریان ایجاد شده توسط تک تک پیل‌هاست.

$n$  پیل مشابه که به طور موازی به یکدیگر وصل شده‌اند.



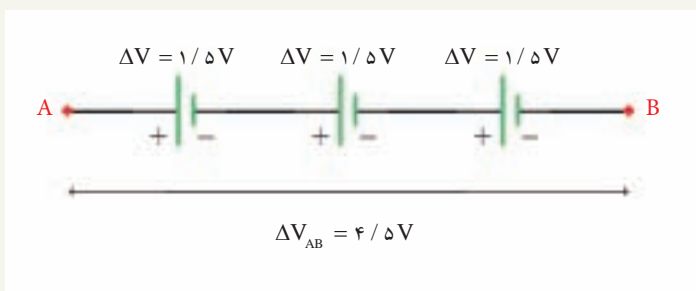
$$\Delta V_{AB} = \Delta V \quad \text{و} \quad I_T = nI$$

شکل ۹-۱۰

سه پیل مشابه ۱/۵ ولتی در اختیار داریم. این پیل‌ها را به گونه‌ای به یکدیگر متصل کنید که:  
 الف) ولتاژ ایجاد شده بیشینه باشد.  
 ب) جریان ایجاد شده بیشینه باشد.

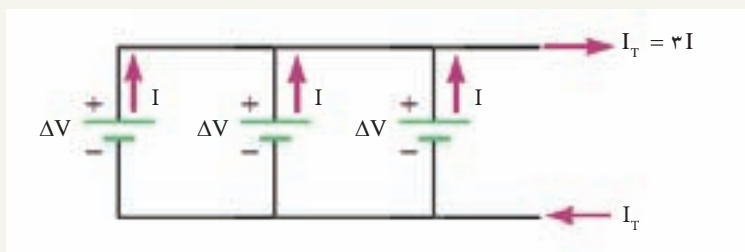
حل:

الف) برابر بیشینه شدن ولتاژ ایجاد شده باید پیل‌ها را به طور متوالی به یکدیگر ببندیم (شکل ۹-۱۱).

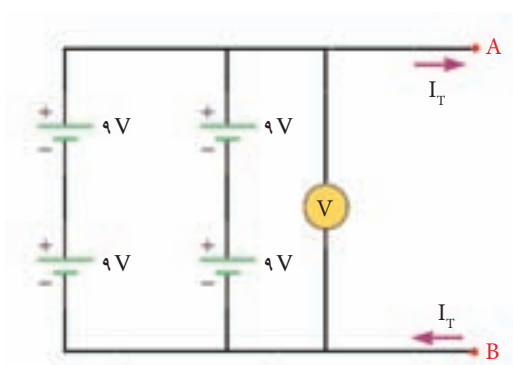


شکل ۹-۱۱

ب) برای بیشینه شدن جریان‌دهی پیل‌ها، لازم است آن‌ها را مطابق شکل ۹-۱۲ به طور موازی وصل کنیم.



شکل ۹-۱۲

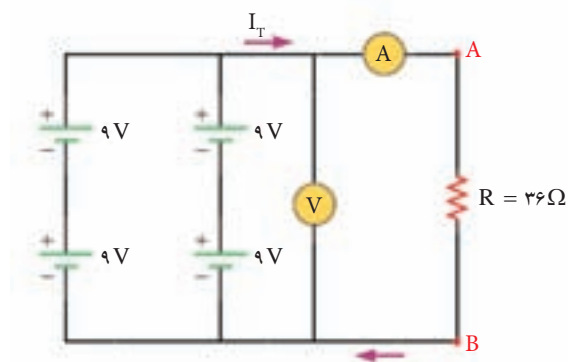


شکل ۹-۱۳ اتصال متوالی - موازی پیل‌ها

**اتصال متوالی - موازی:** یکی دیگر از روش‌هایی که می‌توان پیل‌ها را به یکدیگر وصل کرد اتصال ترکیبی یا متوالی - موازی است. در این صورت هم ولتاژ کل و هم جریان کل افزایش می‌یابد. شکل ۹-۱۳ نمونه‌ای ترکیبی از به هم بستن پیل‌ها را نشان می‌دهد. ولت‌سنج در این ترکیب، عدد ۱۸ ولت را می‌خواند.

اگر مطابق شکل ۹-۱۴ دو سر AB را به مقاومتی دلخواه (مثلاً  $36\Omega$ ) ببندیم جریانی که آمپرسنج می‌خواند برابر است با:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{18V}{36\Omega} = 0.5A$$

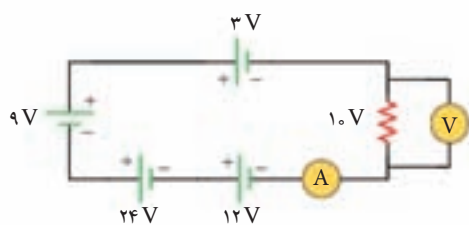


شکل ۹-۱۴

**توجه:** اگر هنگام اتصال موازی پیل‌ها، ولتاژ باتری‌ها با یکدیگر یکسان نباشد، باتری‌های با ولتاژ کم‌تر مانند مصرف کننده عمل می‌کنند و افزون بر این که در تولید جریان نقشی ندارند، جریان نیز دریافت می‌کنند.

## مثال ۹-۲

در مدار شکل ۹-۱۵ عددی را که آمپرسنج و ولت‌سنج می‌خوانند پیدا کنید.



شکل ۹-۱۵

**حل:**

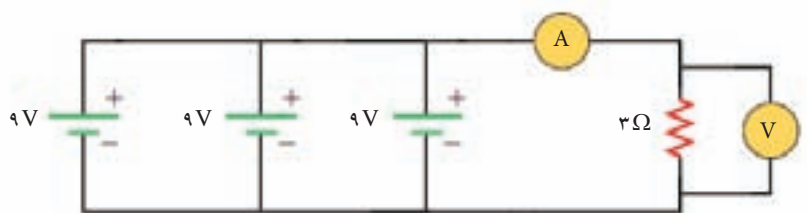
پیل‌ها به طور متوالی وصل شده‌اند و در نتیجه ولتاژ کل ایجاد شده برابر است با:

$$\Delta V = 3V + 9V + 24V + 12V = 48V$$

به این ترتیب ولت‌سنج عدد ۴۸ ولت را می‌خواند. عددی که آمپرسنج می‌خواند برابر است با:

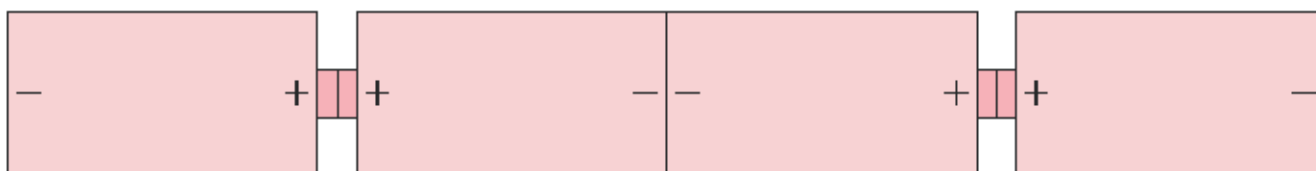
$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{48V}{10\Omega} = 4.8A$$

در مدار شکل ۹-۱۶ عددهایی را که آمپرسنج و ولتسنج می‌خوانند تعیین کنید.



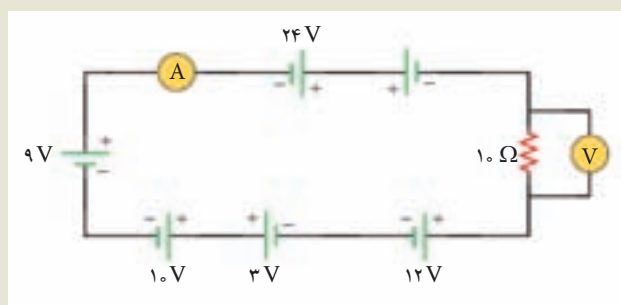
شکل ۹-۱۶

● **اتصال متقابل:** اگر هنگام اتصال متوالی پیل‌ها به یکدیگر، ترتیب خاصی در وصل کردن قطب‌های مثبت و منفی پیل‌ها رعایت نشود، گفته می‌شود که پیل‌ها به صورت متقابل به یکدیگر وصل شده‌اند (شکل ۹-۱۷). در اتصال متقابل پیل‌ها، ولتاژ کل کاهش می‌یابد. همچنین در این نوع اتصال مساوی بودن ولتاژ پیل‌ها ضرورتی ندارد.



شکل ۹-۱۷ هنگام اتصال متقابل پیل‌ها، ولتاژ کل کاهش می‌یابد و پیل‌هایی که قطب‌هایشان به صورت مخالف با بقیه بسته شده‌اند، مانند مصرف‌کننده‌ی جریان عمل می‌کنند.

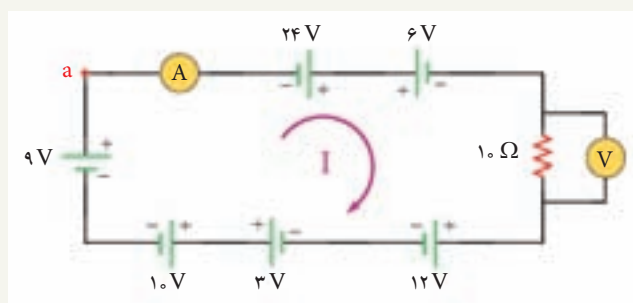
**توجه:** معمولاً پیل‌های با ولتاژ متفاوت را به صورت موازی یا متقابل به یکدیگر وصل نمی‌کنند؛ زیرا انرژی الکتریکی پیل‌هایی با ولتاژ بالاتر در پیل‌های با ولتاژ کم‌تر تخلیه می‌شود. اگر پیل‌ها قابل شارژ باشند، پیل‌های با ولتاژ کم‌تر توسط پیل‌های با ولتاژ بالاتر شارژ می‌شوند و اگر پیل‌ها غیر قابل شارژ باشند، انرژی الکتریکی در پیل‌های ضعیف‌تر به صورت گرما تلف می‌شود.



شکل ۹-۱۸

در مدار شکل ۹-۱۸ مطلوب است:  
الف) عددی که ولت‌سنج می‌خواند.  
ب) عددی که آمپرسنج می‌خواند.

حل:



شکل ۹-۱۹

ابتدا یک جهت فرضی را برای جریان در مدار در نظر می‌گیریم و طبق آن در حلقه‌ی بسته حرکت می‌کنیم. اگر جهت پیکان جریان به قطب مثبت پیل وارد شود آن را مثبت و اگر به قطب منفی پیل وارد شود آن را منفی در نظر می‌گیریم. با توجه به انتخاب جهت فرضی جریان در شکل ۹-۱۹، از نقطه a شروع می‌کنیم و مدار را طی می‌کنیم تا دوباره به نقطه‌ی a برسیم.  
الف) با توجه به قرارداد انجام شده ولتاژ کل برابر است با:

$$\Delta V = -24V + 6V + 12V - 3V + 10V - 9V = -8V$$

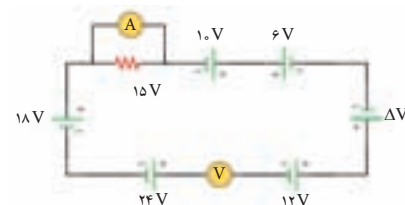
علامت منفی نشان می‌دهد که جهت واقعی جریان بر خلاف جهتی است که ما فرض کردیم. به این ترتیب عددی که ولت‌سنج می‌خواند ۸V است.

ب) با استفاده از رابطه‌ی  $\Delta V = RI$  داریم:

$$I = \frac{8V}{10\Omega} = 0.8A$$

### تمرین ۹-۲

در مدار شکل ۹-۲۰ ولت‌سنج عدد ۳ ولت را می‌خواند.  
الف) ولتاژ باتری سمت راست ( $\Delta V$ ) چه قدر است؟  
ب) آمپرسنج چه عددی را می‌خواند؟

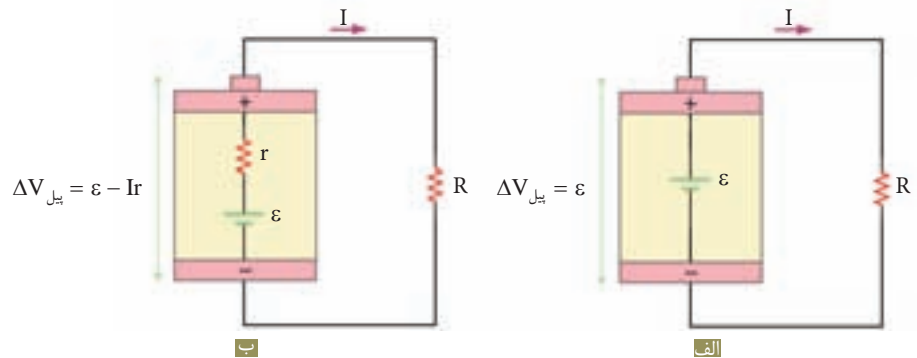


شکل ۹-۲۰



## ۴-۹ مقاومت داخلی پیل‌ها

شکل ۹-۲۱ الف یک پیل آرمانی را نشان می‌دهد که بدون هیچ اتلافی، انرژی لازم را برای شارش حامل‌های بار در مدار فراهم می‌کند. در پیل‌های آرمانی، اختلاف پتانسیل دو سر پایانه‌ها، درست برابر نیروی محرکه‌ی پیل است. شکل ۹-۲۱ ب یک پیل واقعی را نشان می‌دهد که دارای مقاومت داخلی  $r$  است. وجود مقاومت داخلی سبب می‌شود که همه‌ی انرژی پیل در اختیار حامل‌های بار قرار نگیرد و بخشی از آن به صورت گرما تلف شود. به همین جهت اختلاف پتانسیل دو سر پایانه‌های پیل‌های واقعی کم‌تر از نیروی محرکه‌ی پیل و برابر  $\Delta V_{\text{پیل}} = \varepsilon - Ir$  است.



شکل ۹-۲۱ (الف) در یک پیل آرمانی ولتاژ دو سر پایانه‌ها برابر نیروی محرکه‌ی پیل است، در حالی که در یک پیل واقعی (ب) ولتاژ دو سر پایانه‌ها کم‌تر از نیروی محرکه‌ی پیل است. به عبارت دیگر ولتاژی به اندازه‌ی  $Ir$  در پیل افت می‌کند و همین امر سبب کاهش ولتاژ ایجاد شده توسط پیل می‌شود.

از آنجا که در هر دو مدار شکل ۹-۲۱ اختلاف پتانسیل ایجاد شده توسط پیل، در دو سر مقاومت  $R$  افت می‌کند، با توجه به رابطه‌ی  $\Delta V = RI$ ، می‌توان جریان را در هر مدار به دست آورد.

در مدار شکل ۹-۲۱ الف داریم:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{\varepsilon}{R} \quad (۱-۸)$$

و در مدار شکل ۹-۲۱ ب داریم:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{\varepsilon - Ir}{R} \Rightarrow \varepsilon = I(R + r)$$

پس:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (۲-۸)$$



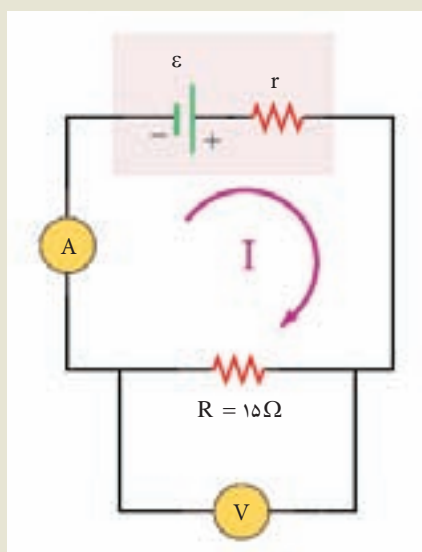
● اندازه گیری مقاومت داخلی دو پیل نو و کهنه

همان طور که رابطه های (۸-۱) و (۸-۲) نشان می دهند، جریان ایجاد شده توسط یک پیل آرمانی بیش تر از یک پیل واقعی است. در پیل های واقعی که در زندگی روزمره از آنها استفاده می کنیم، همواره مقداری افت ولتاژ در مقاومت داخلی پیل وجود دارد به طوری که با استفاده ی بیش تر از پیل، مقدار افت ولتاژ نیز افزایش می یابد. سرانجام با فرسوده شدن پیل، مقاومت داخلی پیل و در نتیجه افت ولتاژ دو سر آن، به قدری زیاد می شود که دیگر پیل قادر به برقرار کردن جریان در مدار نیست. پس می توان نتیجه گرفت که مقاومت داخلی پیل های نو، کم تر از مقاومت داخلی پیل های فرسوده است. در پیل های قابل شارژ، با گذراندن جریان در جهت مخالف جریان به هنگامی که پیل کار عادی اش را انجام می دهد، می توان باتری را «دوباره باردار» یا «پُر» کرد. در فرایند «پُر کردن» مقاومت داخلی کاهش می یابد و بار دیگر در پایانه های پیل انرژی پتانسیل ذخیره می شود.

**توجه:** اگر مقاومت  $R$  نسبت به مقاومت داخلی پیل ها خیلی بزرگ باشد، با تقریب خوبی می توان مقاومت داخلی پیل را نادیده گرفت.

#### مثال ۹-۴

در مدار شکل ۹-۲۲، آمپرسنج عدد  $1A$  را می خواند. اگر نیروی محرکه ی پیل  $16$  ولت باشد، مطلوب است:  
الف) عددی که ولت سنج می خواند.  
ب) مقاومت داخلی پیل.



شکل ۹-۲۲

حل:

الف) عددی که ولت سنج می‌خواند برابر افت ولتاژ در دو سر مقاومت  $R$  است. با استفاده از رابطه‌ی  $\Delta V = RI$  داریم:

$$\Delta V = (15\Omega)(1A) = 15V$$

ب) از آن‌جا که افت ولتاژ در دو سر مقاومت  $R$  با اختلاف پتانسیل ایجاد شده توسط پیل برابر است، می‌توان نوشت:

$$\Delta V = \varepsilon - Ir$$

یا:

$$15V = 16V - (1A)r \Rightarrow r = 1\Omega$$

با استفاده از رابطه‌ی (۸-۲) نیز به نتیجه‌ی مشابهی می‌رسیدیم.

اگر مطابق شکل ۹-۲۳،  $n$  پیل مشابه با مقاومت داخلی  $r$  به طور متوالی به یکدیگر وصل شوند و مجموعه‌ی آن‌ها را به مقاومت  $R$  وصل کنیم، جریان ایجاد شده در مدار

از رابطه‌ی  $I = \frac{n\varepsilon}{R + nr}$  به دست می‌آید.

همچنین اگر مطابق شکل ۹-۲۴،  $n$  پیل مشابه با مقاومت داخلی  $r$  به طور موازی به یکدیگر وصل شوند و مجموعه‌ی آن‌ها را به مقاومت  $R$  وصل کنیم، جریان ایجاد شده

در مدار از رابطه‌ی  $I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}}$  به دست می‌آید.

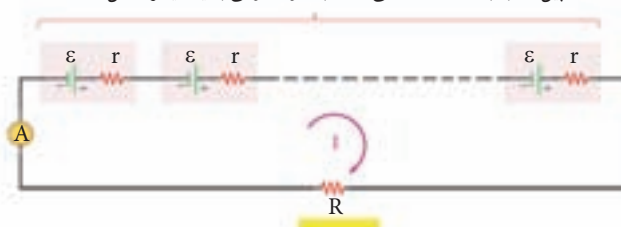
$n$  پیل مشابه با مقاومت داخلی  $r$  که به طور موازی به یکدیگر وصل شده‌اند.



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

فایل ۹-۲۴ اتصال موازی  $n$  پیل با مقاومت داخلی  $r$  به یکدیگر و با مقاومت  $R$ .

$n$  پیل مشابه با مقاومت داخلی  $r$  که به طور متوالی به یکدیگر وصل شده‌اند.

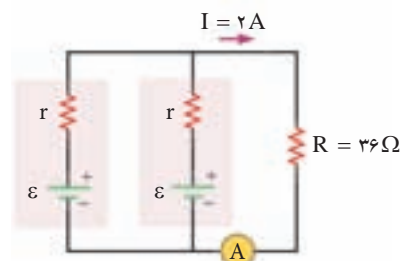


$$I = \frac{n\varepsilon}{R + nr}$$

فایل ۹-۲۳ اتصال متوالی  $n$  پیل با مقاومت داخلی  $r$  به یکدیگر و با مقاومت  $R$ .

### تمرین ۹-۴

در مدار شکل ۹-۲۵ پیل‌ها مشابه و مقاومت داخلی آن‌ها  $r = 0.5\Omega$  است. نیروی محرکه‌ی  $\varepsilon$  پیل‌ها چه قدر است؟



شکل ۹-۲۵



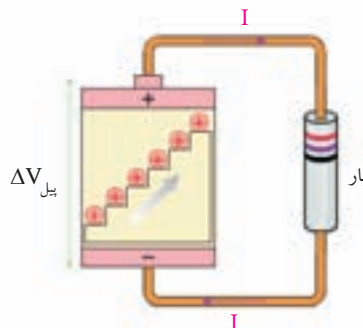
### پرسش‌های مفهومی

- ۱- به طور مشخص توضیح دهید چه تفاوتی بین پیل و باتری وجود دارد.
- ۲- الف) پیل‌ها به چند دسته تقسیم می‌شوند و مشخصه‌ی اصلی هر نوع چیست؟  
ب) شکل ۹-۲۶ یک باتری نیکل - کادمیوم را نشان می‌دهد. این باتری‌ها دارای چه ویژگی‌ای هستند و بیش‌ترین کاربرد آن‌ها در چه وسیله‌هایی است؟  
پ) منظور از عددهای  $1.2\text{ V}$  و  $7000\text{ mAh}$  که روی باتری شکل ۹-۲۶ درج شده است، چیست؟



شکل ۹-۲۶

- ۳- دریافت خود را از مدار شکل ۹-۲۷ بیان کنید.

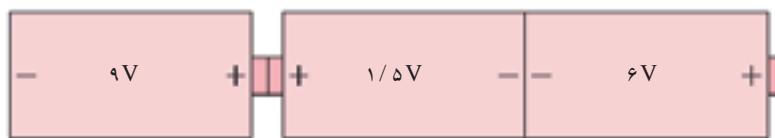


شکل ۹-۲۷

- ۴- الف) در اتصال متوالی پیل‌ها، کدام کمیت فیزیکی افزایش می‌یابد؟  
ب) در اتصال موازی پیل‌ها، شدت جریان کل چگونه تغییر می‌کند؟  
پ) تعدادی پیل مشابه در اختیار داریم. برای افزایش ولتاژ و شدت جریان کل چه نوع اتصالی را پیشنهاد می‌کنید؟
- ۵- الف) اگر چند پیل با ولتاژ متفاوت را به طور موازی به یکدیگر وصل کنیم، کدام یک از پیل‌ها در تولید جریان نقشی ایفا نمی‌کنند؟  
ب) چرا توصیه می‌شود پیل‌های با ولتاژ متفاوت را به طور موازی یا متقابل به یکدیگر وصل نکنید؟

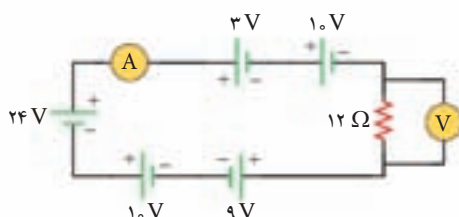
## مسئله‌ها

- ۱- تعداد ۵ پیل ۹ ولتی در اختیار داریم. این پیل‌ها را چگونه به یکدیگر ببندیم تا بیشینه‌ی اختلاف پتانسیل تأمین شود؟ مقدار این اختلاف پتانسیل چه قدر است؟
- ۲- ولتاژ ایجاد شده توسط مجموعه پیل‌های شکل ۹-۲۸ چه قدر است؟



شکل ۹-۲۸

- ۳- در مدار شکل ۹-۲۹ عددهایی را که ولت‌سنج و آمپرسنج می‌خوانند تعیین کنید.

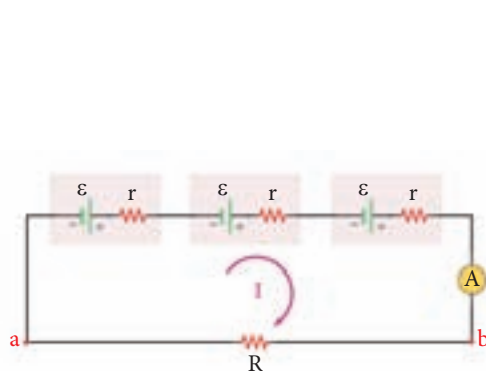


شکل ۹-۲۹

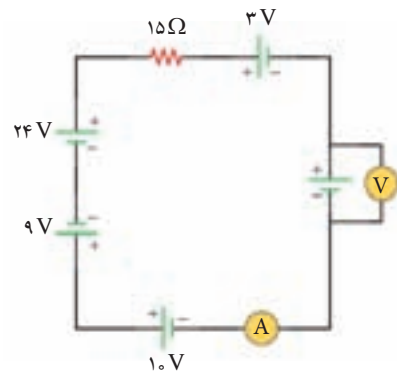
- ۴- در مدار شکل ۹-۳۰ آمپرسنج عدد  $5/0 A$  را می‌خواند. عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد چه قدر است؟
- ۵- در مدار شکل ۹-۳۱ همه‌ی پیل‌ها مشابه‌اند و آمپرسنج عدد  $2 A$  را می‌خواند. اگر داشته باشیم:

$$\varepsilon = 9V, \quad r = 1\Omega, \quad R = 20\Omega$$

- الف) اختلاف پتانسیل دو نقطه‌ی  $a$  و  $b$  ( $V_a - V_b$ ) چه قدر است؟
- ب) توان مصرف شده در مقاومت  $R$  چه قدر است؟

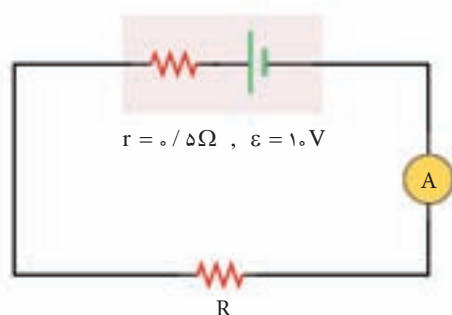


شکل ۹-۳۱



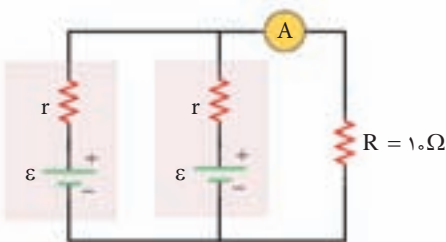
شکل ۹-۳۰

- ۶- بخشی از توان پیل‌های واقعی در مقاومت داخلی آن‌ها مصرف می‌شود. اگر توان مصرف شده در پیل مدار شکل ۹-۳۲، برابر ۲ وات باشد، مطلوب است:
- الف) عددی را که آمپرسنج می‌خواند.
- ب) مقاومت  $R$ .



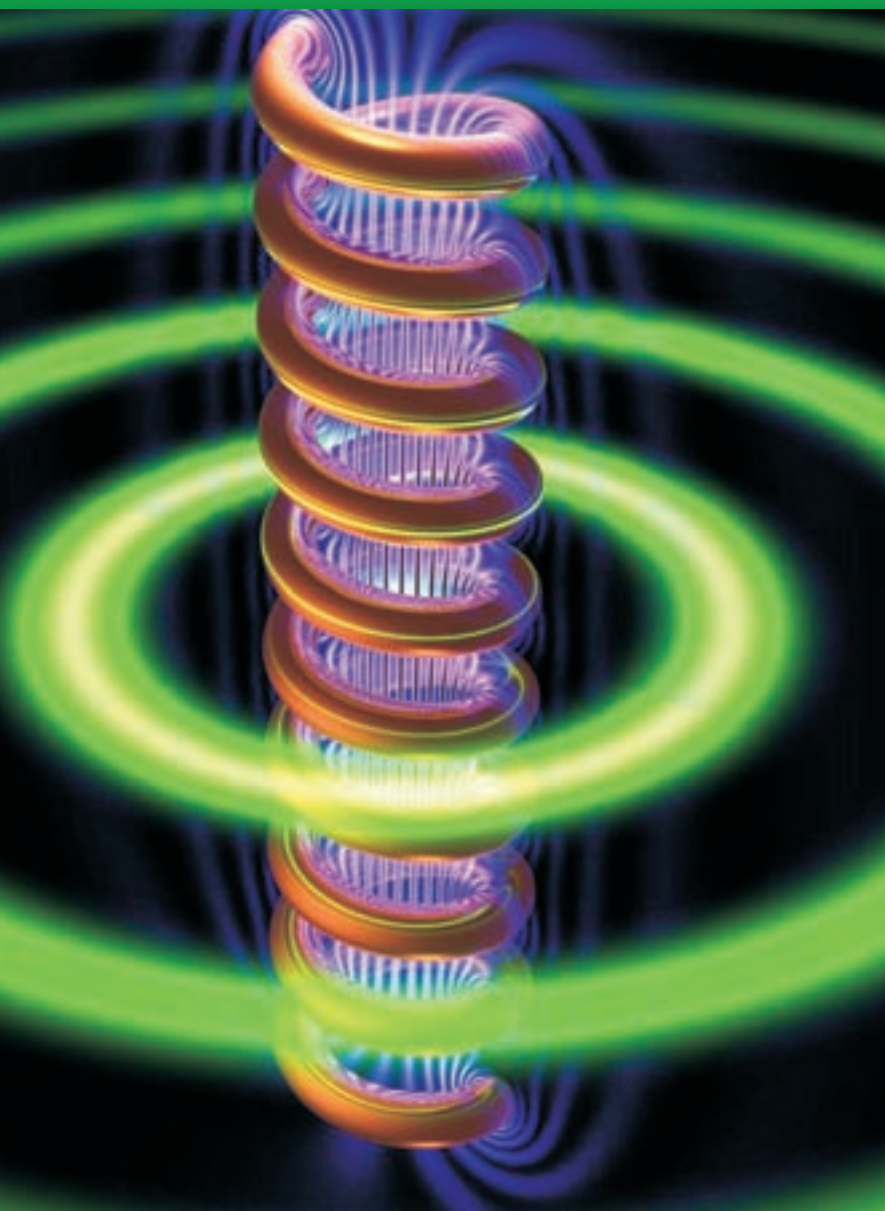
شکل ۹-۳۱

- ۷- در مدار شکل ۹-۳۳، توان تلف شده در هر پیل  $1\text{ W}$  و توان تلف شده در مقاومت  $R$  برابر  $20\text{ W}$  است. مطلوب است:
- الف) عددی که آمپرسنج می‌خواند.
- ب) مقاومت داخلی و نیروی محرکه‌ی هر پیل.



شکل ۹-۳۲

# مغناطیس



خواه سیم راست باشد، و خواه به صورت پیچه یا سیملوله‌ی بلندی درآمده باشد، با عبور جریان از آن، میدان‌های مغناطیسی در اطراف خود به وجود می‌آورد. این میدان‌ها که بر اثر حرکت بارهای الکتریکی به وجود می‌آیند، می‌توانند بر هر ذره‌ی باردار متحرکی نیرو وارد کنند.

## سپمای فصل دهم

- ۱-۱۰ تاریخچه ی مغناطیس
- ۲-۱۰ قطب های مغناطیسی
- ۳-۱۰ القای مغناطیسی
- ۴-۱۰ میدان مغناطیسی
- ۵-۱۰ میدان مغناطیسی زمین
- ۶-۱۰ خواص مغناطیسی مواد
- ۷-۱۰ الکترومغناطیس
- ۸-۱۰ نیروی محرکه ی القایی و تولید برق
- ارزشیابی فصل دهم



## مفاهیم پایه آموزشی

با مطالعه این فصل، شما فرا می‌گیرید:

- استفاده‌ی بشر از مغناطیس و آهنربا به چه زمانی باز می‌گردد.
- قطب‌های مغناطیسی چگونه تعیین می‌شوند.
- القای مغناطیسی چیست.
- مفهوم میدان مغناطیسی و یکای آن چیست.
- ویژگی‌های میدان مغناطیسی زمین چیست.
- مواد از نظر مغناطیسی به چند رده تقسیم می‌شوند و هر رده چه ویژگی‌هایی دارند.
- آثار مغناطیسی جریان چیست.
- نیروی محرکه‌ی القایی چگونه تولید می‌شود.
- اساس کار مولدهای ساده چیست.

## مغناطیس و القای الکترومغناطیسی

کاربرد مغناطیس و آهنرباها در جنبه‌های مختلف زندگی بشر رشدی روزافزون دارد. برای بیش از یک قرن ضبط صدا و تصویر روی صفحه‌ها و نوارهایی صورت می‌گرفت که مغناطیس نقش اصلی را در آنها ایفا می‌کرد. گرچه فناوری‌های دیجیتال به میزان زیادی جایگزین ضبط مغناطیسی شده است، با این حال ذخیره‌ی اطلاعات به صورت صفر و یک هنوز هم به محیط‌های مغناطیسی‌ای وابسته است که دستگاه‌های پخش CD و DVD و دیسک‌ران‌های سخت‌افزار رایانه‌ها را کنترل می‌کنند. آهنرباها همچنین در بلندگوی گوشی‌ها، تلویزیون‌ها، رایانه‌ها و اغلب سامانه‌های هشدار ایمنی، زنگ درها و قفل درهای خودکار کاربرد دارند. پزشکی امروز نیز در تشخیص بیماری‌ها و جراحی‌های مختلف بهره‌ی فراوانی از مغناطیس و آثار آن می‌برد.

### ۱-۱-۰ تاریخچه‌ی مغناطیس

آهنرباها تاریخی باستانی دارند، و از پیش از ۸۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در نوشته‌های یونانی ظاهر شده‌اند. مدارک نشان می‌دهند که سنگ معدن مگنتیت (آهنرباهای طبیعی) که اکسید آهن مغناطیسی است در منطقه‌ی ماگنسیا<sup>۱</sup> در یونان باستان استخراج می‌شده است. این سنگ‌ها ویژگی غیر عادی‌ای داشتند که منجر به جذب قطعه‌های آهن می‌شد (شکل ۱-۱۰).



شکل ۱-۱۰ این سنگ‌های موسوم به آهنربای طبیعی، قادر به جذب قطعه‌های آهنی هستند.

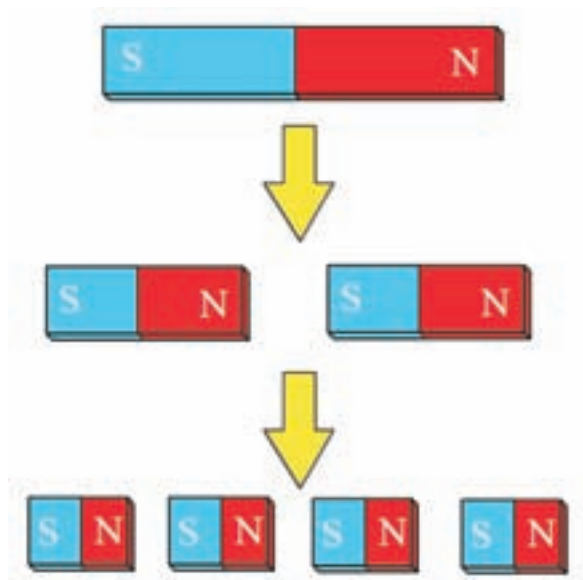


بعضی بر این باورند که از ۲۶ قرن پیش از میلاد مسیح در چین از آهنربا به عنوان قطب‌نما استفاده می‌شده است، در حالی که بعضی معتقدند که آهنربا در قرن دوازدهم میلادی از سرزمین‌های اسلامی به چین رفته است. در سال ۱۶۰۰ ویلیام گیلبرت، دانشمند انگلیسی، در این مورد اطلاعات کافی داشته و کتابی را با عنوان آهنربا<sup>۱</sup> منتشر کرده است.

## ۱۰-۲ قطب‌های مغناطیسی

هر گاه آهنربایی را به درون ظرفی محتوی براده‌ی آهن فرو ببریم، مشاهده می‌کنیم که براده‌های آهن به مقدار زیادی جذب ناحیه‌های خاصی از آهنربا می‌شوند. این ناحیه‌ها، قطب‌های مغناطیسی یا قطب‌های آهنربا نامیده می‌شوند. قطب‌ها، قوی‌ترین ناحیه‌های مغناطیسی هر آهنربا هستند.

هر آهنربا، به هر اندازه‌ای که باشد، دو قطب دارد: قطب شمال (N) و قطب جنوب (S). اگر یک آهنربای میله‌ای را دو قسمت کنید، هر قسمت آن دوباره آهنربایی است با دو قطب (شکل ۱۰-۲). اگر باز هم آن‌ها را دو قسمت کنید چهار آهنربای کامل خواهید داشت. می‌توانید تقسیم کردن را ادامه دهید، ولی هرگز یک قطب تنها یا به عبارتی دیگر تک‌قطبی مغناطیسی نخواهید داشت. حتی وقتی قطعه‌ی شما به اندازه‌ی یک اتم برسد، دو قطب دارد، که نشان می‌دهد خود اتم نیز آهنربا است.

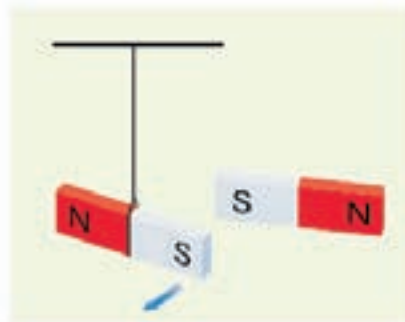
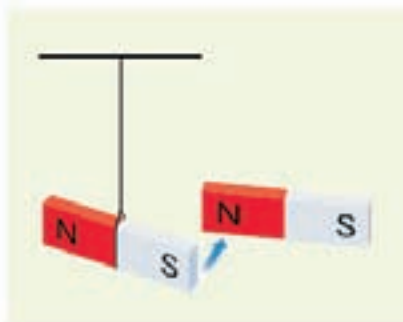
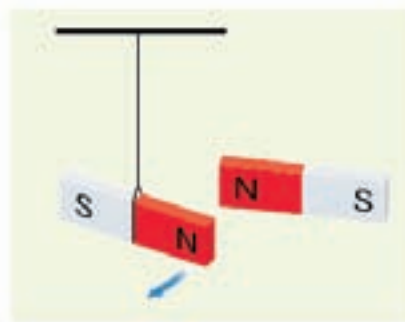
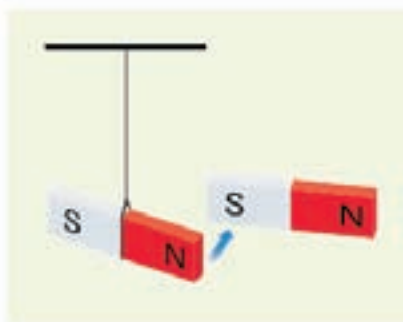


شکل ۱۰-۲ شکستن یک آهنربای میله‌ای به دو قسمت. هر قسمت یک آهنربای کامل است که دارای دو قطب است.



- تک قطبی مغناطیسی
- مغناطیس درمانی

وقتی قطب‌های همنام دو آهنربا را به یکدیگر نزدیک کنید، یکدیگر را دفع می‌کنند (شکل ۱۰-۳ الف)، اما اگر قطب‌های ناهمنام را به یکدیگر نزدیک کنید، یکدیگر را جذب خواهند کرد (شکل ۱۰-۳ ب).



ب

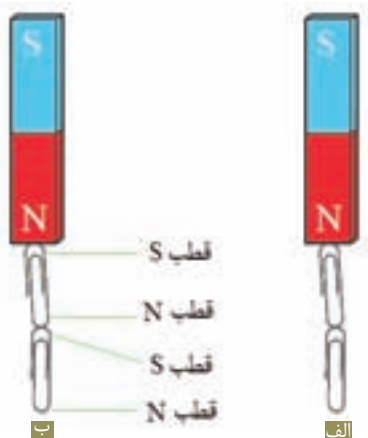
الف

شکل ۱۰-۳ الف) قطب‌های همنام یکدیگر را دفع و ب) قطب‌های ناهمنام یکدیگر را جذب می‌کنند.

به نظر شما چه تفاوت بسیار مهمی بین قطب‌های مغناطیسی و بارهای الکتریکی وجود دارد؟

### ۱۰-۳ القای مغناطیسی

شکل ۱۰-۴ الف آهنربایی را نشان می‌دهد که دو گیره فلزی کاغذ را جذب کرده است. این آزمایش ساده نشان می‌دهد که خاصیت مغناطیسی در گیره‌های فلزی القا شده است و تا زمانی که گیره‌ها با آهنربا در تماس باشند، این خاصیت را در خود حفظ می‌کنند. این پدیده را القای خاصیت مغناطیسی می‌نامند. خاصیت آهنربایی در اثر القای مغناطیسی همواره به صورتی است که قطعه‌های فلزی جذب آهنربای اصلی می‌شوند (شکل ۱۰-۴ ب).

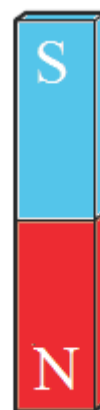


الف

ب

شکل ۱۰-۴ الف) وقتی آهنربایی در نزدیک گیره‌های فلزی قرار می‌گیرد، در آن‌ها خاصیت مغناطیسی القا شده و جذب آهنربا می‌شوند. ب) در پدیده‌ی القای مغناطیسی، همواره جذب وجود دارد. (به قطب‌های القا شده در گیره‌ها توجه کنید.)

القای مغناطیسی تنها در فلزهایی نظیر آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهایی از این فلزها ایجاد شده و جذب آهنربا می‌شوند. اگر آهنربایی را مطابق شکل ۱۰-۵ به یک سکه‌ی برنجی نزدیک کنیم، هیچ جذبی رخ نمی‌دهد.

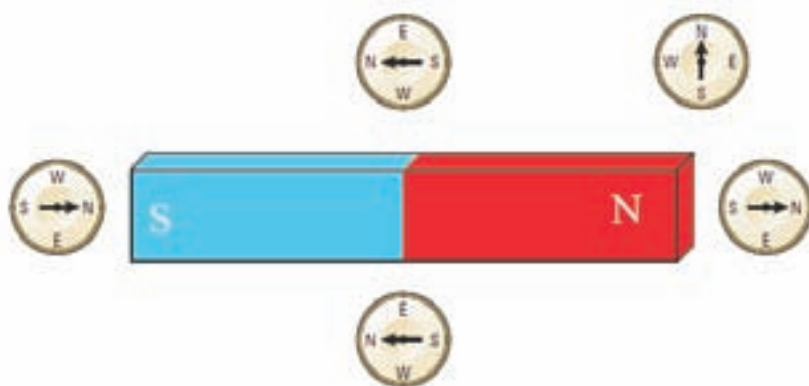


**توجه:** پدیده‌ی القای خاصیت مغناطیسی را با پدیده‌ای القای الکترومغناطیسی که در ادامه‌ی همین فصل با آن آشنا خواهیم شد، اشتباه نگیرید!

## ۱۰-۴ میدان مغناطیسی

مشابه میدان الکتریکی در فضای اطراف بارهای الکتریکی، فضای اطراف هر آهنربا نیز حاوی میدان مغناطیسی است. میدان مغناطیسی را با نماد  $B$  نمایش می‌دهیم و همانند میدان الکتریکی، دارای بزرگی و جهت است.

به کمک قطب‌نما می‌توان جهت میدان مغناطیسی را در هر نقطه در فضای اطراف یک آهنربا تعیین کرد (شکل ۱۰-۶). همان‌طور که جهت‌گیری عقربه‌ی قطب‌نما نشان می‌دهد، جهت میدان مغناطیسی در نقاط مختلف یک آهنربا متفاوت است.



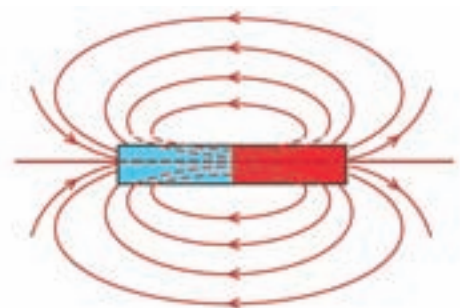
شکل ۱۰-۶ تعیین جهت میدان مغناطیسی به کمک قطب‌نما.

با تعیین جهت میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای اطراف آهنربا، می‌توان همان‌گونه که برای میدان‌های الکتریکی انجام دادیم، خط‌های میدان مغناطیسی را رسم کنیم. شکل ۱۰-۷ الف خط‌های میدان را در اطراف یک آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد. همه‌ی این خط‌ها از آهنربا می‌گذرند، و همه‌ی آن‌ها حلقه‌ی بسته‌ای را تشکیل می‌دهند. در نزدیکی قطب‌های آهنربا خط‌های میدان دارای بیش‌ترین فشردگی هستند.

شکل ۷-۱۰ ب طرح خط‌های میدان مغناطیسی به کمک براده‌های آهن نشان داده شده است.



ب



الف

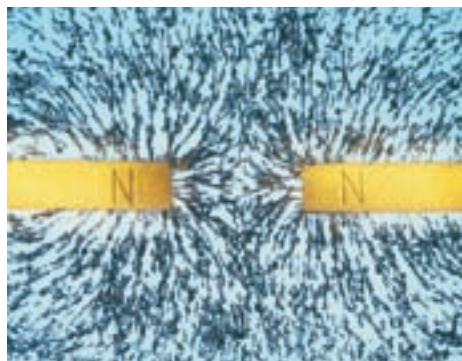
شکل ۷-۱۰ (الف) خط‌های میدان مغناطیسی در هر نقطه در جهت عقربه‌ای مغناطیسی هستند. افزون بر این، خط‌های میدان از قطب شمال (N) خارج شده و به قطب جنوب (S) وارد می‌شوند و حلقه‌ای بسته‌ای را تشکیل می‌دهند. (ب) منظره‌ای براده‌های آهن پاشیده شده روی یک آهنربای میله‌ای.

وقتی دو آهنربای میله‌ای نزدیک یکدیگر قرار می‌گیرند، میدان‌های مغناطیسی آن‌ها بر یکدیگر اثر می‌گذارند. شکل ۸-۱۰ دو نوع متفاوت همپوشانی میدان‌های مغناطیسی را نشان می‌دهد.

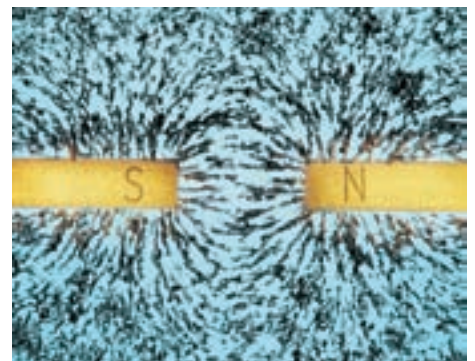
#### شبیه‌سازی



- جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی اطراف یک آهنربا
- آهنربای میله‌ای
- آهنربای نعلی شکل
- برابند میدان‌های مغناطیسی



ب



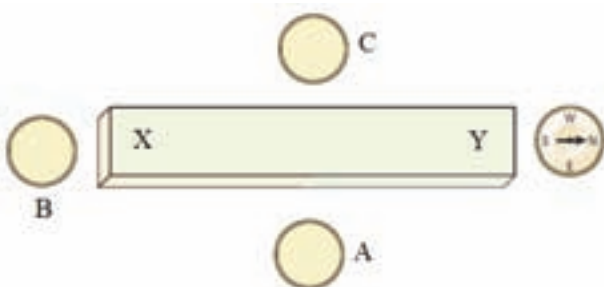
الف

شکل ۸-۱۰ طرح‌های میدان مغناطیسی برای یک جفت آهنربا. (الف) قطب‌های ناهمنام نزدیک یکدیگرند (جاذبه)، و (ب) قطب‌های همنام نزدیک یکدیگرند (دافعه).

#### پرسش مفهومی ۲-۱۰

شکل ۹-۱۰ یک آهنربای میله‌ای و ۴ عقربه‌ی مغناطیسی را نشان می‌دهد که جهت‌گیری یکی از آن‌ها مشخص شده است.

الف) کدام سر میله قطب S و کدام سر قطب N است؟  
ب) جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی را در نقطه‌های A، B و C تعیین کنید.



شکل ۹-۱۰

## یکای میدان مغناطیسی

یکای میدان مغناطیسی در SI، تسلا نام دارد و با نماد T نشان داده می‌شود. در جدول ۱۰-۱ بزرگی میدان‌های مغناطیسی‌ای آمده است که در چند وضعیت مختلف رخ می‌دهند.

تسلا یکای بسیار بزرگی است و در کاربردهای عملی و مهندسی از یکای کوچک‌تری استفاده می‌کنند که گاوس نام دارد و با نماد G نمایش داده می‌شود. هر تسلا برابر ۱۰۰۰۰ گاوس یا  $10^4$  گاوس است ( $1T = 10^4 G$ ).

جدول ۱۰-۱ بزرگی برخی از میدان‌های مغناطیسی

بزرگی میدان مغناطیسی (T)	وضعیت فیزیکی
$10^{-14}$	کم‌ترین مقدار در اتاقی که به‌طور مغناطیسی محافظت شده است.
$5 \times 10^{-5}$	در سطح زمین
$10^{-2}$	نزدیک یک آهنربای میله‌ای کوچک
۱/۵	نزدیک یک آهنربای الکتریکی بزرگ
۱۵	داخل دستگاه MRI
۴۰	بزرگ‌ترین میدانی که دانشمندان روسی زمین ایجاد کرده‌اند.
$10^8$	در سطح یک ستاره‌ی نوترونی

با توجه به جدول ۱۰-۱ ببینید بزرگی میدان مغناطیسی زمین در سطح آن چند گاوس است.

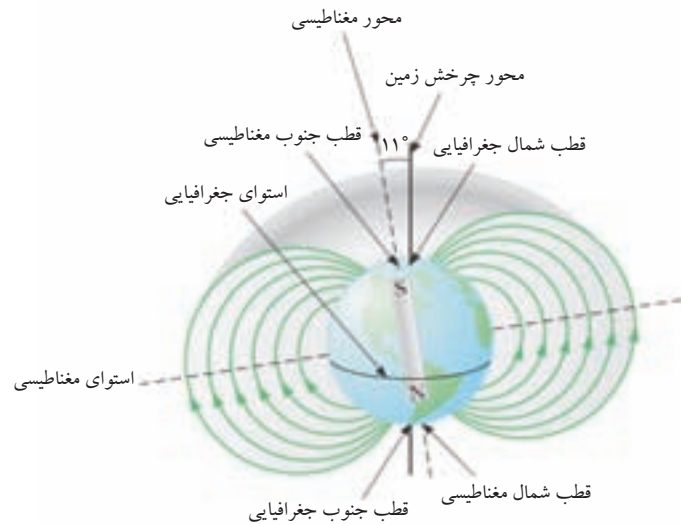
## ۱۰-۵ میدان مغناطیسی زمین

زمین خود یک آهنربای عظیم است و طرح میدان مغناطیسی آن مانند یک آهنربای میله‌ای بزرگ است که نزدیک مرکز زمین قرار گرفته است (شکل ۱۰-۱). قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. در واقع، قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین فاصله‌ی نسبتاً زیادی از هم دارند. مثلاً قطب جنوب مغناطیسی تقریباً در فاصله‌ی ۱۸۰۰ کیلومتری قطب شمال جغرافیایی قرار دارد. این بدان معناست که عقربه‌ی قطب‌نما معمولاً در جهت شمال واقعی جغرافیایی قرار نمی‌گیرد. اختلاف بین





سمت گیری عقربه‌ی قطب مغناطیسی و شمال واقعی به میل مغناطیسی معروف است.



شکل ۱۰-۱۰ طرح میدان مغناطیسی زمین. نشان دادن خط‌های میدان مغناطیسی زمین به صورت خط‌های میدان یک آهنربای میله‌ای، تنها یک توجیه ساده از ساختار پیچیده و ناشناخته‌ی عوامل ایجاد میدان مغناطیسی زمین است.

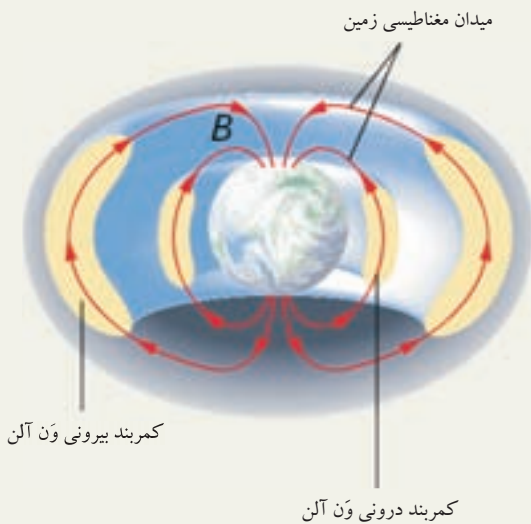
## مطالعه‌ی آزاد

### کمرندهای تابشی ون آلن

در عالم، ذره‌های باردار بسیار زیادی به‌طور سرگردان و با سرعت‌های فوق‌العاده زیادی در حرکت‌اند. این ذره‌ها را پرتوهای کیهانی می‌نامند و از پروتون‌ها، هسته‌ی اتم هلیوم (ذره‌ی آلفا)، الکترون‌های پرانرژی و ... تشکیل شده‌اند. این ذره‌ها، افزون بر این که برای فضاوردان خطرناک‌اند، برای دستگاه‌های الکترونیکی موجود در فضا نیز خطرناک‌اند. خوشبختانه برای ما در سطح زمین، بیش‌تر این ذره‌های باردار را میدان مغناطیسی زمین منحرف می‌کند. بعضی از آن‌ها در دور دست‌های میدان مغناطیسی زمین به دام می‌افتند و کمرندهای تابشی ون آلن را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۰-۱۱).

کمرندهای تابشی ون آلن از دو حلقه به شکل کلوچه‌ی میان‌تهی در اطراف زمین تشکیل شده‌اند و در سال ۱۹۵۸ به نام ون آلن، که از داده‌های گردآوری شده توسط ماهواره‌ی اکسپلورر I به وجود آن‌ها پی برد، نامگذاری شدند.

فضاوردان در فاصله‌های ایمن بسیار پایین‌تر از این کمرندهای تابشی دور زمین می‌گردند.



شکل ۱۰-۱۱ مقطع کمرندهای تابشی ون آلن (Van Allen)، بدون آن که بادهای خورشیدی آن را واپیچیده کند.

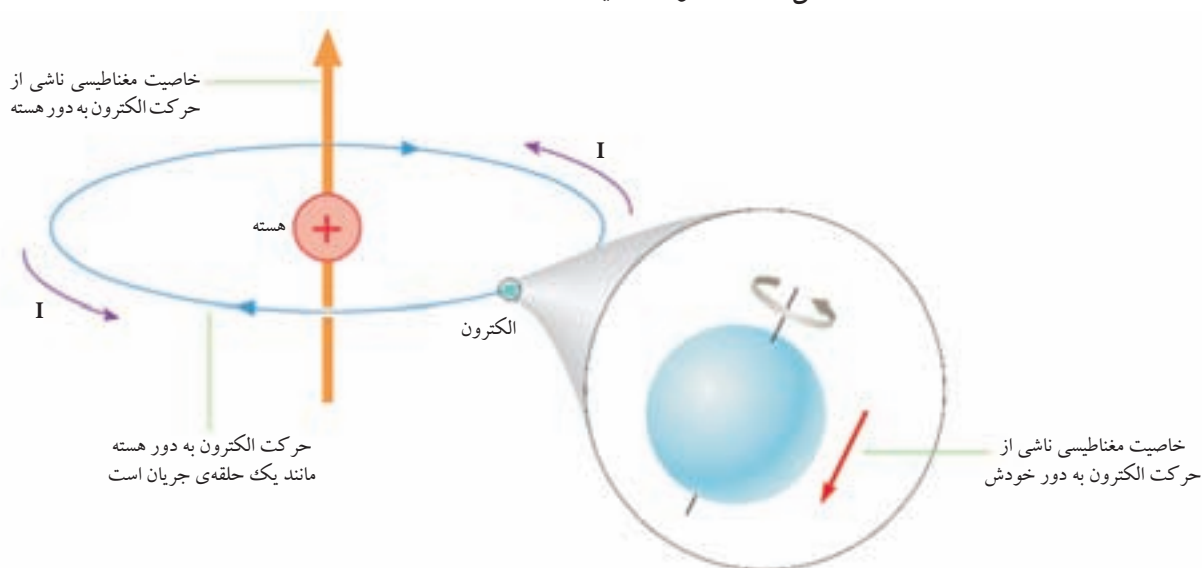
توفان‌های خورشیدی ذره‌های باردار را به صورت فواره‌های عظیمی پرتاب می‌کنند که بسیاری از آن‌ها از نزدیک زمین می‌گذرند و در میدان مغناطیسی آن به دام می‌افتند. شفق شمالی (نورهای شمالی) پدیده‌ی زیبایی است که بر اثر برخورد ذره‌های باردار موجود در کمربند ون آلن با مولکول‌های جوی به وجود می‌آید (شکل ۱۰-۱۲). در نیمکره‌ی جنوبی، این پدیده شفق جنوبی نامیده می‌شود.



شکل ۱۰-۱۲

## ۱۰-۶ خواص مغناطیسی مواد

همان‌طور که پیش از این دیدیم، کوچک‌ترین جزء سازنده‌ی ماده، یعنی اتم، منشأ خاصیت مغناطیسی برخی از مواد است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، به شکل ۱۰-۱۳ توجه کنید.



شکل ۱۰-۱۳ چرخش الکترون به دور هسته و به دور خودش، منشأ خاصیت مغناطیسی الکترون‌ها در اتم است. همان‌طور که دیده می‌شود سهم خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون‌ها به دور هسته، بیش‌تر از سهم ناشی از حرکت الکترون‌ها به دور خودشان است.

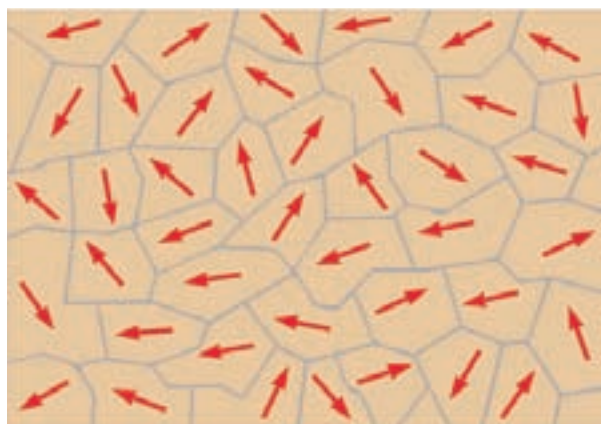
در این شکل اتمی شامل یک الکترون نشان داده شده است که افزون بر چرخیدن به دور هسته، به دور خودش نیز می‌چرخد. در واقع، منشأ مغناطیسی اتم ناشی از این دو نوع حرکت الکترون است. به این ترتیب می‌توان گفت هر الکترون چرخان، یک آهنربای ریز است. اگر اتم، یک جفت الکترون داشته باشد که در یک جهت بچرخند، آهنربای قوی‌تری را به وجود می‌آورند. اما اگر یک جفت الکترون در



جهت‌های مخالف یکدیگر بچرخند، بر ضد هم عمل می‌کنند و اثر مغناطیسی یکدیگر را خنثا می‌کنند. به همین سبب است که برخی از مواد خاصیت مغناطیسی از خود بروز می‌دهند و برخی دیگر دارای خواص مغناطیسی نیستند. برای مثال، در مواردی مانند آهن، نیکل و کبالت خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون‌های هر اتم، اثر یکدیگر را کاملاً خنثا نمی‌کنند و تک‌تک اتم‌های این گونه مواد دارای خاصیت مغناطیسی ذاتی هستند.

مواد از نظر مغناطیسی به سه نوع کلی فرومغناطیس، پارامغناطیس و دیامغناطیس تقسیم می‌شوند، که در ادامه به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت.

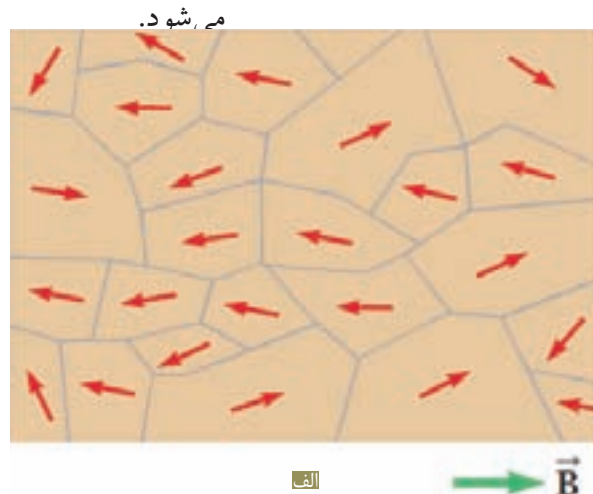
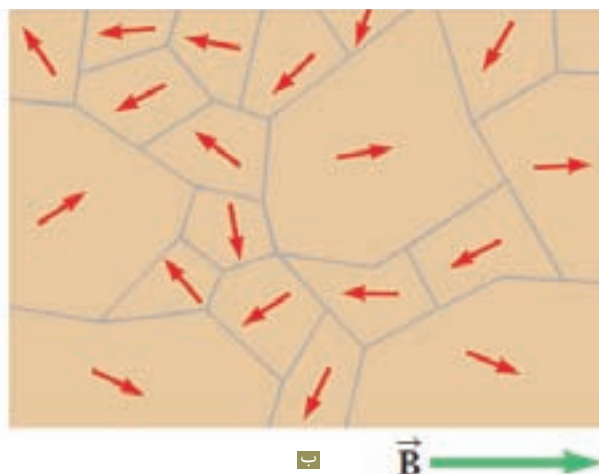
### فرومغناطیس



شکل ۱۰-۱۴ هر حوزه از میلیاردها اتم با میدان مغناطیسی همسو تشکیل شده است. پیکان‌ها در جهت مختلف نشان می‌دهند که میدان مغناطیسی این حوزه‌ها همسو نشده است و ماده در مجموع خاصیت مغناطیسی از خود نشان نمی‌دهد.

آهن، کبالت، نیکل، گادولینیوم، دیسپروزیوم و آلیاژهایی که شامل این عناصر هستند خاصیت فرومغناطیسی از خود بروز می‌دهند. همان‌طور که گفته شد تک‌تک اتم‌های این عناصر به‌طور ذاتی دارای خاصیت مغناطیسی هستند. وقتی اتم‌های این عناصر در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، میدان مغناطیسی هر اتم بر میدان مغناطیسی اتم دیگر تأثیر می‌گذارد و سبب می‌شود تا میدان مغناطیسی تعداد زیادی از اتم‌های مجاور هم در یک امتداد قرار بگیرند و تشکیل حوزه‌های مغناطیسی بدهند. هر حوزه‌ی مغناطیسی از میلیاردها اتم تشکیل شده است که میدان مغناطیسی آن‌ها در یک امتداد است. شکل ۱۰-۱۴ منظره‌ی میکروسکوپی حوزه‌های مغناطیسی را در مواد فرومغناطیس نشان می‌دهد.

اگر یک ماده‌ی فرومغناطیسی در مجاورت یک میدان مغناطیس خارجی قرار گیرد، بر اثر القای مغناطیسی، جهت میدان مغناطیس هر حوزه به جهت میدان خارجی متمایل می‌شود و حجم حوزه‌هایی که در جهت میدان خارجی قرار می‌گیرد رشد می‌کند (یعنی با میدان خارجی همسو می‌شوند). شکل ۱۰-۱۵ الف و ب وضعیت حوزه‌های یک ماده‌ی فرومغناطیس را در حضور دو میدان مغناطیسی خارجی ضعیف و قوی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود هر چه میدان مغناطیسی خارجی قوی‌تر باشد، حجم حوزه‌هایی که بر اثر القای مغناطیسی در جهت میدان قرار می‌گیرند بیش‌تر



شکل ۱۰-۱۵ جابه‌جا شدن مرزهای بین حوزه‌ها در مواد فرومغناطیس در حضور میدان مغناطیس خارجی. (الف) در حضور میدان خارجی ضعیف و (ب) در حضور میدان مغناطیسی قوی.

در برخی مواد فرومغناطیس، مانند آهن خالص، در حضور میدان خارجی حجم حوزه‌ها به سهولت تغییر می‌کند و در نتیجه بر اثر القای مغناطیسی آهنربا می‌شوند. این گونه مواد را فرومغناطیس نرم می‌نامند؛ زیرا پس از حذف میدان خارجی  $\vec{B}$ ، دوباره خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهند. از این گونه مواد در ساخت آهنرباهای الکتریکی (آهنرباهای غیر دائم) استفاده می‌شود.

در برخی دیگر از مواد فرومغناطیس، مانند فولاد (آهن به اضافه‌ی ۲ درصد کربن)، حجم حوزه‌ها سخت‌تر تغییر می‌کند. این مواد را فرومغناطیس سخت می‌نامند؛ زیرا برای القای خاصیت مغناطیسی در آن‌ها به میدان‌های خارجی قوی‌تر نیاز است. پس از حذف میدان مغناطیسی خارجی  $\vec{B}$ ، ماده فرومغناطیس سخت خاصیت آهنربایی خود را حفظ می‌کند. به همین دلیل این مواد برای ساختن آهنرباهای دائم مناسب‌اند. با گرم کردن مواد فرومغناطیس سخت یا ضربه‌زدن به آن‌ها، می‌توان خاصیت آهنربایی را در آن‌ها از بین برد. برای مثال اگر دمای یک فرومغناطیس سخت فولادی را که آهنربا شده است تا ۷۷۰ درجه‌ی سلسیوس بالا ببریم، خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهد و پس از سرد شدن دیگر خاصیت مغناطیسی از خود بروز نمی‌دهد.

## پارا مغناطیس

اتم‌های برخی از مواد مانند منگنز، پلاتین، آلومینیوم، اکسیژن و ... به‌طور کمی دارای خاصیت مغناطیسی هستند. از آنجا که در این مواد اثر مغناطیسی هر اتم بر اتم

### شبیه‌سازی



- حوزه‌های مغناطیسی در یک ماده
- فرومغناطیس و اثر میدان مغناطیسی بر آن‌ها

### فعالیت عملی



- القای مغناطیسی



شکل ۱۰-۱۶ سمت‌گیری میدان مغناطیسی هر اتم در مواد پارامغناطیس به‌طور تصادفی و کاتوره‌ای است.

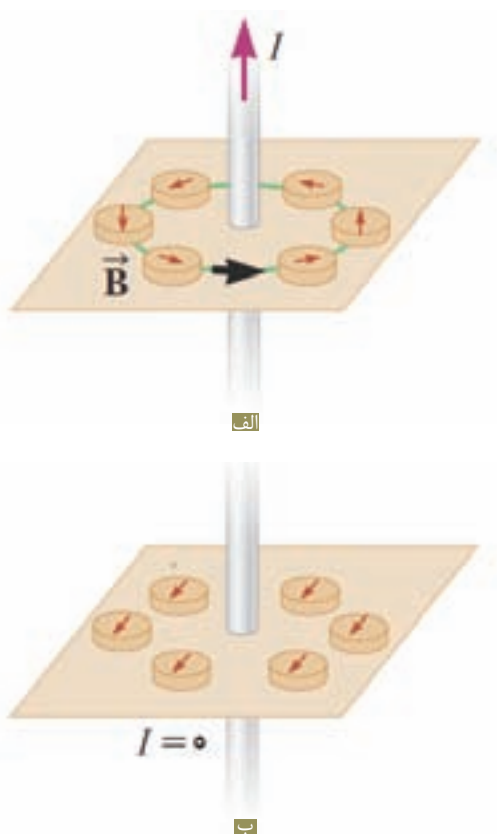
مجاور خود ضعیف است، مانند مواد فرومغناطیس قادر به تشکیل حوزه‌های مغناطیسی نیستند و جهت‌گیری میدان مغناطیسی هر اتم مطابق شکل ۱۰-۱۶ به‌طور تصادفی و کاتوره‌ای است. اگر این مواد را در مجاورت میدان‌های مغناطیسی خارجی قوی قرار دهیم، تنها اندکی خاصیت مغناطیسی در آن‌ها القا می‌شود. معمولاً این مواد را در رده‌ی مواد غیر مغناطیسی قرار می‌دهند.

## دیامغناطیس

دیامغناطیس، خاصیتی است که همه‌ی مواد معمولی از خود بروز می‌دهند و اتم‌های مواد سعی می‌کنند تا با حضور میدان مغناطیسی خارجی مخالفت کنند. این خاصیت در مواد فرومغناطیس آنچنان ضعیف است که عملاً در حضور میدان‌های مغناطیسی خارجی پنهان می‌ماند. عبارت ماده‌ی دیامغناطیسی معمولاً اشاره به ماده‌ای دارد که فقط خاصیت دیامغناطیسی از خود بروز می‌دهد. در موادی نظیر بیسموت، بریلیم، شیشه، متان و کربن دی‌اکسید خاصیت دیامغناطیسی به خوبی نمایان می‌شود.

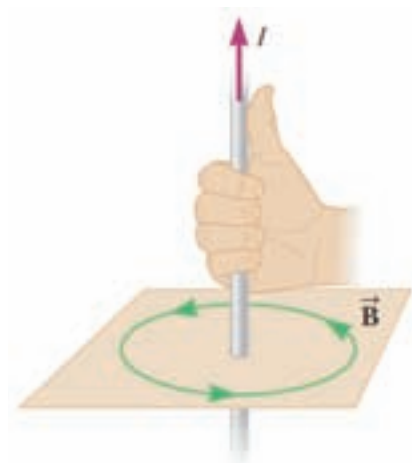
## ۱۰-۷ الکترومغناطیس

اگر جریان  $I$  از سیمی عبور کند، در اطراف آن میدان مغناطیسی نسبتاً ضعیفی به وجود می‌آید. با قرار دادن تعدادی قطب‌نما در اطراف سیم حامل جریان می‌توان وجود این میدان را نمایش داد (شکل ۱۰-۱۷ الف). با قطع جریان، عقربه‌ی قطب‌نماها در امتداد میدان مغناطیسی زمین قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-۱۷ ب). این ارتباط بین الکتریسیته و مغناطیس را نخستین بار دانشمندی دانمارکی به نام اورستد در سال ۱۸۱۹ کشف کرد. او این کشف را الکترومغناطیس نامید.



شکل ۱۰-۱۷ (الف) میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را می‌توان با قراردادن تعدادی قطب‌نما پیرامون آن نشان داد. قطب‌نماها شکل دایره‌ای میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  را نشان می‌دهند که سیم حامل جریان  $I$  را احاطه کرده است. (ب) با قطع جریان عبوری از سیم، همه‌ی قطب‌نماها در امتداد میدان مغناطیسی زمین قرار می‌گیرند.

شکل ۱۰-۱۸ چگونگی تعیین جهت میدان مغناطیسی را در اطراف یک سیم حامل جریان نشان می‌دهد. در این روش که به قاعده‌ی دست راست شناخته می‌شود، اگر انگشت شست دست راست در جهت جریان باشد، جهت خم شدن چهار انگشت دیگر، جهت خط‌های میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  را در اطراف سیم حامل جریان نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۱۸ استفاده از قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم حامل جریان.

در مغناطیس بیش از الکتریسیته نیازمند درکی سه بعدی از پدیده‌ها و مسائل در پیش رو هستیم. مثلاً شکل ۱۰-۱۹ خط‌های میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریانی را در چند محل نشان می‌دهد. از آنجا که رسم تصویرهای سه بعدی دشوار است، تصویرهای مورد نیاز را به صورت دو بعدی رسم می‌کنیم و هنگام رسم یا بررسی آن‌ها باید به قراردادهای استاندارد توجه داشته باشیم. در شکل ۱۰-۱۹ قراردادهای مورد استفاده برای بردارهای میدان مغناطیسی و سیم‌های حامل جریان نشان داده شده است.



الف بردارها عمود بر صفحه به داخل



ب بردارها عمود بر صفحه به بیرون



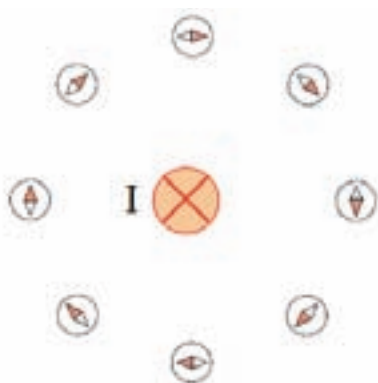
ت سیم حامل جریان عمود بر صفحه به طرف داخل



ث سیم حامل جریان عمود بر صفحه به طرف بیرون

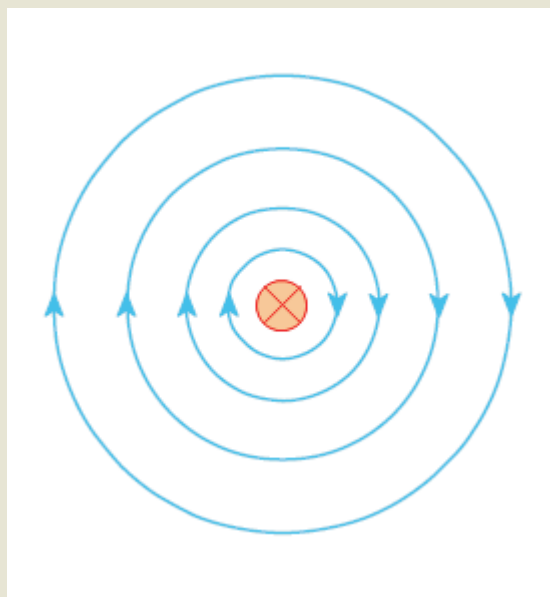
شکل ۱۰-۱۹ قراردادهایی که برای نمایش کمیت‌های برداری و سیم‌های حامل جریان به کار می‌رود.

با توجه به قراردادهایی که دیدیم، شکل ۱۰-۲۰ یک سیم حامل جریان را نشان می‌دهد که بر صفحه‌ی کتاب عمود است و جهت جریان عبوری از آن به طرف داخل است.

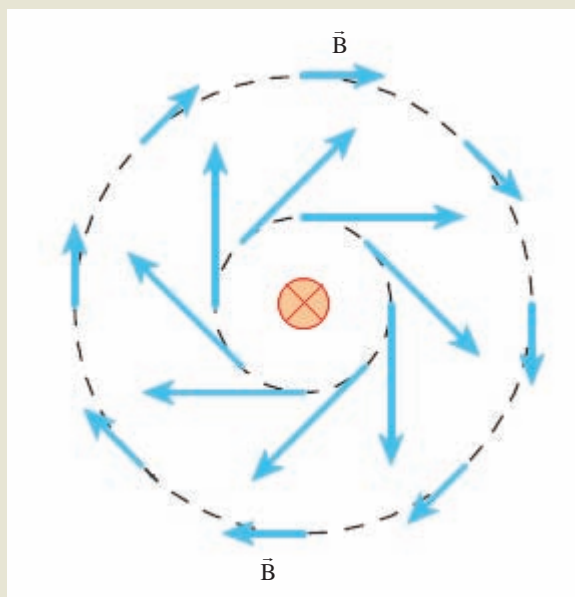


شکل ۱۰-۲۰

دریافت خود را از شکل‌های ۱۰-۲۱ الف و ب بیان کنید.



ب



الف

شکل ۱۰-۲۱

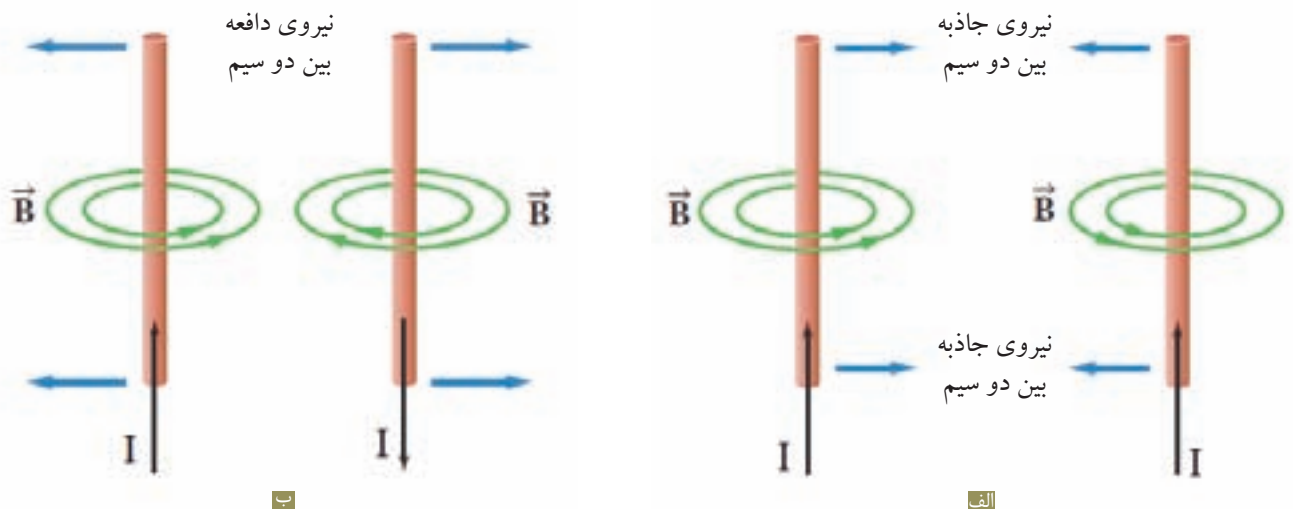
**پاسخ:** شکل الف نشان می‌دهد بزرگی میدان حاصل از یک سیم حامل جریان، با دور شدن از سیم کاهش می‌یابد (به اندازه‌ی پیکان‌های رسم شده توجه کنید) و در فاصله‌های مساوی از سیم بزرگی میدان یکسان است. شکل ب نشان می‌دهد که خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف سیم حامل جریان به صورت دایره‌های هم‌مرکزند. افزون بر این فاصله‌ی این خطوط در نزدیک سیم به یکدیگر نزدیک‌تر است (یعنی بزرگی میدان مغناطیسی قوی‌تر است) و با دور شدن از سیم فاصله‌ی خطوط بیش‌تر می‌شود (یعنی میدان مغناطیسی ضعیف‌تر است).

### شبیه‌سازی



- اثر دو سیم موازی حامل جریان بر یکدیگر
- سیم‌های موازی حامل جریان

آزمایش نشان سیم‌های حامل جریان بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. شکل ۱۰-۲۲ الف دو سیم موازی را نشان می‌دهد که جریان‌های هم‌سو از آن‌ها می‌گذرد. اثر میدان مغناطیسی هر سیم بر سیم دیگر، سبب وارد شدن نیروی جاذبه بین دو سیم می‌شود. در این وضعیت سیم‌ها تمایل دارند تا به یکدیگر نزدیک شوند. در صورتی که اگر جریان‌های ناهم‌سو از دو سیم بگذرد (شکل ۱۰-۲۲ ب)، اثر میدان مغناطیسی هر سیم بر سیم دیگر سبب وارد شدن نیروی دافعه بین دو سیم می‌شود. در این وضعیت سیم‌ها تمایل دارند تا از یکدیگر دور شوند.



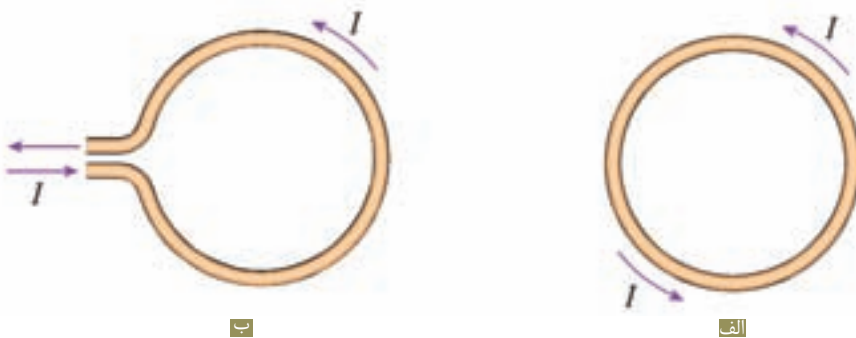
شکل ۱۰-۲۲ (الف) نیروی جاذبه بین دو سیم موازی حامل جریان همسو و (ب) نیروی دافعه بین دو سیم موازی حامل جریان ناهمسو.

اگر سیم راستی را به صورت حلقه‌ای در آوریم و از آن جریان  $I$  بگذرانیم میدان مغناطیسی ایجاد شده به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. شکل ۱۰-۲۳ الف یک حلقه‌ی آرمانی و شکل ۱۰-۲۳ ب حلقه‌ای را که در عمل می‌توان از آن جریان  $I$  را گذراند نشان می‌دهد.

#### فعالیت عملی



- سیم‌های موازی حامل جریان
- میدان مغناطیسی حلقه‌ی حامل جریان



شکل ۱۰-۲۳ (الف) یک حلقه‌ی آرمانی حامل جریان و (ب) یک حلقه‌ی آزمایشگاهی حامل جریان.

شکل ۱۰-۲۴ الف خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقه‌ی حامل جریان را از دو زاویه‌ی دید متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود جهت میدان  $\vec{B}$  درون و بیرون حلقه عکس یکدیگرند. در شکل ۱۰-۲۴ ب طرح ایجاد شده میدان یک حلقه توسط براده‌های آهن نشان داده شده است.

#### شبیه‌سازی

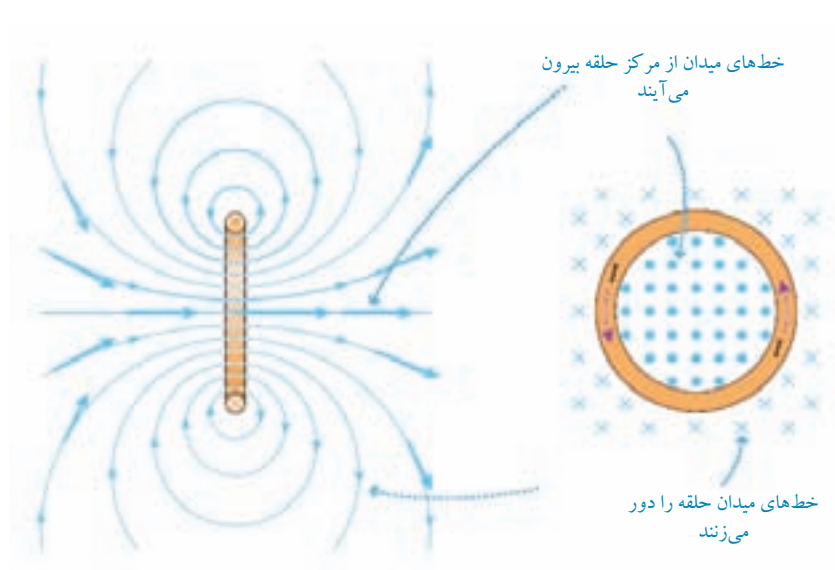


- حلقه‌ی حامل جریان و عقربه‌ی مغناطیسی





ب

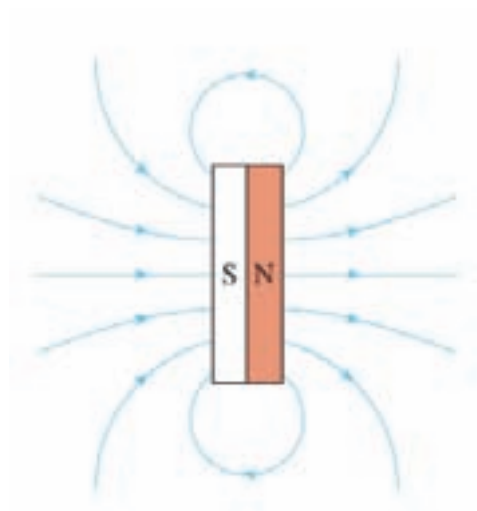


الف

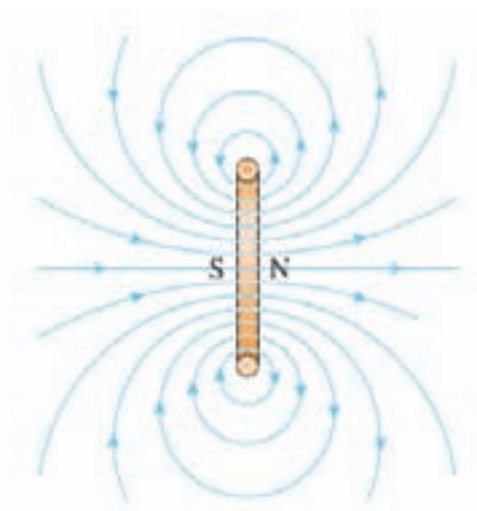
شکل ۱۰-۲۴ (الف) میدان مغناطیسی ناشی از یک حلقه‌ی جریان و (ب) براده‌های آهن، طرح میدان مغناطیسی در فضای اطراف یک حلقه‌ی جریان را نشان می‌دهند.

پرسش مفهومی ۱۰-۴

شکل ۱۰-۲۵ الف خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقه‌ی جریان و شکل ۱۰-۲۵ ب خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای تخت را نشان می‌دهد. دریافت خود را از این دو شکل بیان کنید.



ب

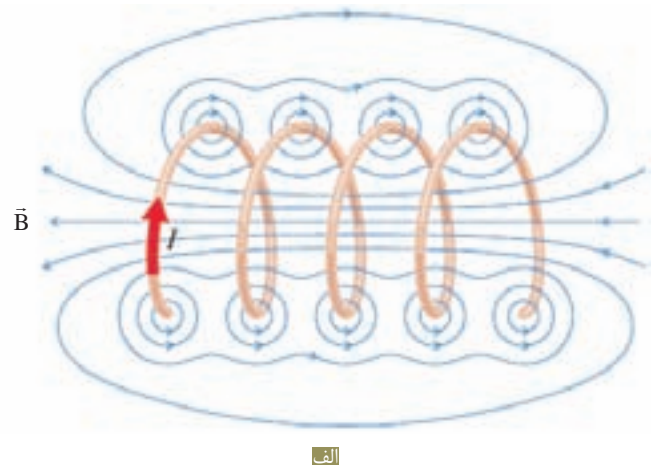
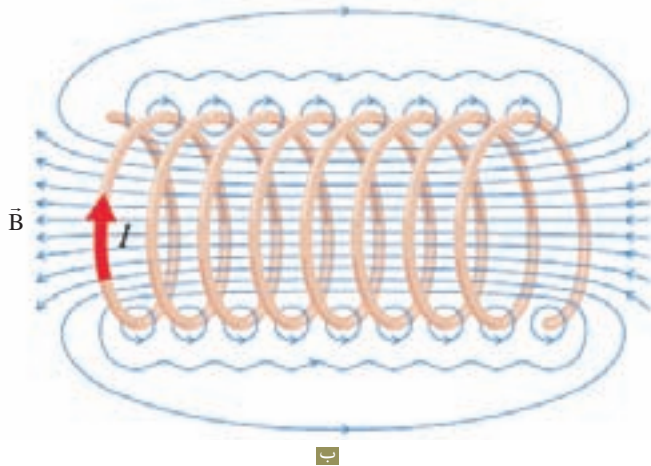


الف

شکل ۱۰-۲۵

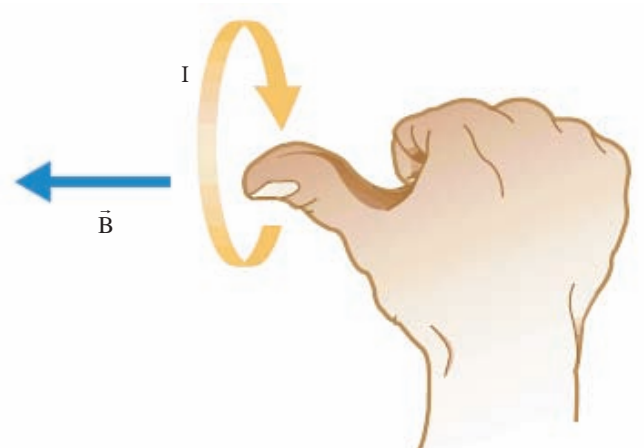
## سیملوله

اکنون میدان مغناطیسی حاصل از جریان در پیچهای از سیم را که به شکل مارپیچ بلندی تنگ هم پیچیده شده است بررسی می‌کنیم. چنین پیچهای، سیملوله خوانده می‌شود. طول سیملوله معمولاً بسیار بزرگ‌تر از قطر آن است. خط‌های میدان مغناطیسی یک سیملوله با تعداد دور کم و تعداد دور زیاد به ترتیب در شکل‌های ۱۰-۲۶ الف و ب نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۲۶ (الف) خط میدان مغناطیسی حاصل از یک سیملوله با تعداد دور کم و (ب) با افزایش تعداد دورهای سیملوله، میدان مغناطیسی سیملوله نیز افزایش می‌یابد.

جهت میدان مغناطیسی حاصل از یک سیملوله‌ی حامل جریان را به کمک دست راست و به شیوه‌ای که در شکل ۱۰-۲۷ نشان داده شده است تعیین می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۱۰-۲۶ ب نیز دیده می‌شود، با افزایش تعداد دورهای یک سیملوله می‌توان بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از آن را افزایش داد. افزون بر این کار، آزمایش نشان می‌دهد هر چه جریان بزرگ‌تری از سیملوله بگذرد، میدان مغناطیسی قوی‌تری توسط آن ایجاد می‌شود.



شکل ۱۰-۲۷ قاعده‌های دست راست برای تعیین جهت میدان مغناطیسی در یک سیملوله‌ی حامل جریان

## سیملوله با هسته‌ی آهنی

همان‌طور که دیدیم آهن، نوعی ماده‌ی فرومغناطیس نرم است که هرگاه درون میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد به سهولت آهنربا می‌شود. اگر یک میله‌ی آهنی

### شبیه‌سازی

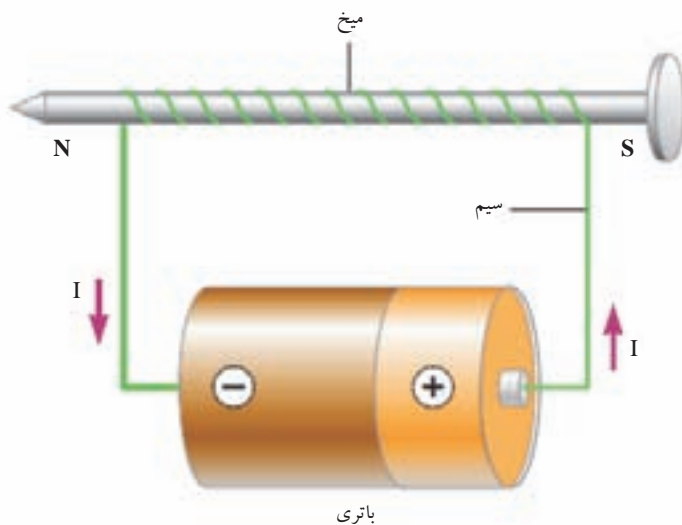


● میدان مغناطیسی سیملوله



را درون یک سیملوله قرار دهیم، با برقرار شدن جریان در سیملوله، میله‌ی آهنی به آهنربا تبدیل شده و خاصیت مغناطیسی سیملوله را افزایش می‌دهد. میله‌ی آهنی درون سیملوله را هسته‌ی سیملوله می‌نامند.

آهنرباهای الکتریکی که کاربرد فراوانی در صنعت دارند، در واقع سیملوله‌ای حامل جریان‌اند که درون آن‌ها یک هسته‌ی آهنی قرار دارد. شکل ۱۰-۲۸ الف یک آهنربای الکتریکی صنعتی را نشان می‌دهد که برخی از انواع آن‌ها قادرند تا ۲۵ تن را جابه‌جا کنند و شکل ۱۰-۲۸ ب یک آهنربای الکتریکی ساده را نشان می‌دهد که شما نیز می‌توانید به سادگی آن را بسازید.



باتری

ب



الف

شکل ۱۰-۲۸ (الف) یک آهنربای الکتریکی صنعتی. (ب) یک آهنربای الکتریکی ساده.

## آزمایشگاه مجازی

- آهنربای الکتریکی

## بیش‌تر بدانید

- آهنرباهای الکتریکی ابررسانا
- تصویر برداری MRI

**توجه:** با عبور جریان بیش‌تر از سیملوله‌ی آهنربای الکتریکی، هسته‌ی فرّومغناطیس درون سیملوله نیز خاصیت آهنربایی را بیش‌تر تقویت می‌کند. اما لازم است توجه کنید که برای خاصیت آهنربایی هر ماده‌ی فرّومغناطیس مقدار بیشینه‌ای وجود دارد و آن را حالت اشباع مغناطیسی می‌نامند. این وضعیت هنگامی پیش می‌آید که جهت‌گیری میدان‌های مغناطیسی همه‌ی حوزه‌های مغناطیسی به موازات میدان مغناطیسی خارجی (که در آهنربای الکتریکی توسط سیملوله ایجاد می‌شود) در آیند. برخی از هسته‌های فرّومغناطیس درون آهنرباهای الکتریکی قادرند میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط سیملوله را با ضریبی نزدیک به  $10^3$  تقویت کنند.

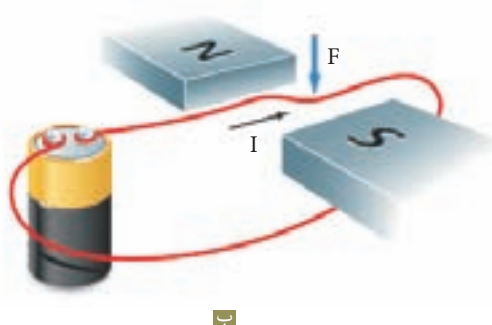
## نیروی وارد بر سیم حامل جریان

آزمایش نشان می‌دهد هرگاه سیم حامل جریانی درون میدان مغناطیسی قرار گیرد، از طرف میدان بر آن نیرو وارد می‌شود. نیروی وارد شده بر راستای جریان و راستای میدان مغناطیسی عمود است و با برعکس شدن جهت جریان، جهت نیرو نیز عکس می‌شود (شکل ۱۰-۲۹).

فعالیت عملی



● ساخت سیملوله



الف

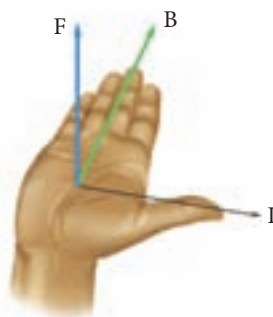
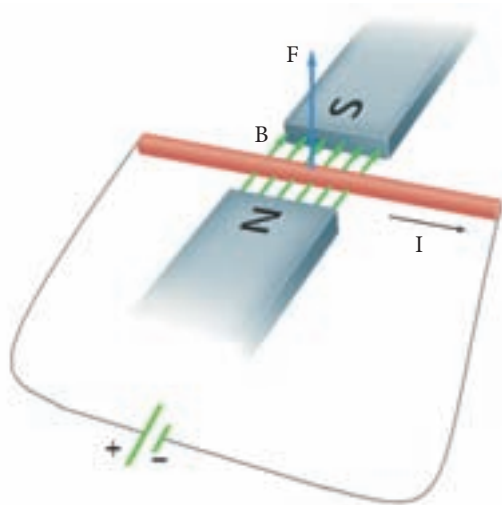
شکل ۱۰-۲۹ بر سیم حامل جریان درون میدان مغناطیسی نیرو ( $F$ ) وارد می‌شود. با تغییر جهت جریان، جهت نیرو نیز تغییر می‌کند. توجه کنید که جهت میدان  $\vec{B}$  از قطب N به طرف قطب S است.

جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان را می‌توان به کمک قاعده‌ی دست راست که در شکل ۹-۳۰ نشان داده شده است، تعیین کرد.

فعالیت عملی

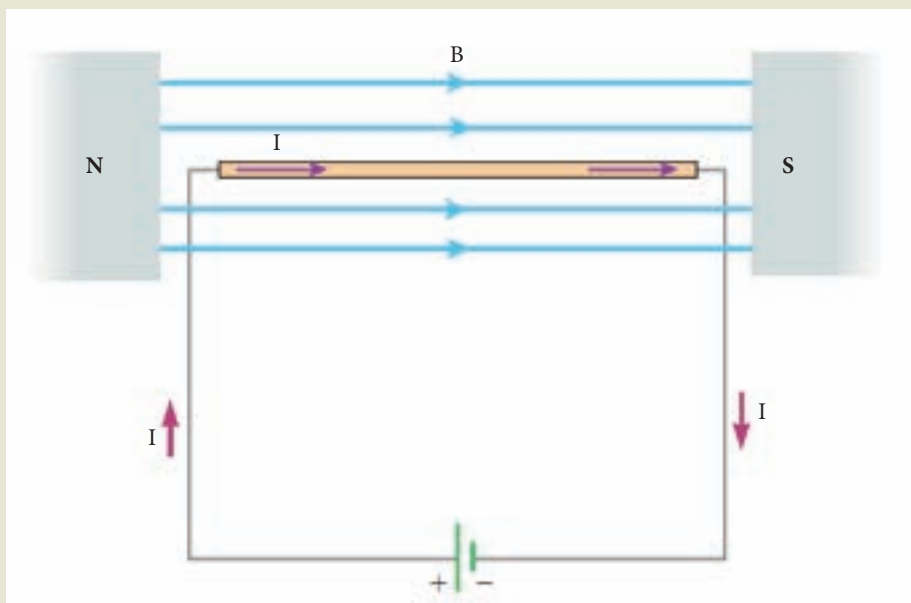


● نیروی وارد بر سیم حامل جریان درون میدان مغناطیسی (قاب الکتریکی)



شکل ۱۰-۳۰ قاعده‌ی تعیین جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان درون میدان مغناطیسی.

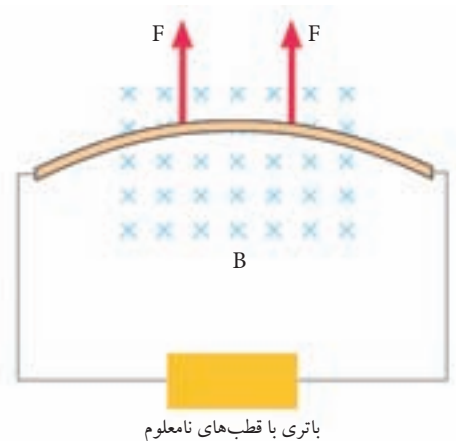
دریافت خود را از شکل ۱۰-۳۱ بیان کنید.



شکل ۱۰-۳۱

پاسخ:

همان طور که در شکل نیز دیده می شود هرگاه سیم حامل جریان موازی میدان مغناطیسی باشد، نیرویی از طرف میدان بر آن وارد نمی شود.



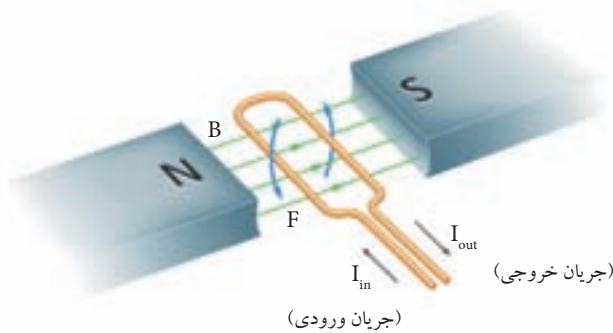
باتری با قطب های نامعلوم

شکل ۱۰-۳۲

شکل ۱۰-۳۲ جهت نیروی وارد بر سیم انعطاف پذیر حامل جریانی را در میدان مغناطیسی نشان می دهد. جهت میدان مغناطیسی عمود بر صفحه ی کتاب و به طرف داخل است. با توجه به قاعده ی دست راست (شکل ۱۰-۳۰)، جهت جریان را در مدار تعیین کنید.

## نیروی وارد بر قاب حامل جریان

هرگاه به جای سیم، قابی حامل جریان مطابق شکل ۱۰-۳۳ درون میدان مغناطیسی قرار گیرد، زوج نیروهای وارون یکدیگر که بر قاب وارد می‌شود، سبب چرخیدن قاب درون میدان مغناطیسی می‌شوند.



شکل ۱۰-۳۳ یک قاب حامل جریان می‌تواند در میدان مغناطیسی، آزادانه گرد محور ثابتی بچرخد. جهت نیروی وارد بر دو طرف قاب عکس یکدیگرند و موجب گشتاور نیرویی می‌شوند که آن را می‌چرخاند.

اساس کار موتورهای الکتریکی، که بسیاری از کارهای ما توسط آنها انجام می‌شود، در واقع چیزی جز آنچه در شکل ۱۰-۳۳ توصیف شد نیست. در عمل هنگام ساخت موتورهای الکتریکی لازم است از یک تغیردهنده‌ی جهت جریان (کموتاتور) استفاده شود تا در هر نیم دور چرخش قاب، جهت جریان عوض شود تا همواره گشتاور نیرو در یک جهت به قاب وارد شود (شکل ۱۰-۳۴).

## سنجه‌های الکتریکی

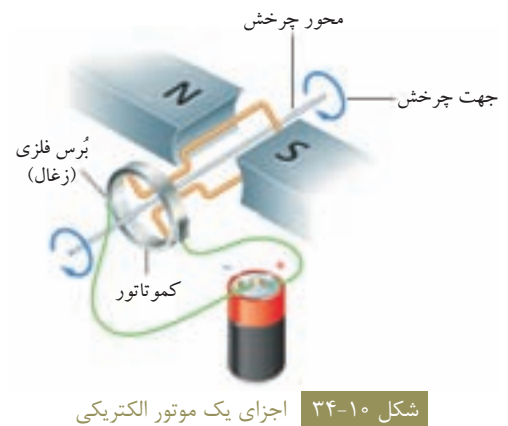
ساده‌ترین سنجه‌ی آشکارسازی جریان الکتریکی قطب‌نمایی است که پیچ‌های از سیم دور آن بسته شده است (شکل ۱۰-۳۵). وقتی جریان الکتریکی از پیچه می‌گذرد، میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط هر حلقه تأثیر خود را روی عقربه‌ی قطب‌نما می‌گذارد بنابراین حتی جریان بسیار مختصر را می‌توان به کمک این سنجه آشکار ساخت. وسیله‌ی حساس آشکارساز عبور جریان گالوانومتر نام دارد.

شبیه‌سازی

فعالیت عملی

جهان

- موتور الکتریکی
- ساخت ساده‌ترین موتور الکتریکی
- آشنایی با موتور الکتریکی

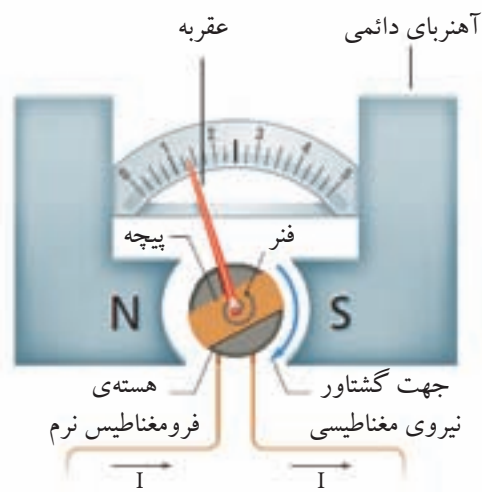


شکل ۱۰-۳۴ اجزای یک موتور الکتریکی



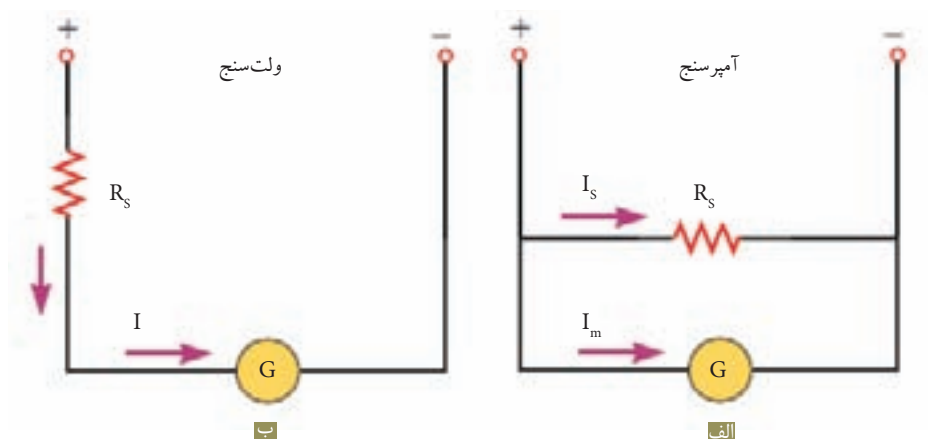
شکل ۱۰-۳۵ گالوانومتر ساده با اتصال دو سیم به باتری، حرکت عقربه‌ی قطب‌نما، عبور جریان از سیم را آشکار می‌کند.

شکل ۱۰-۳۶ طرح گالوانومترهای معمولی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود پیچه از حلقه‌های بیش‌تر دست‌شده و بنابراین گالوانومتر حساس‌تر است. پیچه طوری سوار شده است که حرکت می‌کند و آهنربا ثابت نگه‌داشته می‌شود. پیچه در مقابل فنری می‌چرخد، بنابراین هر چه جریان در پیچه زیادتر باشد، انحراف عقربه نیز بیش‌تر است.



شکل ۱۰-۳۶ اجزای یک گالوانومتر معمولی

مقاومت الکتریکی گالوانومتر را توسط یک مقاومت کمکی (شانت  $R_s$ ) چنان تغییر می‌دهند که بتواند نقش یک آمپرسنج (شکل ۱۰-۳۷ الف) و یا نقش یک ولت‌سنج (شکل ۱۰-۳۷ ب) را ایفا کند.

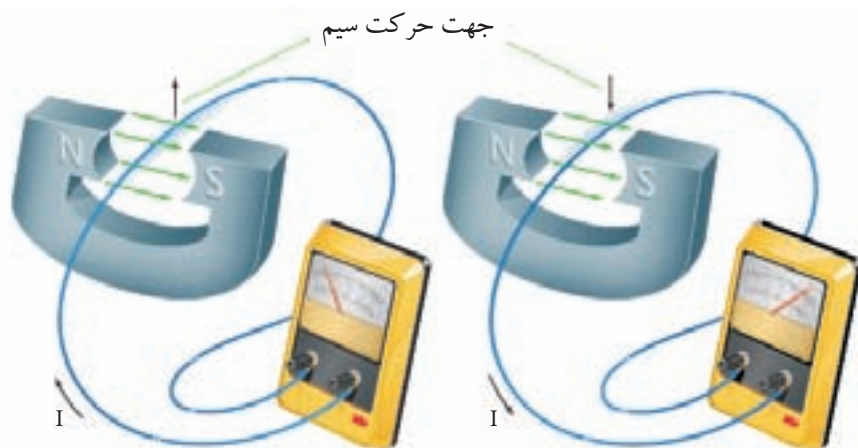


شکل ۱۰-۳۷ آمپرسنج و ولت‌سنج هر دو اصولاً گالوانومترند. مقاومت الکتریکی دستگاه را چنان تغییر می‌دهند که برای آمپرسنج بسیار کم (شکل الف) و برای ولت‌سنج بسیار زیاد (شکل ب) باشد.

## ۱۰-۸ نیروی محرکه‌ی القایی و تولید برق

شکل ۱۰-۳۸ آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که در آن سیمی که دو سر آن به آمپرسنج حساسی وصل شده است، درون میدان مغناطیسی به حرکت در می‌آید.

با حرکت سیم درون میدان مغناطیسی، دو سر سیم نیروی محرکه‌ای القا و در نتیجه سبب ایجاد جریانی القایی در سیم می‌شود. ایجاد این نیروی محرکه‌ی القایی و دنبال آن جریانی القایی با انحراف عقربه‌ی آمپرسنج حساس مشاهده می‌شود. با تغییر جهت حرکت سیم، جهت نیروی محرکه‌ی القایی و در نتیجه جهت جریان القایی تغییر می‌کند.



شبیه‌سازی



● مولد الکتریکی

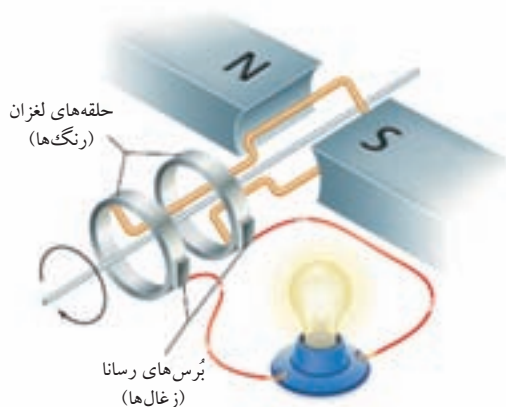
فعالیت عملی



● تولید برق

شکل ۱۰-۳۸ وقتی سیم رسانایی درون میدان مغناطیسی به حرکت درآید، دو سر آن نیروی محرکه‌ای القا می‌شود. نیروی محرکه‌ی القایی سبب برقرار شدن جریان القایی در سیم می‌شود که با توجه به جهت حرکت سیم، جهت آن نیز تغییر می‌کند.

اساس کار مولدهای تولید برق یا ژنراتورها، که برق مورد نیاز ما را در صنعت و شهرها تأمین می‌کند، در واقع چیزی جز آنچه در شکل ۱۰-۳۸ توصیف شده نیست. هرگاه یک قاب رسانا یا پیچهای مطابق شکل ۱۰-۳۹ درون میدان مغناطیسی به چرخش درآید، نیروی محرکه‌ای در دو سر قاب یا پیچه القا می‌شود. این نیروی محرکه‌ی القایی، سبب شارش حامل‌های بار و برقرار شدن جریان در مدار می‌شود.



شکل ۱۰-۳۹ ساختار اصلی یک مولد (ژنراتور). قابی رسانا که درون یک میدان مغناطیسی به چرخش در می‌آید و سبب ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در دو سر قاب می‌شود، جریان ایجاد شده توسط این نیروی محرکه‌ی القایی، از طریق حلقه‌های لغزانی که به قاب وصل شده‌اند، قابل دست‌یابی است. هر حلقه‌ی لغزان به یک سر قاب متصل است که از طریق یک برس فلزی که قاب (و حلقه) در برابر آن می‌چرخد به بقیه مدار مولد وصل شده است.



## انتقال برق

### شبیه‌سازی



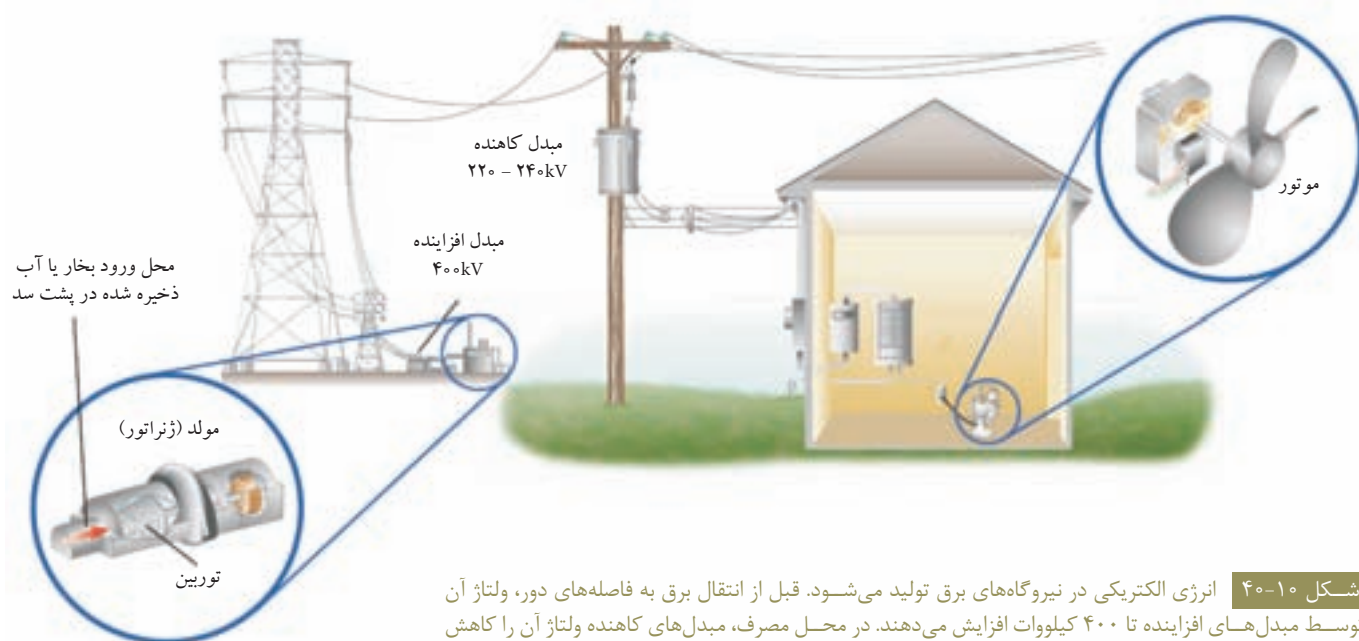
- تاریخچه‌ی الکتریسیته و مغناطیس

### بیش‌تر بدانید



- مولدهای مغناطوهیدرودینامیکی (MHD)

تقریباً تمام برقی که در تمام دنیا مصرف می‌شود به صورت جریان متناوب (ac) است، زیرا به راحتی می‌توان آن را از ولتاژی به ولتاژ دیگر تبدیل کرد.<sup>۱</sup> عبور جریان‌های الکتریکی بزرگ از سیم‌های رسانا، سبب ایجاد گرما و اتلاف انرژی می‌شود. برای کاهش اتلاف انرژی، برق تولید شده را با ولتاژهای بسیار زیاد و جریان‌های کم به فاصله‌های دور منتقل می‌کنند. در نیروگاه‌های تولید برق، ولتاژ حدود ۲۵۰۰۰ ولت یا کم‌تر است و در حوالی نیروگاه مقدار آن برای انتقال راه دور تا ۴۰۰۰۰۰ ولت (۴۰ kV) افزایش می‌یابد، سپس در پست‌های فرعی برق و برای نقاط توزیع مقدار آن گام به گام تا ولتاژهای لازم در کاربردهای صنعتی (۴۴۰ V یا بیشتر) و خانگی (۲۴۰ V) کم می‌شود (شکل ۱۰-۴۰).

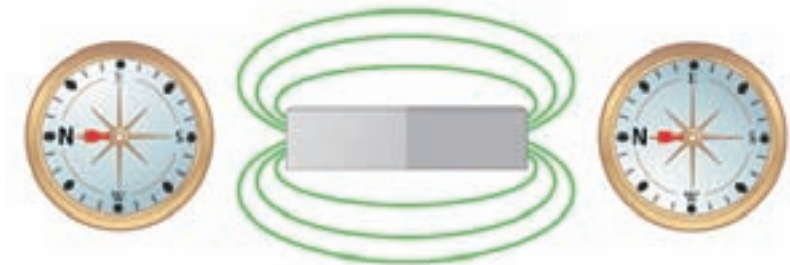


شکل ۱۰-۴۰ انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های برق تولید می‌شود. قبل از انتقال برق به فاصله‌های دور، ولتاژ آن را توسط مبدل‌های افزایش‌دهنده تا ۴۰۰ کیلووات افزایش می‌دهند. در محل مصرف، مبدل‌های کاهش‌دهنده ولتاژ آن را کاهش می‌دهند تا با امنیت بیش‌تر استفاده شود.



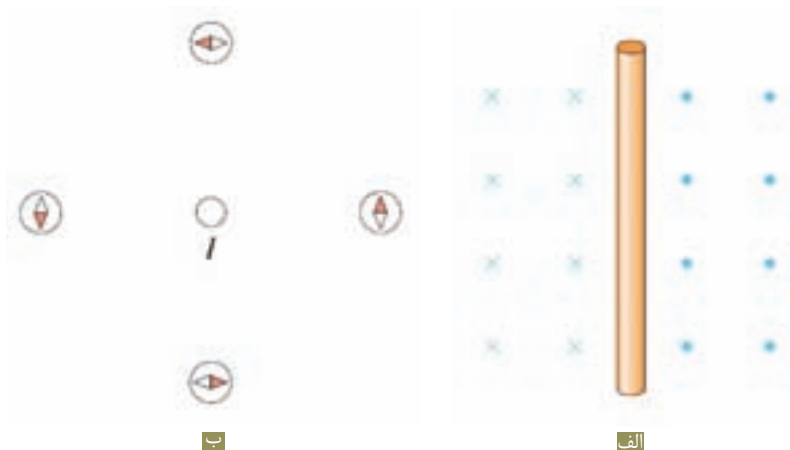
### پرسش‌های مفهومی

۱- با توجه به جهت گیری عقربه‌ی قطب‌نماها در شکل ۱۰-۴۱، قطب‌های آهنربای میله‌ای و جهت خط‌های میدان مغناطیسی را تعیین کنید.



شکل ۱۰-۴۱

۲- در شکل ۱۰-۴۲ الف جهت میدان مغناطیسی و در شکل ۱۰-۴۲ ب جهت گیری عقربه‌های مغناطیسی در اطراف سیم حامل جریانی نشان داده شده است. جهت جریان را در هر سیم تعیین کنید.



ب

الف

شکل ۱۰-۴۲

۳- در شکل ۱۰-۴۳ الف و ب دو سیم حامل جریان بین دو آهنربای میله‌ای نشان داده شده است. با توجه به جهت جریان و نحوه‌ی قرار گرفتن آهنرباها نسبت به یکدیگر، در کدام وضعیت به سیم نیرو وارد می‌شود و جهت آن چگونه است؟



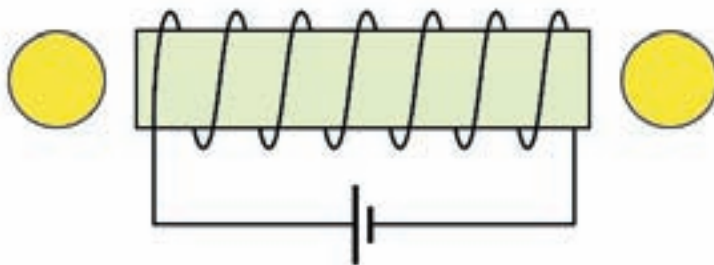
ب

الف

شکل ۱۰-۴۳

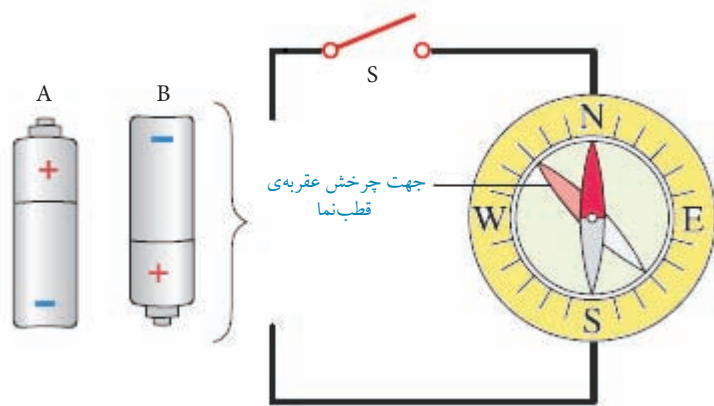


۴- هر دایره‌ی خالی در دو طرف سیم‌لوله‌ی شکل ۴۴-۱۰ یک قطب‌نما را نشان می‌دهد. با تعیین جهت جریان و خط‌های میدان مغناطیسی سیم‌لوله، جهت‌گیری عقربه‌ی قطب‌نما را تعیین کنید.



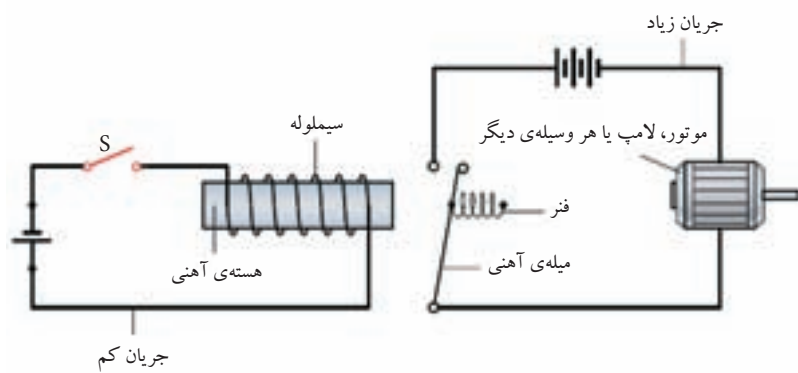
شکل ۴۴-۱۰

۵- کدام باتری را در مدار شکل ۴۵-۱۰ قرار دهیم تا پس از بستن کلید S، عقربه‌ی قطب‌نما که روی سیم قرار دارد بر خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت بچرخد؟



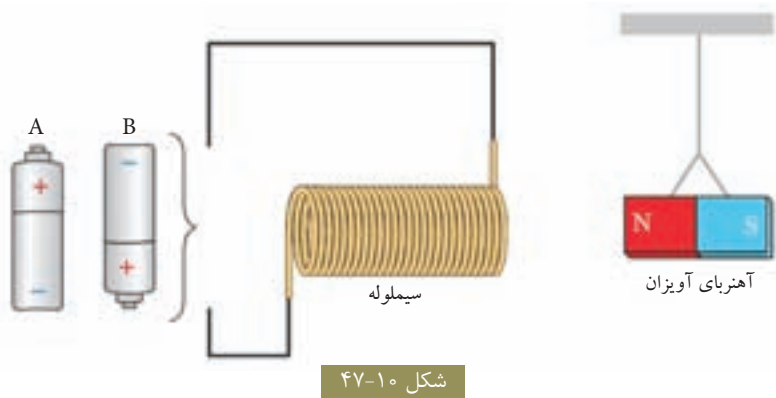
شکل ۴۵-۱۰

۶- شکل ۴۶-۱۰ طرح یک رله‌ی الکتریکی را نشان می‌دهد. توضیح دهید با بستن کلید S در مدار سمت چپ، چه اتفاقی می‌افتد.



شکل ۴۶-۱۰

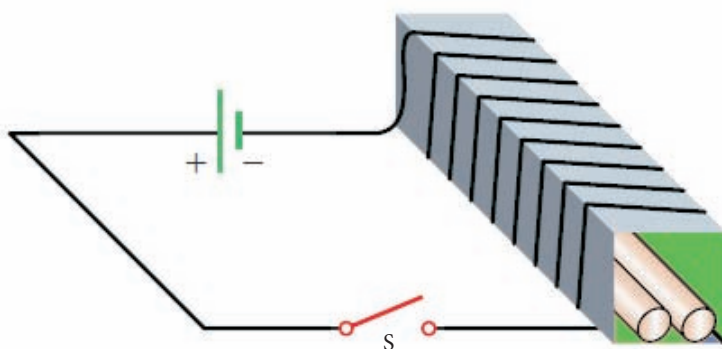
۷- کدام باتری را در مدار شکل ۱۰-۴۷ قرار دهیم تا آهنربا به طرف سیملوله جذب شود؟ دلیل انتخاب خود را با ذکر جزئیات توضیح دهید.



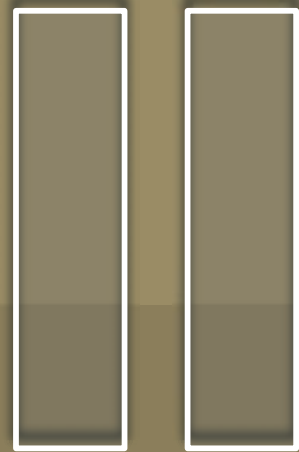
۸- دو میله‌ی فلزی بلند مطابق شکل ۱۰-۴۸ درون یک سیملوله‌ی دراز قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از سیملوله، مشاهده می‌شود دو میله از یکدیگر دور می‌شوند و هنگامی که کلید را باز می‌کنیم و جریان قطع می‌شود، میله‌ها به جای اولیه باز می‌گردند.

(الف) چرا با عبور جریان از سیملوله، میله‌ها از یکدیگر دور می‌شوند؟

(ب) با دلیل توضیح دهید میله‌های فلزی می‌توانند از چه جنسی باشند؟



# القاگرها، خود القایی و القای متقابل



القاگر یک مولد تولید برق در مقیاس تجاری، از تعداد بسیار زیادی حلقه تشکیل شده که دور چیزی شبیه بشکه پیچیده شده و آرمیچر نامیده می‌شود. در حالی که آهنربای الکتریکی روی شفت که از مرکز آرمیچر می‌گذرد (در شکل دیده نمی‌شود) می‌چرخد، آرمیچر و حلقه‌ها ساکن‌اند.

## سیمای فصل یازدهم

۱۱-۱ شار مغناطیسی

۱۱-۲ قانون القای فارادی

۱۱-۳ قانون لنز

۱۱-۴ القاگرها

۱۱-۵ ثابت زمانی در یک مدار R-L

۱۱-۶ انرژی ذخیره شده در القاگر

۱۱-۷ القای متقابل

ارزشیابی فصل یازدهم

## هدف‌های آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما فرا می‌گیرید:

- شار مغناطیسی چیست.
- قانون القای الکترومغناطیسی فارادی چیست.
- جهت نیروی محرکه‌ی القایی و جریان القایی را چگونه به کمک قانون لنز می‌توان تعیین کرد.
- القاگر چیست و انواع گوناگون آن به چه صورت هستند.
- پدیده‌ی خودالقایی چیست و بزرگی نیروی محرکه خودالقایی را چگونه می‌توان به دست آورد.
- عوامل مؤثر در ضریب خودالقایی یک سیملوله چه هستند.
- ثابت زمانی در یک مدار  $R-L$  چگونه تعیین می‌شود.
- انرژی ذخیره شده در یک القاگر به چه عواملی بستگی دارد.
- القای متقابل چیست و در چه صورت ضریب القای متقابل بیشینه است.

## القاگرها، خودالقایی و القای متقابل

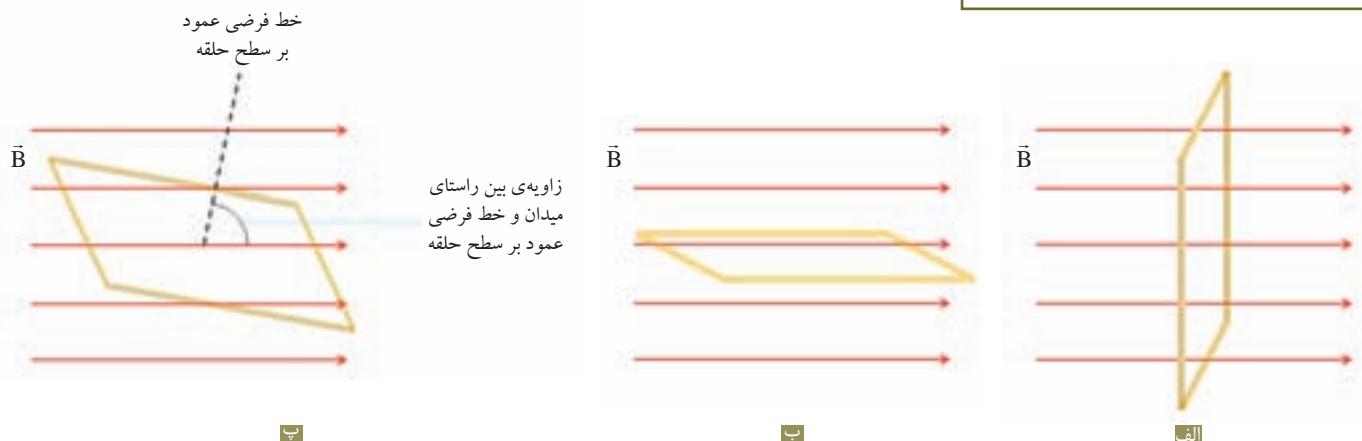
تکه‌ای سیم مسی اختیار کنید و آن را دور مدادی به صورت یک سیملوله یا پیچه بپیچید. اگر این پیچه را در مداری قرار دهید، آیا رفتاری متفاوت نسبت به یک تکه سیم راست خواهد داشت؟ شگفت این که پاسخ مثبت است. در یک موتور بنزینی معمولی اتومبیل، پیچه‌ای شبیه این موجب می‌شود تا باتری ۱۲ ولت اتومبیل، هزاران ولت برای ایجاد جرقه در سر شمع‌ها تأمین کند و موتور اتومبیل را به راه اندازد. پیچه‌های دیگری شبیه این برای روشن کردن لامپ‌های مهتابی به کار می‌روند. پیچه‌های بزرگی که در زیر سطح خیابان‌های شهری برای کنترل شد آمد (ترافیک) و به کار انداختن چراغ‌های راهنمایی، قرار داده می‌شوند، تنها نمونه‌های اندکی از کاربرد القای الکترومغناطیسی در القاگرها، و پدیده‌های دیگری همچون خودالقایی و القای متقابل در القاگراهاست که در این فصل با آن‌ها آشنا خواهیم شد.

### ۱-۱۱ شار مغناطیسی

برای بررسی و توجیه پدیده‌هایی که در این فصل با آن‌ها مواجه می‌شویم، نیازمند آشنایی با مفهوم شار مغناطیسی هستیم که معمولاً آن را با نماد  $\Phi$  (بخوانید فی) نشان می‌دهند. به این منظور حلقه‌ای به مساحت  $A$  را در نظر بگیرید که درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  قرار دارد. بنا به تعریف، شار مغناطیسی عبوری از حلقه هنگامی بیشینه است که امتداد خط‌های میدان مغناطیسی بر سطح حلقه عمود باشد (شکل ۱-۱۱ الف). همچنین شار مغناطیسی عبوری از حلقه هنگامی صفر یا مقدار کمینه‌ی خود را دارد که امتداد خط‌های میدان مغناطیسی موازی سطح حلقه باشند (شکل ۱-۱۱ ب) و یا به عبارت دیگر هیچ خط میدانی از سطح  $A$  عبور نکند. سرانجام اگر امتداد خط‌های



میدان مغناطیسی با خط فرضی عمود بر سطح حلقه زاویه‌ای بین صفر تا ۹۰ درجه بسازد، شار مغناطیسی عبوری از حلقه بین مقدار کمینه تا مقدار بیشینه - بسته به مقدار زاویه - تغییر می‌کند (شکل ۱۱-۱).



شکل ۱۱-۱ (الف) شار مغناطیسی که از سطح می‌گذرد بیشینه است. (ب) شار مغناطیسی که از سطح می‌گذرد کمینه یا صفر است. (پ) شاری که از سطح می‌گذرد نسبت به حالت الف کمتر و نسبت به حالت ب بیش‌تر است. هر چه زاویه‌ی بین راستای میدان و خط فرضی عمود بر سطح حلقه به صفر نزدیک‌تر شود، شار مغناطیسی بیش‌تری از حلقه می‌گذرد.

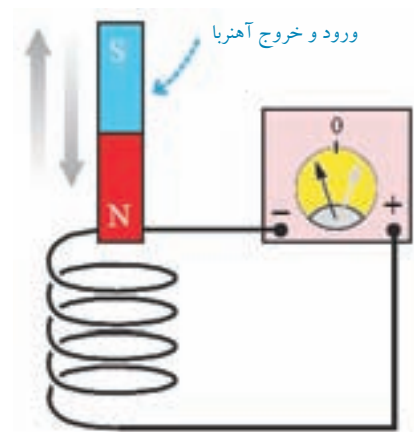
## ۱۱-۲ قانون القای فارادی

تا سال ۱۸۳۱ میلادی، تنها وسایل تولید برق یا الکتریسیته، پیل‌های ولتایی بودند که در فصل ۹ با آن‌ها آشنا شدیم. مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هنری، معلم علوم آمریکایی، در این سال کشفی نمودند که می‌توان صرفاً با ورود و خروج یک آهنربا به یک سیم پیچ در آن جریان الکتریکی تولید کرد (شکل ۱۱-۲). آنان متوجه شدند که عامل القای نیروی محرکه در دو سر سیم پیچ، حرکت آهنربا و سیم پیچ نسبت به یکدیگر است.

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی ولتاژ یا نیروی محرکه‌ی القایی در یک پیچه با حاصل ضرب تعداد حلقه‌ها و آهنگ تغییر شار مغناطیسی در پیچه برابر است. این بیان که همان قانون القای الکترومغناطیسی فارادی است را به‌طور نمادین می‌توان به صورت

زیر نوشت:

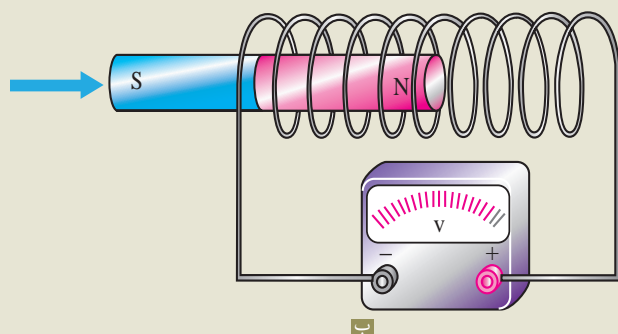
$$\varepsilon = \left| -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| \quad (11-1)$$



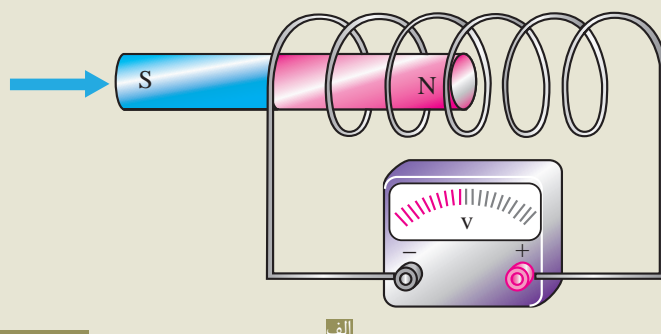
شکل ۱۱-۲ با ورود و خروج آهنربا به سیم پیچ، نیروی محرکه‌ی الکتریکی در آن القا می‌شود و حامل‌های بار درون آن را به حرکت در می‌آورد.



دریافت خود را از شکل ۳-۱۱ بیان کنید.



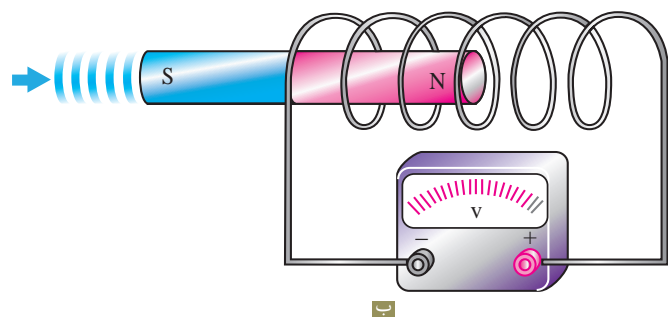
شکل ۳-۱۱



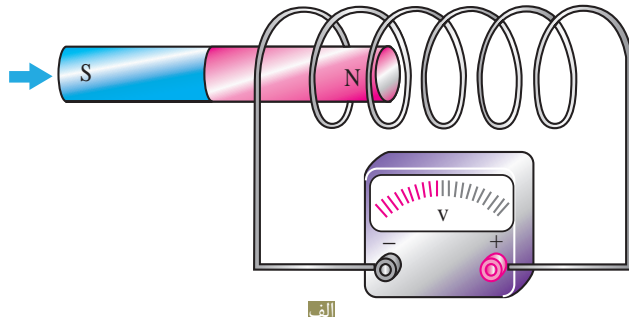
الف

**پاسخ:** در شکل الف با ورود آهنربا به پیچه، ولتاژی در دو سر آن القا شده است. در شکل ب، آهنربا با همان وضعیت شکل الف، وارد پیچه‌ای با تعداد حلقه‌های بیش‌تری شده است. در نتیجه همان‌طور که دیده می‌شود ولتاژ القا شده در دو سر پیچه نیز افزایش یافته است.

دریافت خود را از شکل ۴-۱۱ بیان کنید.



شکل ۴-۱۱



الف

### فعالیت عملی



- بررسی عوامل مختلف در نیروی محرکه‌ی القا شده در یک پیچه
- بررسی قانون لنز

### ۳-۱۱ قانون لنز

سه سال پس از آن که فارادی قانون القای الکترومغناطیسی را ارائه کرد، هاینریش لنز فیزیکدان آلمانی در سال ۱۸۳۴ میلادی قاعده‌ای را، موسوم به **قانون لنز**، برای تعیین جهت جریان القایی در مدار پیشنهاد کرد.



● القای الکترومغناطیسی فارادی

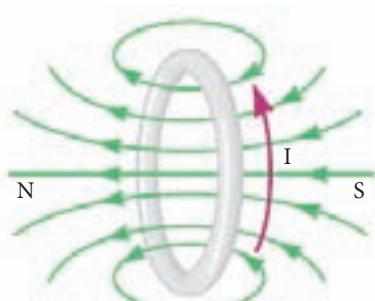
بیش تر بدانید



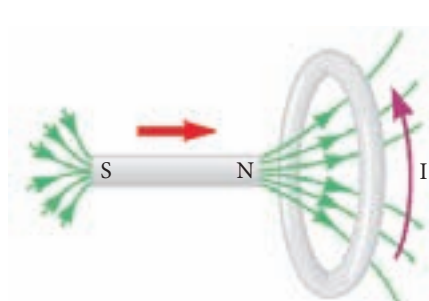
- کاربردهای القای الکترومغناطیسی فارادی
- اساس کار گیتارهای برقی

بنا به قانون لنز، جریان حاصل از نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه در جهتی است که به وسیله‌ی آثار مغناطیسی‌ای که ایجاد می‌کند با تغییر شار مغناطیسی، یعنی عامل ایجاد این جریان مخالفت می‌کند.

علامت منفی در رابطه‌ی (۱۱-۱) جهت جریان حاصل از نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه را به همان صورتی که قانون لنز تشریح می‌کند به دست خواهد. توضیح دقیق‌تر این مطلب فراتر از سطح این کتاب است و تنها به ذکر مثالی از چگونگی استفاده از بیان قانون لنز برای تعیین جهت جریان القایی اکتفا می‌کنیم. آهنربایی را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۱۱-۵ الف به حلقه‌ای رسانا نزدیک می‌شود. جریان در حلقه در جهتی ایجاد می‌شود که با نزدیک شدن آهنربا به حلقه مخالفت کند (شکل ۱۱-۵ ب).



ب



الف

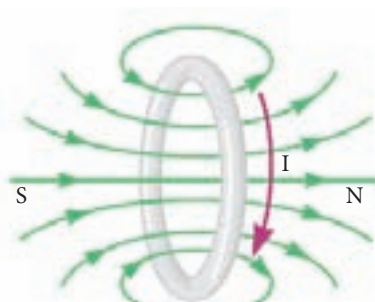
شکل ۱۱-۵ (الف) با نزدیک شدن آهنربا به حلقه‌ای رسانا، جریان حاصل از نیروی محرکه‌ی القایی در آن در جهتی است (ب) که با نزدیک شدن آهنربا مخالفت می‌کند.

همچنین اگر مطابق شکل ۱۱-۶ الف، قطب N آهنربا را از حلقه‌ی رسانا دور کنیم، باز هم جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده، در مقابل قطب N آهنربا یک قطب S ایجاد کند و ربایش بین این دو قطب با دور شدن قطب N آهنربا مخالفت کند (شکل ۱۱-۶ ب).

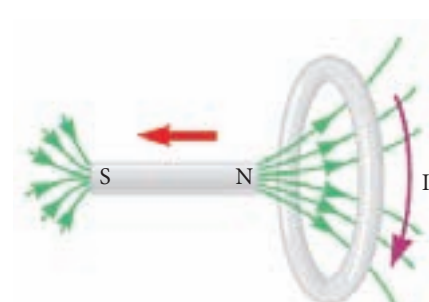
شبیه‌سازی



● قانون لنز



ب



الف

شکل ۱۱-۶ (الف) با دور شدن آهنربا از حلقه، جریانی در آن القا می‌شود. (ب) میدان مغناطیسی حاصل از جریان القایی در پیچه با دور شدن آهنربا از پیچه مخالفت می‌کند.



## ۱۱-۴ القاگرها

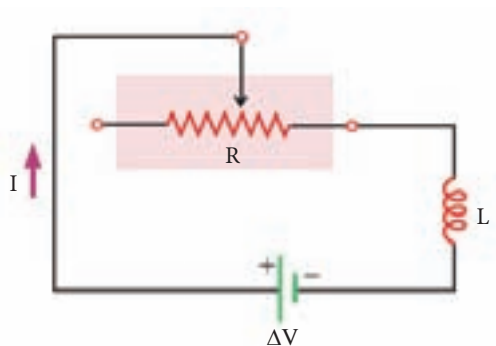
در فصل ۸ دیدیم که در فضای بین صفحه‌های یک خازن تخت یا مسطح میدان الکتریکی ایجاد می‌شود و انرژی الکتریکی توسط همین میدان در خازن ذخیره می‌شود. به همان ترتیب، یک القاگر (—) را می‌توان برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیره انرژی مغناطیسی توسط میدان مغناطیسی به کار برد. یک سیم‌لوله‌ی بلند را به‌عنوان نوع اصلی القاگر در نظر می‌گیریم.<sup>۱</sup> شکل ۱۱-۷ چند القاگر را در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۷ چند القاگر گوناگون

## خودالقایی

برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر، مداری را مطابق شکل ۱۱-۸ در نظر بگیرید. این مدار شامل یک مولد (باتری)، رئوستا (مقاومت متغیر) و یک القاگر است که به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. با تغییر مقاومت رئوستا جریان در مدار نیز تغییر می‌کند. تغییر جریان در مدار، سبب تغییر جریان عبوری از القاگر شده و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از القاگر نیز تغییر می‌کند. این امر سبب القای نیروی محرکه‌ی خودالقایی<sup>۲</sup> در القاگر می‌شود که با هر گونه تغییر جریان عبوری از آن مخالفت می‌کند. این پدیده که می‌تواند در هر القاگری (از قبیل پیچه یا سیم‌لوله) ایجاد شود، **اثر خودالقایی** نامیده می‌شود.



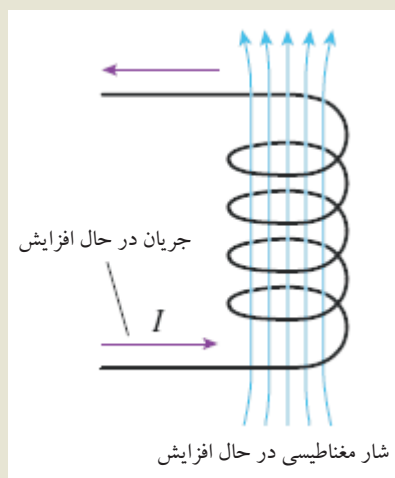
شکل ۱۱-۸ مداری ساده برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی نیروی محرکه‌ی خودالقایی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (۱۱-۲)$$

در این رابطه  $L$  ضریب خودالقایی یا اندوکتانس القاگر نامیده می‌شود و یکای آن به افتخار جوزف هنری، کاشف قانون القای الکترومغناطیسی و هم عصر با فارادی، هنری (H) خوانده می‌شود.

۱- اگر بخواهیم دقیق‌تر گفته باشیم، طول کوتاهی از نزدیکی وسط‌های یک سیم‌لوله‌ی بلند را به‌عنوان نوع اصلی القاگر در نظر می‌گیرند. در برخی از کتاب‌های قدیمی از واژه‌ی بوبین یا سلف به جای القاگر استفاده شده است.  
۲- در بعضی از کتاب‌های درسی قدیمی از واژه‌ی نیروی ضد محرکه استفاده شده است.



شکل ۹-۱۱

شکل ۹-۱۱ سیملوله‌ای را نشان می‌دهد که جریان عبوری از آن در مدت  $1\text{ ms}$  از  $600\text{ mA}$  میلی آمپر به  $800\text{ mA}$  میلی آمپر می‌رسد. اگر ضریب خودالقایی سیملوله  $0.2\text{ H}$  باشد، بزرگی نیروی محرکه‌ی خودالقایی در سیملوله چقدر است؟

**حل:** با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$\Delta t = 1\text{ ms} = 10^{-3}\text{ s}$$

$$I_1 = 600\text{ mA} = 0.6\text{ A}, I_2 = 800\text{ mA} = 0.8\text{ A} \Rightarrow \Delta I = 0.2\text{ A}$$

$$L = 0.2\text{ H}, \quad \varepsilon_L = ?$$

با جای گذاری مقادیر داده شده در رابطه‌ی ۲-۱۱ داریم:

$$\varepsilon_L = \left| -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| = \left| -(0.2\text{ H}) \frac{(0.2\text{ A})}{10^{-3}\text{ s}} \right| = 40\text{ V}$$

### تمرین ۱-۱۱

جریان عبوری از سیم‌پیچی در مدت  $0.2\text{ s}$  از  $10\text{ mA}$  به  $4\text{ mA}$  کاهش می‌یابد. اگر نیروی محرکه‌ی خودالقایی به مقدار  $9\text{ V}$  در سیم‌پیچ تولید شود، ضریب خودالقایی سیم‌پیچ را پیدا کنید.

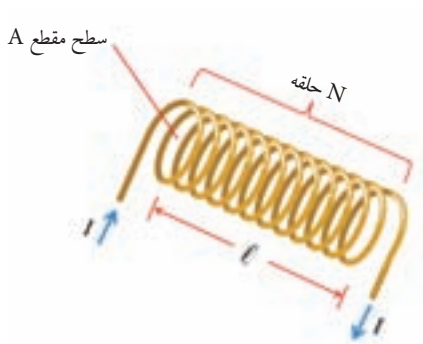
### عوامل مؤثر در ضریب خودالقایی یک سیملوله

سیملوله‌ی بلندی با سطح مقطع  $A$ ، طول  $\ell$  و  $N$  حلقه در نظر بگیرید که جریان  $I$  از آن می‌گذرد (شکل ۱۱-۱۰). محاسبه نشان می‌دهد که ضریب خودالقایی سیملوله از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

### فعالیت عملی



- آشنایی با انواع القاگر
- بررسی پدیده‌ی خودالقایی



شکل ۱۰-۱۱ سیملوله‌ای حامل جریان و برخی از مشخصه‌های آن.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad (۳-۱۱)$$

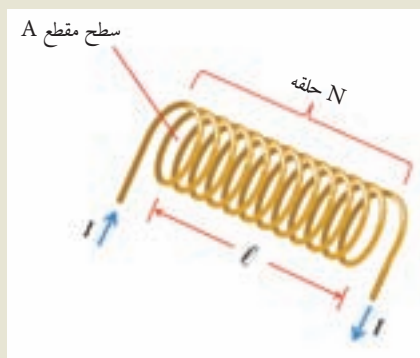
که در آن  $\mu_0$  ثابت تراوایی مغناطیسی خلأ نام دارد<sup>۱</sup> و مقدار آن برابر است با  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ .

اگر سیملوله دارای هسته‌ای از جنس مواد فرومغناطیس باشد، میدان مغناطیسی سیملوله و در نتیجه ضریب خودالقایی آن تقویت می‌شود. در این صورت ضریب خودالقایی سیملوله از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A}{\ell} \quad (۴-۱۱)$$

که در آن  $\mu_r$  ضریبی است که به جنس هسته‌ی داخل سیملوله بستگی دارد و به آن ضریب نسبی مغناطیسی هسته می‌گویند. این ضریب برای مواد غیر مغناطیسی مانند هوا حدود یک و برای مواد فرومغناطیسی بیش‌تر از ۱۰۰ است.

### مثال ۳-۱۱



شکل ۱۱-۱۱ سیملوله‌ای حامل جریان و برخی از مشخصه‌های آن.

طول و سطح مقطع سیملوله‌ی شکل ۱۱-۱۱ به ترتیب ۵۰ cm و  $10 \text{ cm}^2$  است. اگر تعداد حلقه‌های این سیملوله‌ی بدون هسته برابر ۲۰۰۰ باشد، ضریب خودالقایی آن را حساب کنید.

**حل:** با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$\ell = 50 \text{ cm} = 0.5 \text{ m}$$

$$A = 10 \text{ cm}^2 = 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$N = 2000 = 2 \times 10^3$$

با جای گذاری این مقادیر در رابطه‌ی ۳-۱۱ داریم:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}) (2 \times 10^3)^2 (10^{-3} \text{ m}^2)}{0.5} \approx 10^{-2} \text{ H} = 10 \text{ mH}$$

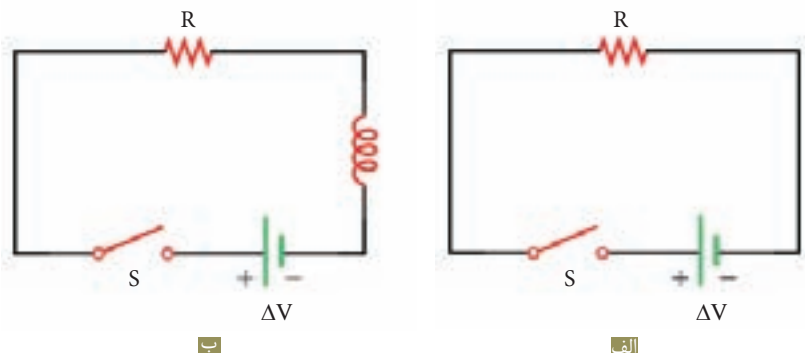
۱- در برخی از کتاب‌های قدیمی‌تر از واژه‌ی ثابت نفوذ مغناطیسی خلأ نیز استفاده شده است.

دو سیملوله با طول و تعداد حلقه‌ی یکسان در اختیار داریم. اگر سطح مقطع یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، نسبت ضریب خودالقایی آن‌ها را به دست آورید. (هر دو سیملوله بدون هسته‌اند.)

### ۱۱-۵ ثابت زمانی در یک مدار R-L

در فصل ۸ دیدیم که اگر جریان در یک مدار شامل مقاومت R و خازن C برقرار شود، بار روی خازن بی‌درنگ تا مقدار نهایی خود افزایش نمی‌یابد، بلکه پس از گذشت ۵ ثابت زمانی خازنی ( $\tau = RC$ ) بار تقریباً به مقدار نهایی خود می‌رسد. همین موضوع در خصوص تخلیه یا دشارژ خازن نیز صادق بود.

وضعیت مشابهی در یک مدار شامل مقاومت R و القاگر L برقرار است. وقتی کلید S در مدار شکل ۱۱-۱۲ الف بسته شود، جریان به سرعت تا مقدار نهایی  $\Delta V/R$  افزایش می‌یابد در حالی که با بستن کلید در مدار شکل ۱۱-۱۲ ب، به دلیل وجود القاگر، یک نیروی محرکه‌ی خودالقایی در مدار ظاهر می‌شود که سعی می‌کند با افزایش جریان در مدار مخالفت کند. ولی با گذشت زمان، مقدار نیروی محرکه‌ی خودالقایی کاهش می‌یابد و جریان در مدار به مقدار نهایی  $\Delta V/R$  میل می‌کند.



شکل ۱۱-۱۲ (الف) با بستن کلید جریان به سرعت به مقدار نهایی خود می‌رسد. (ب) با بستن کلید، در ابتدا القاگر با تغییر جریان عبوری از خود مخالفت می‌کند. پس از گذشت مدتی، جریان به مقدار بیشینه خود می‌رسد و القاگر مانند یک سیم رابط معمولی رفتار می‌کند.

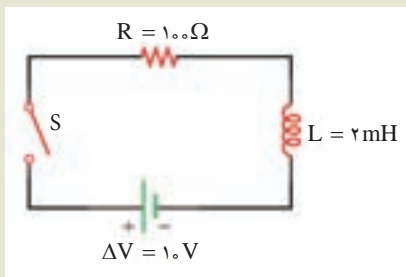
می‌توان نشان داد ثابت زمانی در یک مدار R-L، که به آن ثابت زمانی القایی گفته می‌شود، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (۱۱-۵)$$

در یک مدار R-L نیز پس از گذشت ۵ ثابت زمانی القایی، جریان در یک القاگر به مقدار بیشینه یا کمینه‌ی خود می‌رسد (جدول ۱۱-۱).

جدول ۱۱-۱		
درصد جریانی نسبت به مقدار بیشینه	درصد جریان باقی‌مانده از جریانی بیشینه	تعداد ثابت زمانی القایی
۶۳	۳۷	۱
۸۶	۱۴	۲
۹۵	۵	۳
۹۸	۲	۴
۹۹	۱	۵

#### مثال ۱۱-۴



شکل ۱۱-۱۳

الف) در مدار شکل ۱۱-۱۳ پس از چه مدت جریان به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد؟  
 ب) اگر مقاومت القاگر ناچیز فرض شود، مقدار بیشینه‌ی جریان چقدر است؟

**حل:** الف) همان‌طور که گفته شد پس از گذشت ۵ ثابت زمانی القایی بعد از بستن کلید S، جریان به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد. داریم:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{2 \times 10^{-3} \text{ H}}{100 \Omega} = 2 \times 10^{-5} \text{ s} = 20 \mu\text{s}$$

ب) با استفاده از رابطه‌ی  $\Delta V = RI$  داریم:

$$I = 10 \text{ V} / 100 \Omega = 0.1 \text{ A}$$

#### تمرین ۱۱-۳

اگر در مثال ۱۱-۴، القاگری با ضریب خودالقایی  $4 \text{ H}$  قرار گیرد، پس از چه مدت جریان به ۹۵ درصد مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد؟

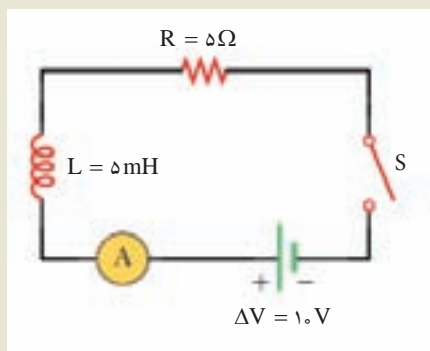
## ۱۱-۶ انرژی ذخیره شده در القاگر

در فصل ۲ دیدیم هرگاه ذره‌ی باردار مثبتی را به طرف جسم باردار مثبتی نزدیک کنیم، انرژی مصرف شده به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی این ذره‌ها ذخیره می‌شود. همچنین در فصل ۸ دیدیم که انرژی را می‌توان در میدان الکتریکی بین صفحه‌های یک خازن ذخیره کرد. به روش مشابهی، می‌توان نشان داد که انرژی در میدان مغناطیسی یک القاگر حامل جریان ذخیره می‌شود. محاسبه نشان می‌دهد انرژی کل ذخیره شده توسط یک القاگر حامل جریان  $I$  از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$U_B = \frac{1}{2} L I^2 \quad (۱۱-۶)$$

اگر مقدارهای  $L$  و  $I$  به ترتیب بر حسب  $H$  و  $A$  جای گذاری شوند، یکای  $U_B$  بر حسب ژول ( $J$ ) خواهد بود.

### مثال ۱۱-۵



شکل ۱۱-۱۴

در مدار شکل (۱۱-۱۴) مدتی طولانی پس از بستن کلید  $S$ ، مطلوب است:  
الف) جریانی که آمپرسنج می‌خواند.  
ب) انرژی ذخیره شده در القاگر.

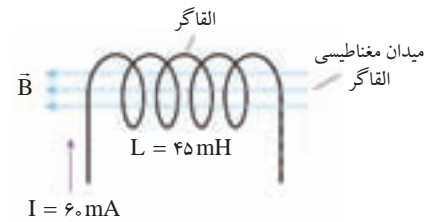
**حل:** الف) مدت طولانی پس از بستن کلید  $S$ ، جریان در مدار به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد. در این صورت داریم:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{10 \text{ V}}{5 \Omega} = 2 \text{ A}$$

ب) با توجه به رابطه‌ی ۱۱-۶، انرژی ذخیره شده در القاگر برابر است با:

$$U_B = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} (5 \times 10^{-3} \text{ H}) (2 \text{ A})^2 = 0.01 \text{ J} = 10 \text{ mJ}$$

انرژی ذخیره در القاگر شکل ۱۱-۱۵ چقدر است؟



شکل ۱۱-۱۵

### شبیه‌سازی



- تغییرات جریان و ولتاژ بر حسب زمان در یک مدار RL

### فعالیت عملی

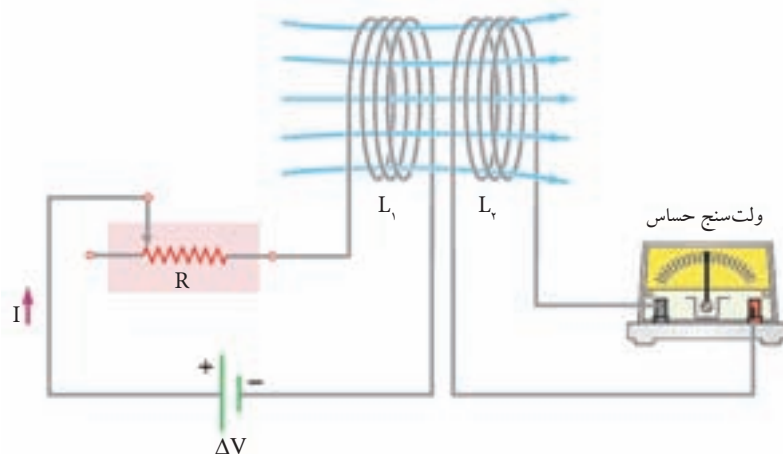


- القای متقابل
- به‌طور سنتی، کارخانه‌های ریخته‌گری از کوره‌های آتش برای ذوب فلزها استفاده می‌کنند. ولی، بسیاری از کارخانه‌های ریخته‌گری امروزی برای پرهیز از آلودگی‌های ناشی از این کوره‌ها، از کوره‌های القایی استفاده می‌کنند که در آنها فلزها با جریان سیم‌های عایقی گرم می‌شوند که به دور ظرفی که فلزها را در خود جای داده است، پیچیده شده‌اند.
- کوره‌ی القایی در مقیاس کوچک



## ۱۱-۷ القای متقابل

اگر دو پیچه، که اکنون می‌توانیم آن‌ها را القاگر بخوانیم، نزدیک یکدیگر باشند، جریان  $I$  در یک پیچه، سبب عبور شار مغناطیسی از پیچه‌ی دیگر می‌شود (شکل ۱۱-۱۶). با تغییر مقاومت رئوستا، جریان و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از پیچه‌ی دوم نیز تغییر می‌کند. تغییر شار مغناطیسی عبوری از پیچه دوم بنا به قانون القای فارادی، سبب ایجاد یک نیروی محرکه‌ی القایی در آن می‌شود. این فرایند، **القای متقابل** خوانده می‌شود و به کمک آن می‌توان انرژی را از وسیله‌ای به وسیله‌ی دیگر منتقل کرد.



شکل ۱۱-۱۶ با تغییر جریان عبوری از القاگر  $L_1$ ، شار مغناطیسی عبوری از القاگر  $L_2$  نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار مغناطیسی، سبب ایجاد یک نیروی محرکه‌ی القایی در القاگر  $L_2$  می‌شود که می‌توان آن را توسط یک ولت‌سنج حساس مشاهده نمود.

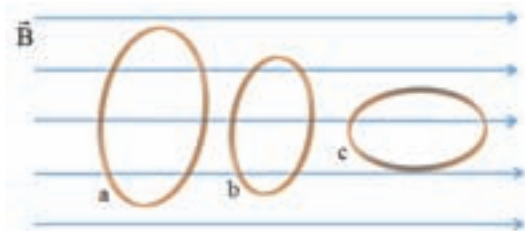
اگر تمام شار مغناطیسی ایجاد شده توسط یک پیچه یا القاگر از پیچه‌ی دیگر بگذرد، در این صورت ضریب القای متقابل، که آن را با نماد  $M$  نشان می‌دهند، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad (11-7)$$



### پرسش‌های مفهومی

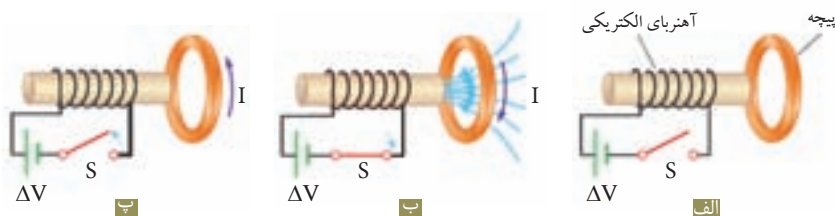
۱- شکل ۱۱-۱۷ سه حلقه‌ی دایره‌ای شکل را که عمود بر صفحه‌ی کتاب هستند نشان می‌دهد. شعاع حلقه‌ی  $a$  بزرگ‌تر از حلقه‌های  $b$  و  $c$  است. این حلقه‌ها درون میدان مغناطیسی یکنواختی قرار دارند. شار مغناطیسی عبوری از این حلقه‌ها را با یکدیگر مقایسه کنید.



شکل ۱۱-۱۷

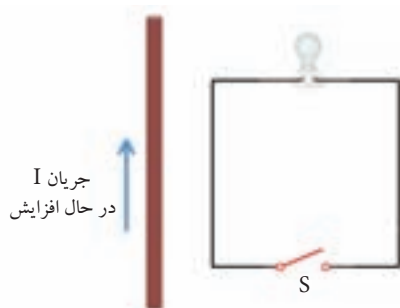
۲- چرا واژه‌ی تغییر در این فصل زیاد به کار رفته است؟

۳- در شکل ۱۱-۱۸ الف کلید مدار باز، در شکل ب کلید بسته و در مدار شکل پ کلید باز می‌شود. دریافت خود را از آنچه در هر مرحله رخ می‌دهد با توجه به مفاهیمی که فرا گرفتید توضیح دهید.



شکل ۱۱-۱۸

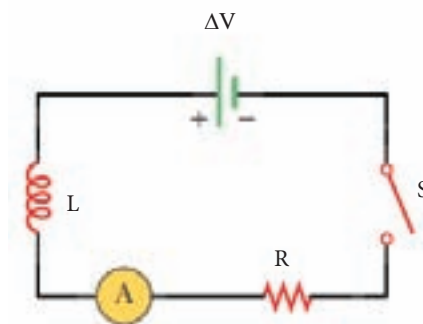
۴- شکل ۱۱-۱۹ سیم حامل جریانی را نشان می‌دهد که جریان عبوری از آن در حال افزایش است. با بستن کلید  $S$  چه اتفاقی را پیش‌بینی می‌کند؟ برای پیش‌بینی خود دلایل کافی ارائه دهید.



شکل ۱۱-۱۹

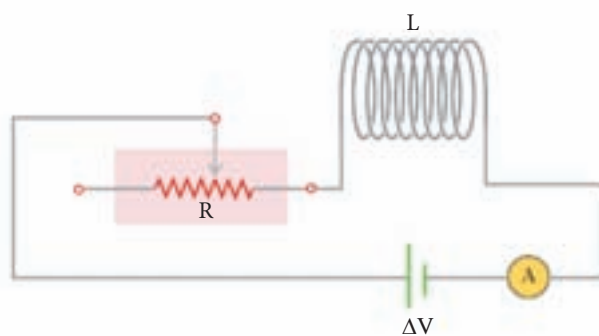


۵- در مدار شکل ۱۱-۲۰ پس از بستن کلید S تمام آنچه را که رخ می دهد به دقت توضیح دهید.



شکل ۱۱-۲۰

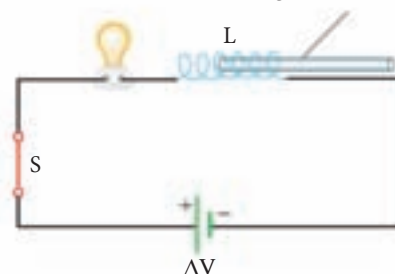
۶- شکل ۱۱-۲۱ مدار شامل یک القاگر (سیملوله)، باتری، رئوستا و آمپرسنج را نشان می دهد که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ مولد، انرژی ذخیره شده در القاگر را افزایش دهیم چه راه هایی را پیشنهاد می کنید؟



شکل ۱۱-۲۱

۷- در حین وارد کردن هسته ی فرومغناطیس درون القاگر مدار شکل ۱۱-۲۲ چه تغییری در نور لامپ رخ می دهد؟ توضیح دهید.

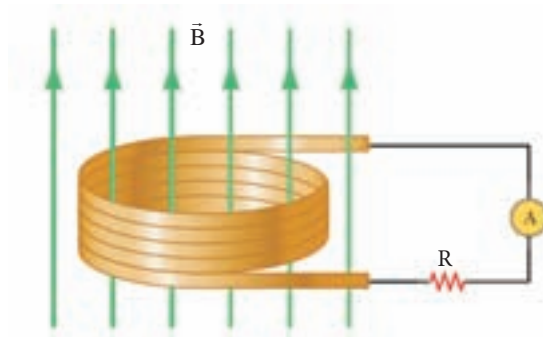
هسته ی فرو مغناطیس



شکل ۱۱-۲۲

## مسئله‌ها

۱- در مدار شکل ۱۱-۲۳، با افزایش شار مغناطیسی عبوری از القاگر (پیچه) در مدت ۲۰ میلی ثانیه، جریانی که آمپرسنج می‌خواند از صفر به ۱ A / ۰ می‌رسد. اگر ضریب خودالقایی القاگر ۵ H / ۰ باشد، بزرگی نیروی محرکه‌ی خودالقا شده توسط القاگر چقدر است؟



شکل ۱۱-۲۳

۲- آهنک تغییر جریان در القاگری ۲۵ kA/s است. اگر بزرگی نیروی محرکه‌ی خودالقا شده ۱۷ V باشد، ضریب خودالقایی القاگر را پیدا کنید.

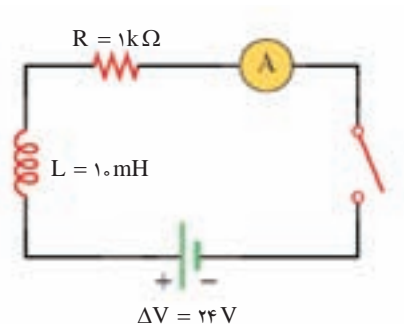
۳- سطح مقطع و طول سیملوله‌ی شکل ۱۱-۲۴ به ترتیب ۲۰ cm<sup>۲</sup> و ۸۰ cm است. اگر تعداد حلقه‌های این سیملوله برابر ۱۰۰۰ باشد، ضریب خودالقایی آن را پیدا کنید.

۴- در مدار شکل ۱۱-۲۵ مطلوب است

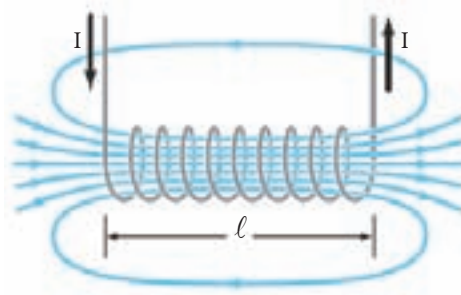
الف) ثابت زمانی القایی.

ب) مدت زمانی که طول می‌کشد تا جریانی که آمپرسنج می‌خواند، بیشینه شود.

پ) بیشینه‌ی مقدار جریانی که آمپرسنج می‌خواند.



شکل ۱۱-۲۵

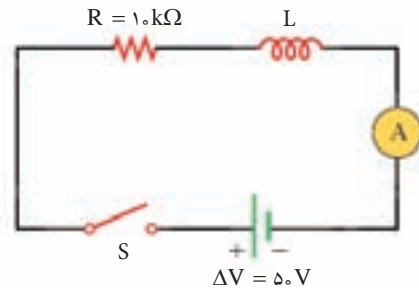


شکل ۱۱-۲۴

- ۵- در مدار شکل ۱۱-۲۵، پس از آن که کلید S بسته و جریان به بیشینه خود رسید، انرژی ذخیره شده در القاگر چقدر است؟
- ۶- در مدار شکل ۱۱-۲۶ پس از مدت  $5\text{ ms}$  از بستن کلید S، جریان در مدار به  $2\text{ mA}$  می‌رسد.

الف) ضریب خودالقایی القاگر را به دست آورید.

ب) در همین مدت چقدر انرژی در القاگر ذخیره می‌شود؟



شکل ۱۱-۲۶

## ابن هیثم



ابوعلی حسن بن حسن بن هیثم (۳۶۰-۴۳۶ق) متولد بصره، اگرچه به جهت هوش و ذکاوتش به مقام وزارت رسید، ولی شور و شوق فراوانش به علم و دانش وی را برآن داشت تا از وزارت بگذرد و خود را وقف پژوهش و نگارش در زمینه‌های گوناگون علوم روزگار خود کند. نوشته‌های ارزشمندش که برآمده از پژوهش‌های کاربردی بود سبب گردید تا پدر علوم تجربی لقب گیرد. ابن هیثم در زمینه‌های مختلف دانش از ریاضی، اخترشناسی، پزشکی، فلسفه و به ویژه فیزیک آثاری جاودان از خود به یادگار گذاشته است که پس از هزارسال همچنان مورد توجه بسیاری از دانشمندان در سراسر جهان قرار دارد. در مغرب زمین وی را با نام «الْهَیْثَمِی» (Alhazene) می‌شناسند. ابن هیثم ۴۵ اثر در ریاضی، ۳۰ اثر در اخترشناسی، یک اثر در علم موسیقی، و ۱۶ اثر بسیار ارزنده در فیزیک را به رشته‌ی تحریر آورده است. نگاشته‌های فیزیک شامل:

«کتاب المناظر»، «مقاله فی الضوء»، «کتاب فی الضوء الکواکب»، «فی الضوء القمر»، «فی الکرمه المحرقه» همگی مربوط به فیزیک نور و ساختمان چشم، و «مقاله فی المرااثا المحرقه بالقطوع»، «مقاله فی مرااثا المحرقه بالدوائر» در زمینه‌ی آینه‌ها و کاربرد آن‌ها برای افروختن آتش، «مقاله فی الصّورالکسوف» در پیوند با اتاق تاریک که برای نخستین بار توسط این دانشمند مسلمان مطرح گردیده است، «فی الهاله و قوس قزح» در خصوص رنگین کمان، «کتاب فی کیفیه الاظلال» در مورد سایه‌ها، «مقاله المناظر علی طریق بطلمیوس»، «قول فی الکواکب الحادثه فی الجوّ»، «مقاله فی الجزء الذی لایتجزاء»، «مقاله فی البنکام» در خصوص ساعت‌های آبی، «مقاله فی مرکز الاثقال» درباره‌ی گرانیگاه، و سرانجام «قول فی قسطون» در مورد قیاس و باسکول. جالب است بدانید، تا پیش از ابن هیثم دانشمندان دلیل دیدن انسان توسط چشم را ناشی از نوری می‌دانستند که از چشم انسان به جسم می‌تابد، درست عکس واقعیت که دلیل دیدن ناشی از نوری است که از جسم به چشم می‌تابد. نوآوری‌های ابن هیثم جهان دانش را از بن‌بستی چندین صدساله رهائی بخشید و راه را برای آیندگان فروزان و هموار گردانید.

# جریان متناوب

# ۱۲



در تمام دنیا، تقریباً همه‌ی انرژی الکتریکی نه به صورت جریان‌های مستقیم، بلکه به صورت جریان‌های متناوب تولید، متنقل و توزیع می‌شوند. چالش مهم مهندسان برق، طراحی دستگاه‌هایی برای جریان متناوب است که انرژی الکتریکی را به طور مؤثر و با اتلاف کم انتقال دهند.

## سیمای فصل دوازدهم

- ۱-۱۲ مقایسه‌ی جریان‌های متناوب و مستقیم با یکدیگر
- ۲-۱۲ شکل‌های جریان متناوب
- ۳-۱۲ ویژگی‌های موج سینوسی
- ۴-۱۲ تولید جریان متناوب
- ۵-۱۲ معادله‌های ولتاژ و جریان سینوسی بر حسب زمان
- ۶-۱۲ مقادیر میانگین و مؤثر ولتاژ و جریان یک منبع ac سینوسی
- ۷-۱۲ مقاومت در یک مدار ac سینوسی
- ۸-۱۲ خازن در یک مدار ac سینوسی
- ۹-۱۲ القاگر در یک مدار ac سینوسی
- ارزشیابی فصل دوازدهم

## جریان متناوب

### هدف‌های آموزشی

با مطالعه‌ی این فصل، شما

فرا می‌گیرید:

- چه تمایزی بین جریان متناوب و جریان مستقیم وجود دارد.
- انواع جریان متناوب را با رسم شکل معرفی کنید.
- ویژگی‌های موج سینوسی چیست.
- مقادیر میانگین و مؤثر جریان و ولتاژ در یک منبع  $ac$  سینوسی چگونه محاسبه می‌شوند.
- در یک مدار شامل مقاومت  $R$  و منبع  $ac$  سینوسی، چه ارتباطی بین شکل موج ولتاژ و موج جریان وجود دارد.
- در یک مدار شامل خازن  $C$  و منبع  $ac$  سینوسی، چه ارتباطی بین شکل موج ولتاژ و موج جریان وجود دارد.
- مقاومت خازنی به چه عواملی بستگی دارد و مقاومت خازنی معادل در مدارهای متوالی و موازی چگونه محاسبه می‌شود.
- در یک مدار شامل القاگر  $L$  و منبع  $ac$  سینوسی، شکل موج ولتاژ و موج جریان چه ارتباطی با یکدیگر دارند.
- مقاومت القایی به چه عواملی بستگی دارد و مقاومت القایی معادل در مدارهای متوالی و موازی چگونه به دست می‌آید.

جریان متناوب ( $ac$ ) رفتاری متناسب با نامش دارد. حامل‌های بار الکتریکی ابتدا در یک جهت مدار و سپس در جهت مخالف آن حرکت می‌کنند، حرکت رفت و برگشتی که به طور پی در پی ادامه می‌یابد.

در سال ۱۸۸۰ میلادی بحث‌های داغ و تندی بین دو مخترع در مورد بهترین روش توزیع برق صورت گرفت. توماس ادیسون موافق جریان مستقیم، یعنی جریانی که با زمان تغییر نمی‌کند، بود. در حالی که جورج وستینگهاوس از جریان متناوب حمایت می‌کرد که در آن ولتاژها و جریان‌ها به طور سینوسی تغییر می‌کنند.

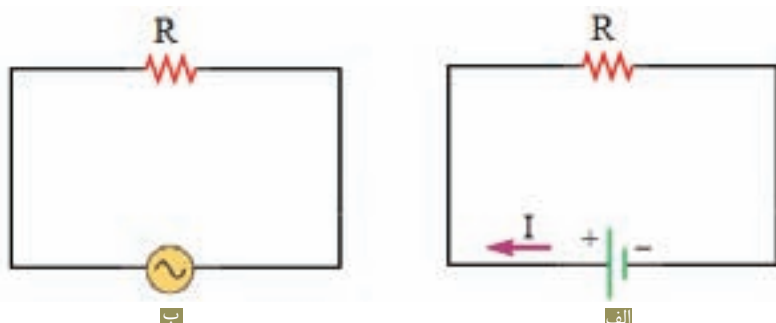
وستینگهاوس معتقد بود که مبدل‌ها (که در پایان این فصل بررسی خواهند شد) می‌توانند برای بالا بردن و پایین آوردن ولتاژ  $ac$  ولی نه  $dc$  مورد استفاده قرار گیرند. سرانجام وستینگهاوس پیروز شد و بیش‌تر وسایل خانگی امروز و سامانه‌های توزیع برق با جریان متناوب کار می‌کنند. هر وسیله‌ای که دو شاخه‌ی آن را به خروجی دیوار می‌زنید از  $ac$  استفاده می‌کند. در این فصل نگاهی خواهیم داشت به مشخصه‌های جریان متناوب و همچنین فرا می‌گیریم که مقاومت‌ها، القاگرها و خازن‌ها چگونه در مدارهای جریان متناوب کار می‌کنند. بسیاری از اصولی که در فصل‌های پیشین به دست آوردیم، در این فصل مفید و قابل استفاده‌اند.

### ۱-۱۲ مقایسه‌ی جریان‌های متناوب و مستقیم با یکدیگر

شکل ۱-۱۲ دو مدار ساده‌ی جریان مستقیم ( $dc$ ) و جریان متناوب ( $ac$ ) را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود جهت مشخصی برای جریان در مدار جریان مستقیم تعیین شده است در حالی که در یک مدار جریان متناوب، به دلیل تغییر جهت جریان در



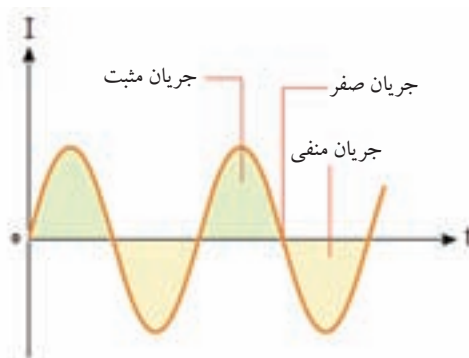
طی زمان، نمی توان یک جهت مشخص و دائمی را برای جریان در نظر گرفت. افزون بر این ها، ولتاژ دو سر باتری یا منبع تغذیه در مدارهای جریان مستقیم، ثابت و در یک جهت است و مقدار آن در طی زمان کم و زیاد نمی شود. در حالی که در مدارهای جریان متناوب، جهت و مقدار ولتاژ دو سر منبع تغذیه به طور دائم تغییر می کند.



شکل ۱۲-۱ (الف) یک مدار ساده ی جریان مستقیم و (ب) یک مدار ساده ی جریان متناوب

## ۱۲-۲ شکل های جریان متناوب

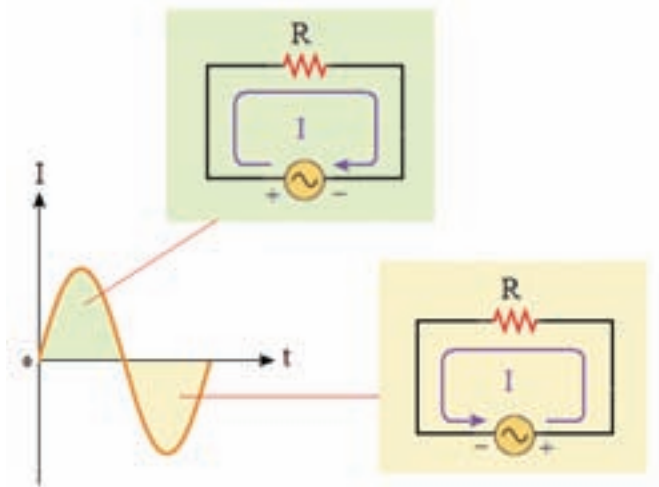
اگر چه جریان متناوب می تواند شکل های متنوعی داشته باشد، ولی متداول ترین شکلی که با آن مواجه می شویم همان است که شرکت های تولید برق فراهم می کنند. تمامی نیروگاه های تولید برق در دنیا و همچنین ایران، جریان متناوبی تولید می کنند که به جهت شباهت با یک موج سینوسی، **جریان متناوب سینوسی** نامیده می شود (شکل ۱۲-۲).



شکل ۱۲-۲ جریان متناوب سینوسی، متداول ترین شکل جریان متناوب است. هر نیمه از شکل موج جریان، قرینه ی نیمه دیگر آن با قطب معکوس است.

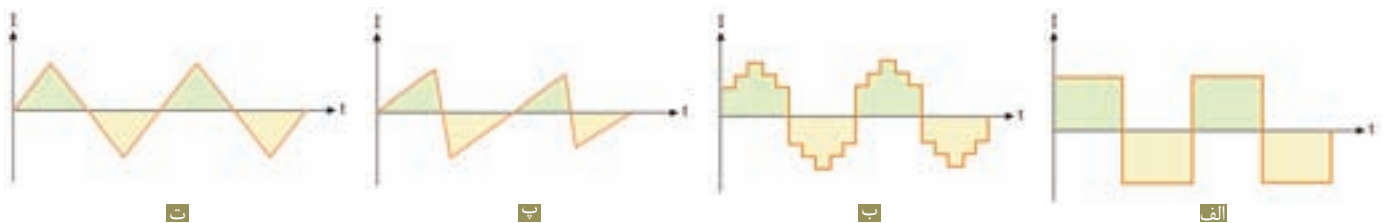
برای درک بهتر نمودار جریان متناوب سینوسی، به شکل ۱۲-۳ توجه کنید. همان طور که دیده می شود در هر نیمه ی موج جریان، قطبیت باتری ثابت است و در نیمه ی دیگر قطبیت باتری و در نتیجه جهت جریان برعکس می شود. این فرایند به طور پی در پی توسط منبع تغذیه تکرار شده و جریان متناوب را در مدار برقرار می کند (شکل ۱۲-۳).





شکل ۳-۱۲ در هر نیمه‌ی موج جریان متناوب، جهت نیروی محرکه و در نتیجه جهت جریان ثابت می‌ماند ولی قطبیت آن‌ها برعکس یکدیگر است.

در شکل ۴-۱۲ نمونه‌های دیگری از موج متناوب نشان داده شده است که به منظور خاصی تولید می‌شوند و در کاربردهای روزمره، متداول نیستند.



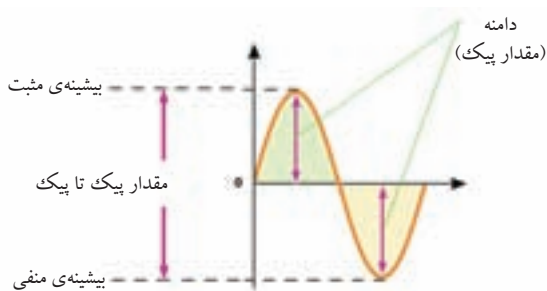
شکل ۴-۱۲ چند نمونه از شکل‌های موج جریان متناوب (الف) موج مربعی، (ب) موج پله‌ای، (پ) موج دندانه‌اره‌ی، (ت) موج مثلثی.

## ۳-۱۲ آشنایی با ویژگی‌های موج سینوسی

همان‌طور که گفته شد در این کتاب به بررسی جریان‌ها و ولتاژهای متناوب سینوسی می‌پردازیم. به همین دلیل، پیش از بررسی تولید جریان متناوب و بررسی معادله‌های ولتاژ و جریان متناوب سینوسی، با برخی از ویژگی‌های موج سینوسی آشنا می‌شویم.

### دامنه‌ی موج

دامنه‌ی یک موج سینوسی در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بیش‌ترین جابه‌جایی یا فاصله از وضعیت تعادل، در امتداد قائم (رو به بالا یا رو به پایین) برابر دامنه‌ی موج (مقدار پیک) است. فاصله‌ی پیک تا پیک منحنی دو برابر دامنه یا دو برابر مقدار پیک است.



شکل ۵-۱۲ مقدار بیشینه جابه‌جایی از وضع تعادل، دامنه‌ی موج (مقدار پیک) نامیده می‌شود.

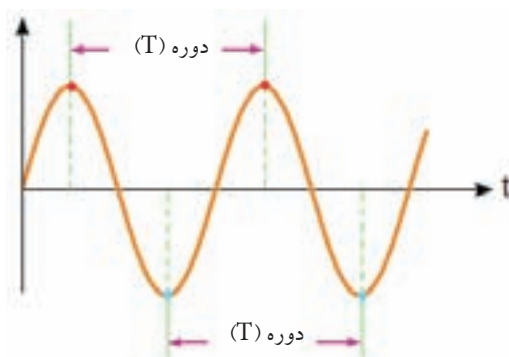
## دوره‌ی تناوب موج

دوره‌ی تناوب،  $T$ ، زمان یک چرخه‌ی کامل است (شکل ۱۲-۶). این کمیت همواره مثبت است. یکای  $T$  در SI ثانیه است اما گاهی بر حسب «ثانیه بر چرخه» نیز بیان می‌شود.



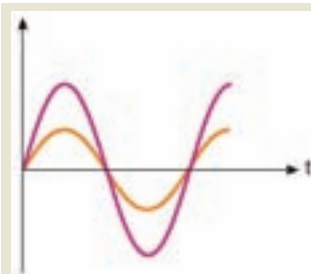
شکل ۶-۱۲ (الف) زمان یک چرخه‌ی کامل، برابر دوره‌ی تناوب موج است. (ب) دوره‌ی تناوب در هر چرخه‌ی یک موج سینوسی یکسان است.

شکل ۱۲-۷ راه‌های دیگری را برای پیدا کردن دوره‌ی تناوب یک موج نشان می‌دهد.



شکل ۷-۱۲ مدت زمانی که موج از دو نقطه‌ی مشابه متوالی (مثلاً دو بیشینه‌ی مثبت متوالی) می‌گذرد، برابر دوره‌ی تناوب موج است.

### مثال مفهومی ۱۲-۱



شکل ۸-۱۲

در شکل ۱۲-۸ دو موج سینوسی به طور مشترک روی یک دستگاه مختصات رسم شده‌اند. ویژگی‌های این دو موج را با یکدیگر مقایسه کنید.

پاسخ:

این دو موج دارای دوره‌ی تناوب یکسان ولی دامنه‌ی متفاوت هستند. دامنه‌ی موج بنفش رنگ، بیش‌تر از دامنه‌ی موج نارنجی رنگ است.

## بسامد (فرکانس) موج

بسامد،  $f$ ، تعداد چرخه ها در یکای زمان است و در واقع برابر عکس دوره‌ی تناوب

موج است. یعنی:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-12)$$

بسامد، کمیتی است همواره مثبت و یکای آن در SI عکس ثانیه ( $s^{-1}$ ) است که

هرتز (Hz) نامیده می شود.

$$1 \text{ Hz} = 1 s^{-1} = 1 \frac{\text{چرخه}}{\text{ثانیه}}$$

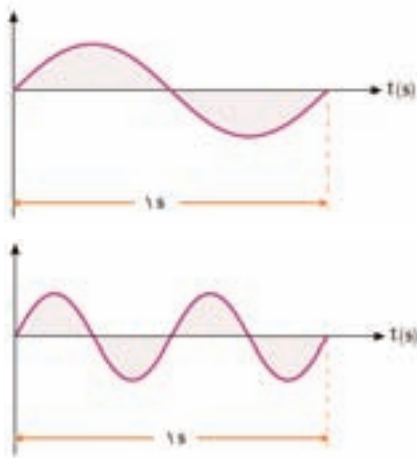
این یکا به افتخار دانشمند آلمانی هنریش هرتز (۱۸۹۴-۱۸۵۷)، پیشگام تحقیق در

موج های الکترو مغناطیسی، به این نام خوانده می شود.

شکل ۱۲-۹ دو موج با دامنه‌ی یکسان ولی بسامد متفاوت را نشان می دهد. همان طور که

دیده می شود یکی از موج ها در مدت ۱s، یک چرخه‌ی کامل و موج دیگر در همین مدت،

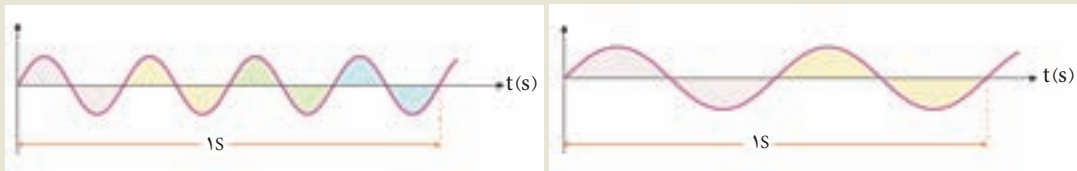
دو چرخه‌ی کامل پیموده است. به این ترتیب بسامد موج اول ۱Hz بسامد موج دوم ۲Hz است.



شکل ۱۲-۹ دو موج سینوسی با بسامدهای متفاوت و دامنه‌ی یکسان. بسامد موج پایینی دو برابر بسامد موج بالایی است.

### مثال ۱۲-۲

بسامد و دوره‌های تناوب هر یک از موج های شکل ۱۲-۱۰ را پیدا کنید.



ب

الف

شکل ۱۲-۱۰ دو موج با بسامد متفاوت. هر چرخه با یک رنگ از چرخه‌های دیگر متمایز شده است.

حل:

موج اول از دو چرخه‌ی کامل در واحد زمان (۱s) تشکیل شده است. بنابراین بسامد موج برابر  $f = 2 \text{ Hz}$  است. دوره‌ی

تناوب این موج برابر است با:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2 \text{ Hz}} = 0.5 \text{ s}$$

موج دوم از چهار چرخه‌ی کامل تشکیل شده و در نتیجه بسامد آن برابر  $f = 4 \text{ Hz}$  است دوره‌ی تناوب این موج برابر

است با:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{4 \text{ Hz}} = 0.25 \text{ s}$$

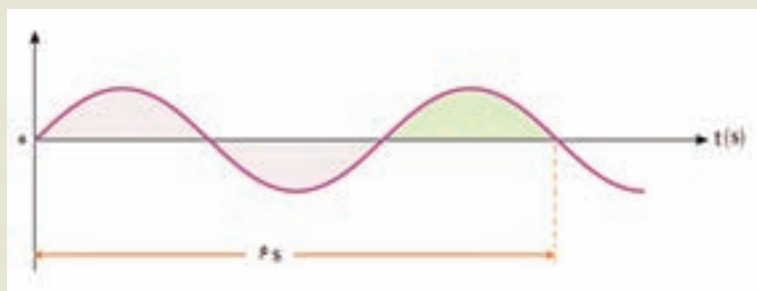
## بسامد زاویه‌ای موج

بسامد زاویه‌ای که با حرف یونانی  $\omega$  (بخوانید امگا) نشان داده می‌شود بنا به تعریف  $2\pi$  برابر بسامد است. یعنی:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (1-12)$$

به زودی در بخش بعدی دلیل مفید بودن کمیت  $\omega$  را نشان می‌دهیم. بسامد زاویه‌ای آهنگ تغییر یک کمیت زاویه‌ای را بیان می‌کند که همواره بر حسب رادیان اندازه‌گیری می‌شود. پس یکای بسامد زاویه‌ای، رادیان بر ثانیه (rad/s) است.

### مثال ۳-۱۲



شکل ۱۱-۱۲

- با توجه به موج شکل ۱۱-۱۲ مطلوب است:
- الف) دوره‌ی تناوب.
  - ب) بسامد موج.
  - پ) بسامد زاویه‌ای موج.

**حل:**

الف) با توجه به این که  $1/5$  چرخه‌ی کامل در  $6\text{ s}$  ثانیه طی شده است، دوره‌ی تناوب موج برابر  $T = 4\text{ s}$  است؟ (چرا؟)

ب) با توجه به رابطه‌ی ۱-۱۲ داریم:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{4\text{ s}} = 0.25\text{ Hz}$$

پ) با توجه به تعریف بسامد زاویه‌ای داریم:

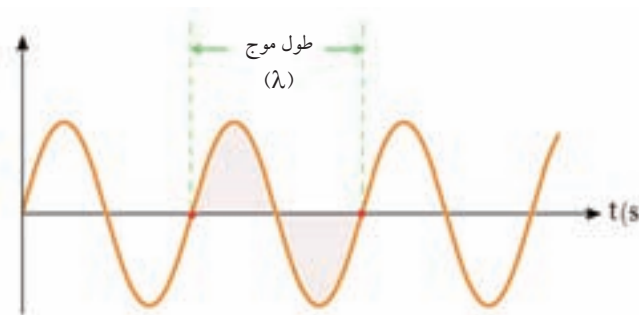
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2(3.14\text{ rad})}{4\text{ s}} = 1.57\text{ rad/s}$$

### تمرین ۱-۱۲

بسامد زاویه‌ای موجی  $10\text{ rad/s}$  است. دوره‌ی تناوب و بسامد این موج را پیدا کنید.

## طول موج

طول موج، مسافتی است که موج در یک چرخه‌ی کامل طی می‌کند (شکل ۱۲-۱۲). طول موج را با حرف یونانی  $\lambda$  (بخوانید لاندا) نشان می‌دهند و یکای آن در SI، متر است.



شکل ۱۲-۱۲

طول موج با عکس بسامد متناسب است و رابطه‌ی زیر بین سرعت موج ( $v$ )، بسامد موج ( $f$ ) و طول موج ( $\lambda$ ) برقرار است:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (۳-۱۲)$$

یا بر حسب دوره‌ی تناوب داریم:

$$\lambda = vT \quad (۴-۱۲)$$

### مثال ۴-۱۲

موج‌های رادیویی، نوع موج الکترو مغناطیسی هستند که با سرعت  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  منتشر می‌شوند طول موج یک موج رادیویی FM با بسامد  $104 \text{ MHz}$  چقدر است؟

**حل:**

با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$v = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad f = 104 \text{ MHz} = 104 \times 10^6 \text{ Hz}$$

به این ترتیب از رابطه‌ی ۳-۱۲ داریم:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{104 \times 10^6 \text{ Hz}} = 2.88 \text{ m}$$

گوش انسان قادر است موج‌های صوتی با بسامد ۲۰ هرتز تا ۲۰۰۰۰ هرتز را بشنود. اگر سرعت صوت در هوا ۳۴۵ متر بر ثانیه باشد، کم‌ترین و بیش‌ترین طول موج‌های صوتی که انسان قادر به شنیدن آن است، چقدر است؟

**حل:**

چون طول موج نسبت عکس با بسامد دارد، کم‌ترین طول موج، متناظر با بیش‌ترین بسامد است. به این ترتیب کم‌ترین طول موج‌های صوتی که انسان قادر به شنیدن آن‌هاست برابر است با:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{345 \text{ m/s}}{20000 \text{ Hz}} = 0.01725 \text{ m} \approx 17 \text{ mm}$$

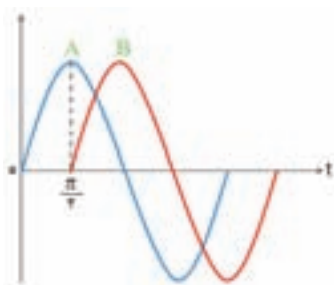
همچنین بیش‌ترین طول موج، متناظر با کم‌ترین بسامد است پس:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{345 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = 17.25 \text{ m}$$

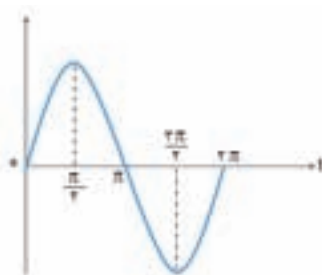
### زاویه‌ی فاز و اختلاف فاز در موج‌های سینوسی

در شکل ۱۲-۱۳ یک چرخه‌ی کامل از یک موج سینوسی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در  $t = 0$  چرخه‌ی موج سینوسی از مبدأ شروع شده است. در این حالت گفته می‌شود که زاویه‌ی فاز موج صفر است.

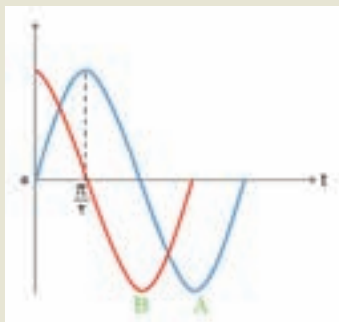
شکل ۱۲-۱۴ دو چرخه‌ی کامل از موج سینوسی را نشان می‌دهد که در  $t = 0$  وضعیت متفاوتی نسبت به مبدأ دارند. همان‌طور که دیده می‌شود موج B به اندازه‌ی  $\frac{\pi}{2}$  رادیان (۹۰ درجه) به سمت راست مبدأ جابه‌جا شده است. در این حالت گفته می‌شود دو موج A و B نسبت به یکدیگر اختلاف فاز دارند و در این حالت خاص مقدار اختلاف فاز  $\frac{\pi}{2}$  رادیان یا ۹۰ درجه است. با توجه به این که موج B پس از موج A به وجود آمده است (به محور زمان توجه کنید) اصطلاحاً گفته می‌شود که موج A نسبت به موج B تقدم فاز دارد یا برعکس می‌توان گفت موج B نسبت به موج A تأخیر فاز دارد.



شکل ۱۲-۱۴ بین موج‌های A و B به اندازه‌ی  $\frac{\pi}{2}$  یا ۹۰ درجه اختلاف فاز وجود دارد.



شکل ۱۲-۱۳ یک چرخه‌ی کامل از موج سینوسی با زاویه فاز صفر

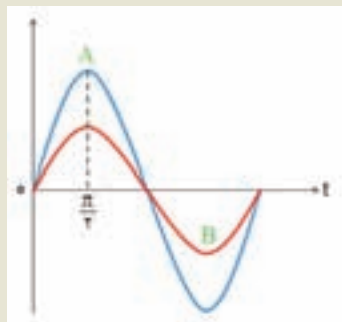


شکل ۱۲-۱۵

شکل ۱۲-۱۵ دو موج سینوسی را نسبت به یکدیگر نشان می دهد موج A نسبت به موج B چه وضعیتی دارد ؟

پاسخ:

موج A نسبت به موج B تأخیر فاز دارد (عقب تر است) زیرا همان طور که دیده می شود ابتدا موج B بیشینه شده و سپس با  $\frac{\pi}{2}$  تأخیر فاز موج A بیشینه می شود.



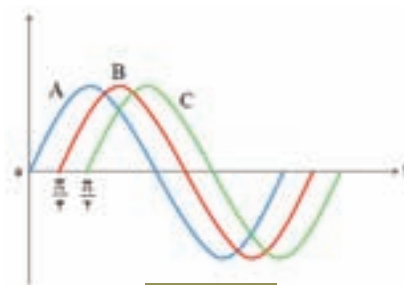
شکل ۱۲-۱۶

شکل ۱۲-۱۶ دو موج سینوسی را نسبت به یکدیگر نشان می دهد. مشخصات این دو موج را با هم مقایسه کنید.

پاسخ:

این دو موج نسبت به یکدیگر هم فازند یا به عبارت دیگر اختلاف فاز ندارند. همچنین دوره ی تناوب و طول موج این دو موج با یکدیگر یکسان است ولی دامنه ی موج A بیش تر از دامنه ی موج B است.

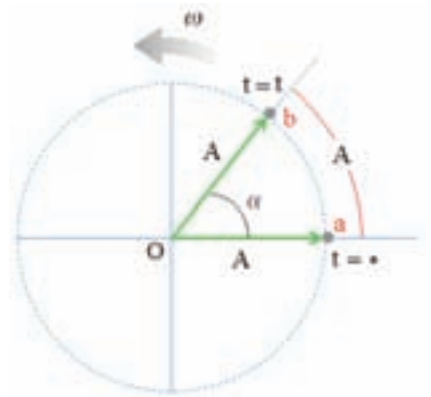
شکل ۱۲-۱۷ سه موج سینوسی را نسبت به یکدیگر نشان می دهد. تقدم یا تأخیر فاز هر یک از این موج ها را نسبت به یکدیگر بیان کنید.



شکل ۱۲-۱۷

## حرکت تناوبی و موج سینوسی

شکل ۱۲-۱۸ موقعیت ذره‌ای را در دو لحظه  $t=0$  و  $t=t$  را نشان می‌دهد که با سرعت زاویه‌ای ثابت  $\omega$  روی یک مسیر دایره‌ای در حرکت است. در لحظه‌ی  $t=0$ ، ذره در نقطه  $a$  و در لحظه‌ی  $t=t$ ، ذره در نقطه‌ی  $b$  قرار دارد. به این ترتیب زاویه‌ی پیموده شده توسط ذره برابر  $\alpha = \omega t$  است.<sup>۱</sup>

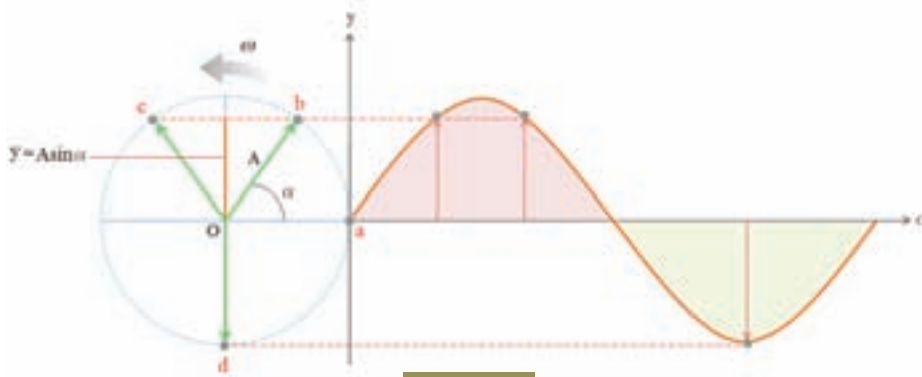


شکل ۱۲-۱۸ حرکت دایره‌ای ذره‌ای با سرعت زاویه‌ای ثابت  $\omega$ . اگر کمان  $ab$  برابر شعاع دایره، یعنی  $A$ ، باشد در این صورت زاویه‌ی برابر یک رادیان یا  $57.3^\circ$  درجه است.

وقتی ذره با سرعت زاویه‌ای ثابت  $\omega$  یک مسیر دایره‌ای را می‌پیماید، سایه‌ی ذره روی محور قائم یا محور افقی یک حرکت تناوبی یا رفت و برگشتی را انجام می‌دهد. این موضوع برای چند نقطه‌ی دلخواه در شکل ۱۲-۱۹ نشان داده شده است. وقتی ذره در نقطه‌ی  $b$  قرار دارد، فاصله‌ی سایه‌ی آن روی محور قائم از نقطه  $O$  برابر  $y = A \sin \alpha$  است. با جای گذاری  $\alpha = \omega t$  در این معادله، خواهیم داشت.

$$y = A \sin \omega t \quad (5-12)$$

این رابطه، معادله‌ی حرکت تناوبی سایه‌ی ذره‌ای را در امتداد محور قائم توصیف می‌کند که با سرعت زاویه‌ای ثابت  $\omega$  روی یک مسیر دایره‌ای می‌چرخد. این حرکت تناوبی، می‌تواند منجر به تولید یک موج سینوسی شود.



شکل ۱۲-۱۹

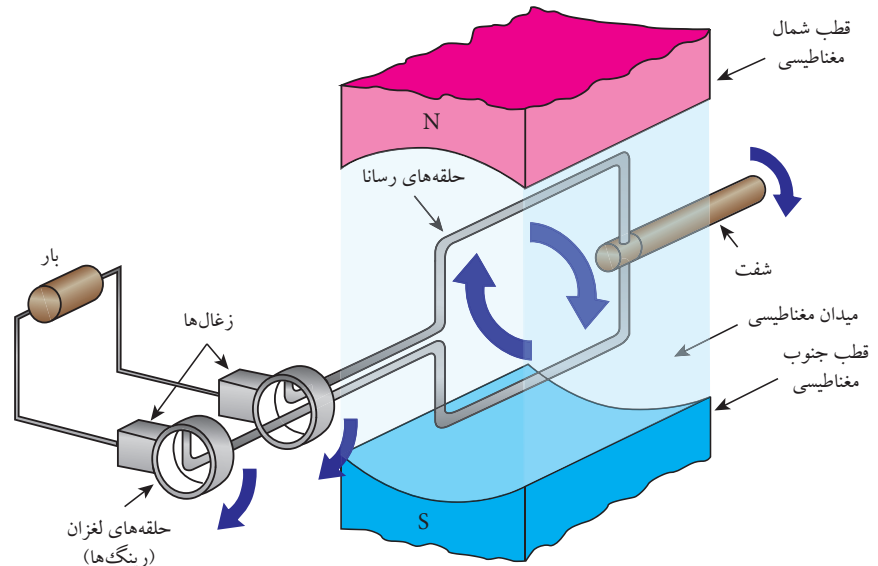
## ۱۲-۴ تولید جریان متناوب

در فصل قبل با پدیده‌ی القای الکترو مغناطیسی آشنا شدیم. همان‌طور که دیدیم با چرخیدن (یا حرکت) یک حلقه یا پیچه‌ی رسانا درون میدان مغناطیسی، به دو سر آن نیروی محرکه‌ی الکتریکی القا می‌شود. نیروی محرکه‌ی القا شده، سبب برقراری یک جریان القایی در مدار شامل حلقه می‌شود. آن چه بیان شد ساز و کار تولید جریان متناوب توسط یک مولد (ژنراتور) ساده است که در پایان فصل ۱۰ به طور مختصر بررسی کردیم.

۱- از علوم دوره راهنمایی به یاد دارید که هر گاه ذره‌ای با سرعت ثابت  $v$  روی یک مسیر مستقیم حرکت کند، پس از مدت  $t$ ، جابه‌جایی ذره برابر  $x = vt$  خواهد بود. در حرکت دایره‌ای یکنواخت نیز رابطه‌ی مشابهی وجود دارد.



به جهت اهمیت نحوه‌ی تولید جریان متناوب و آشنایی بیش‌تر با جزئیات آن، به شکل ۲۰-۱۲ که اجزای یک مولد ac را نشان می‌دهد، توجه کنید.

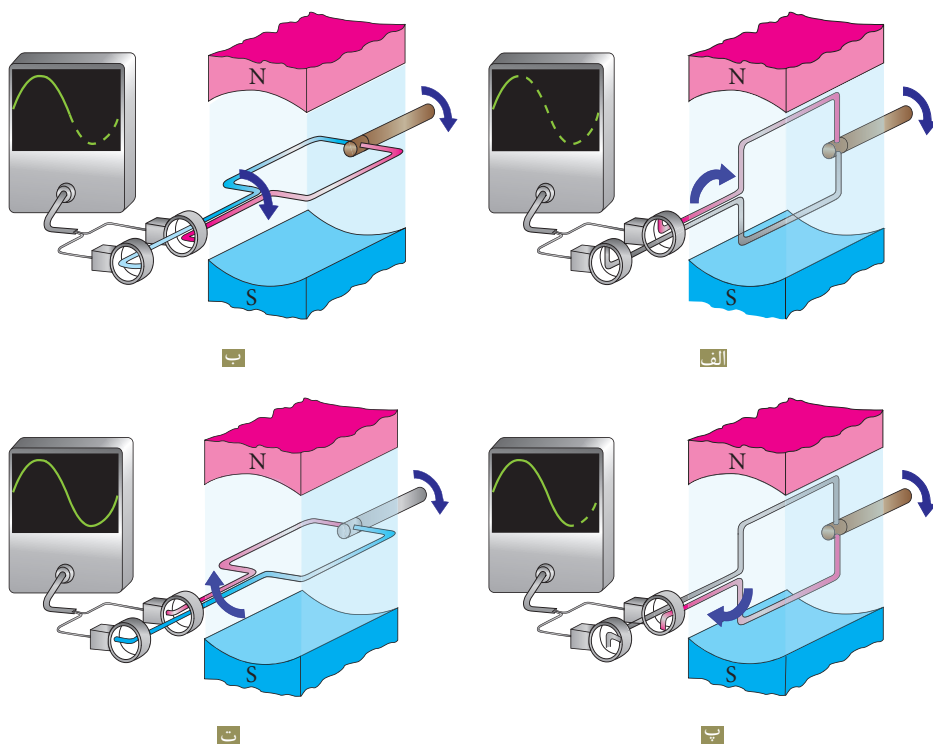


**شکل ۲۰-۱۲** اجزای مولد (ژنراتور) ساده‌ی ac. حرکت مکانیکی از طریق شفت، سبب چرخیدن حلقه درون میدان مغناطیسی می‌شود و جریان متناوبی را در مدار برقرار می‌کند.

اکنون خواهیم دید که در یک چرخه‌ی کامل چگونه جریان متناوب سینوسی توسط یک مولد تولید می‌شود. این موضوع در چهار مرحله یا به عبارت دیگر در چهار ربع چرخه در شکل ۲۱-۱۲ نشان داده شده است.

در ابتدا سطح حلقه عمود بر خطوط میدان مغناطیسی است و جریانی در مدار وجود ندارد. حلقه به اندازه  $\frac{1}{4}$  دور می‌چرخد تا در وضعیت شکل ۲۱-۱۲ الف قرار بگیرد. در حین این چرخش شار مغناطیسی عبوری از حلقه تغییر می‌کند و جریان از صفر تا مقدار بیشینه مثبت در مدار ایجاد می‌شود (اولین ربع چرخه). حلقه به چرخیدن ادامه می‌دهد تا در وضعیت شکل ۲۱-۱۲ ب قرار بگیرد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه‌ی مثبت به صفر می‌رسد (دومین ربع چرخه). پس از آن حلقه از وضعیت شکل ۲۱-۱۲ ب به وضعیت شکل ۲۱-۱۲ پ می‌رسد. در حین این چرخش، جریان از صفر به مقدار بیشینه منفی می‌رسد (سومین ربع چرخه).

سرانجام حلقه می‌چرخد و یک چرخه‌ی کامل طی می‌کند و به وضعیت شکل ۲۱-۱۲ ت می‌رسد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه‌ی منفی به صفر می‌رسد. این حرکت به طور پی در پی (متناوب) در حلقه ادامه می‌یابد و سبب ایجاد جریان متناوب می‌شود.



شکل ۱۲-۲۱ تولید جریان متناوب در یک چرخه کامل (الف) ربع چرخه اول (تناوب مثبت)، (ب) ربع چرخه دوم (تناوب مثبت)، (پ) ربع چرخه سوم (تناوب منفی)، (ت) ربع چرخه چهارم (تناوب منفی)

در نیروگاه‌های تولید برق، برای ایجاد جریان متناوب از مولدهای مخصوصی استفاده می‌شود که به آن‌ها **مولدهای صنعتی جریان متناوب** گفته می‌شود. در مولدهای صنعتی، پیچ‌ها ساکن‌اند و آهنربای الکتریکی درون آن‌ها می‌چرخد (شکل ۱۲-۲۲). در ایران بسامد برق تولید شده ۵۰ هرتز است و این بدان معناست که آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، ۵۰ بار درون سیم‌پیچ می‌چرخد.

بیش‌تر بدانید



● جریان متناوب یکسو شده



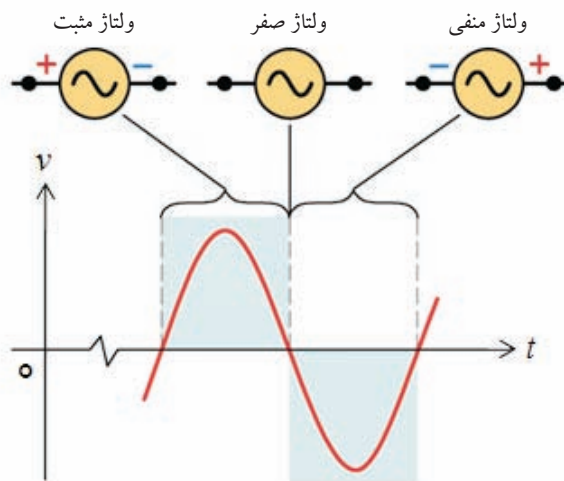
شکل ۱۲-۲۲ (الف) در مولدهای صنعتی، با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچ‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود (ب) نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق.

## ۱۲-۵ معادله‌های ولتاژ و جریان سینوسی بر حسب زمان

همان‌طور که دیدیم با چرخش یک حلقه یا پیچه با سرعت زاویه‌ای ثابت  $\omega$  درون میدان مغناطیسی، به دو سر آن نیروی محرکه یا ولتاژی سینوسی القا می‌شود که مقدار آن به طور دائم تغییر می‌کند اگر مقدار ولتاژ بیشینه را با  $V_{\max}$  (حروف بزرگ) و مقدار ولتاژ لحظه‌ای را با  $v$  (حرف کوچک) نشان دهیم، معادله‌ی ولتاژ بر حسب زمان، مشابه آن‌چه در یافتن معادله‌ی ۱۲-۵ دیدیم، به صورت زیر خواهد شد:

$$v = V_{\max} \sin \omega t \quad (۱۲-۶)$$

شکل ۱۲-۲۳ نمودار ولتاژ - زمان دو سر یک منبع ac سینوسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۲۳ نمودار  $v-t$  یک منبع ac سینوسی

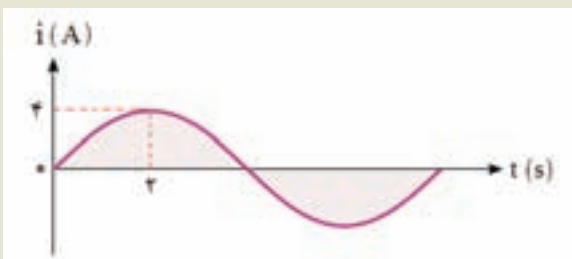
به همین ترتیب جریان سینوسی را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$i = I_{\max} \sin \omega t \quad (۱۲-۷)$$

که در آن  $i$  (حرف کوچک) جریان لحظه‌ای و  $I_{\max}$  (حرف بزرگ) بیشینه‌ی جریان یا دامنه‌ی جریان است.

### مثال ۱۲-۶

شکل ۱۲-۲۴ نمودار جریان متناوب سینوسی را نشان می‌دهد که توسط یک منبع ac تولید شده است. معادله‌ی جریان بر حسب زمان را بنویسید.



شکل ۱۲-۲۴

حل:

چون ربع چرخه در ۲s طی شده است، دوره‌ی تناوب برابر  $T = ۸s$  و در نتیجه بسامد زاویه‌ای برابر است با:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \times 3.14}{8s} = 0.785 \text{ rad/s}$$

با توجه به نمودار، بیشینه‌ی جریان برابر  $I_{\max} = 4A$  است. به این ترتیب از رابطه‌ی ۷-۱۲ داریم:

$$i = 4 \sin(0.785t)$$

توجه کنید که رابطه‌ی بالا بر حسب یکاهای SI نوشته شده است.

### مثال ۷-۱۲

معادله‌ی ولتاژ-زمان یک منبع ac سینوسی در SI به صورت  $v = ۱۲0 \sin ۱0\pi t$  است. مقدار ولتاژ را در لحظه‌ی  $t = 0.05s$  پیدا کنید.

حل:

با جای گذاری مقدار  $t$  در معادله‌ی ولتاژ-زمان داریم:

$$v = ۱۲0 \sin 10\pi(0.05s) = ۱۲0 \sin \frac{\pi}{2} = ۱۲0V$$

توجه کنید که  $\sin \frac{\pi}{2} = 1$ .

### تمرین ۳-۱۲

معادله‌ی جریان-زمان یک منبع ac سینوسی بر حسب یکاهای SI به صورت زیر است:

$$i = 2 \times 10^{-3} \sin 5\pi t$$

مقدار جریان در لحظه‌ی  $t = \frac{1}{30}s$  چقدر است؟

## ۱۲-۶ مقادارهای میانگین و مؤثر ولتاژ و جریان یک منبع ac سینوسی

همان‌طور که دیدیم مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان یک منبع ac سینوسی را می‌توان به کمک معادله‌های ۱۲-۶ و ۷-۱۲ به دست آورد (مثال ۷-۱۲ را دوباره ببینید). از آن‌جا که هیچ کدام از مقادارهای لحظه‌ای و حتی مقادارهای بیشینه قادر به بیان مقدار واقعی ولتاژ یا جریان یک منبع ac سینوسی نیستند، به جای آن‌ها اغلب از مقدار میانگین

(متوسط) و مقدار ریشه‌ی میانگین مربعی (rms) استفاده می‌کنند. برای سادگی معمولاً، مقدار ریشه‌ی میانگین مربعی را مقدار مؤثر نیز می‌نامند.

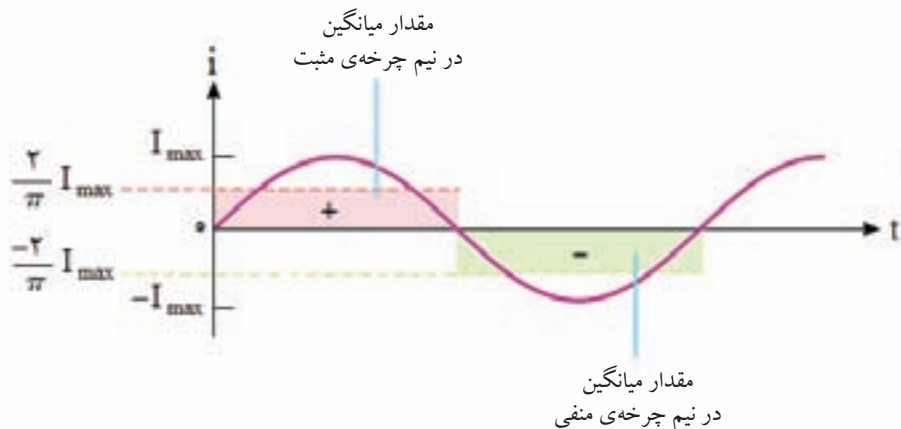
### مقدار میانگین (متوسط) موج سینوسی

چون مقدارهای ولتاژ یا جریان یک منبع ac سینوسی در هر نیم چرخه بین صفر تا یک مقدار بیشینه ( $V_{\max}$  یا  $I_{\max}$ ) تغییر می‌کنند، مقدار میانگین در هر نیم چرخه باید بین این دو مقدار باشد. می‌توان نشان داد مقدارهای میانگین ولتاژ یا جریان یک منبع ac سینوسی در هر نیم چرخه از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$V_{av} = \frac{2}{\pi} V_{\max} \approx 0.637 V_{\max} \quad (۸-۱۲)$$

$$I_{av} = \frac{2}{\pi} I_{\max} \approx 0.637 I_{\max} \quad (۹-۱۲)$$

در هر چرخه‌ی سینوسی که شامل دو نیمه چرخه‌ی متوالی است، مقدار میانگین کل ولتاژ و جریان صفر است. دلیل این موضوع روشن است زیرا علامت‌های جبری جریان و ولتاژ در هر دو نیم چرخه‌ی متوالی، برخلاف یکدیگر است (شکل ۱۲-۲۵).



شکل ۱۲-۲۵ مقدار میانگین جریان (یا ولتاژ) در هر نیم چرخه مخالف صفر است ولی مقدار کل میانگین در یک چرخه‌ی کامل (شامل دو نیم چرخه‌ی متوالی) صفر است.

### مقدار مؤثر (rms) موج سینوسی

وقتی دو سر یک ولت سنج جریان متناوب به پریز برق زده شود مقداری حدود ۲۲۰V را می‌خواند که یک ولتاژ rms است. دلیل این موضوع این است که آمپرسنج‌ها و ولت‌سنج‌های جریان متناوب طوری کالیبره می‌شوند که مقدار مؤثر جریان ( $I_{rms}$ ) یا

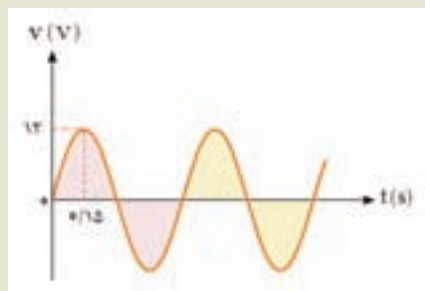
مقدار مؤثر ولتا (V<sub>rms</sub>) را نشان دهند<sup>۱</sup>. زیرا با داشتن جریان مؤثر یا ولتاژ مؤثر، می توان آهنگ میانگین اتلاف انرژی در مدارهای ac را درست مانند مدارهای dc محاسبه نمود. به عبارت دیگر همان طور که در مدارهای dc رابطه ی  $P = RI^2$  برقرار است، در مدارهای جریان متناوب نیز رابطه ی مشابهی به صورت  $P_{av} = RI_{rms}^2$  برقرار است.

به سادگی می توان نشان داد که مقادیر مؤثر جریان و ولتاژ یک منبع ac سینوسی از رابطه های زیر به دست می آیند:

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{max} \approx 0.707 I_{max} \quad (10-12)$$

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{max} \approx 0.707 V_{max} \quad (11-12)$$

### مثال ۸-۱۲



شکل ۲۶-۱۲

شکل ۱۲-۲۶ نمودار ولتاژ یک منبع ac سینوسی را نشان می دهد.  
الف) ولتاژ بیشینه، ولتاژ مؤثر و ولتاژ پیک تا پیک را تعیین کنید.  
ب) ولتاژ میانگین را در یک نیم چرخه به دست آورید.

**حل:**

الف) ولتاژ بیشینه برابر است با:

$$V_{max} = 12V$$

با توجه به رابطه ی ۱۲-۱۱، ولتاژ مؤثر برابر است با:

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{max} = \frac{1}{\sqrt{2}} (12V) \approx 8.48V$$

ولتاژ پیک تا پیک دو برابر ولتاژ بیشینه و برابر است با:

$$V_{pp} = 2V_{max} = 2 \times (12V) = 24V$$

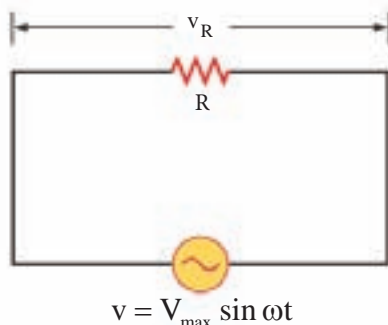
ب) با توجه به رابطه ی ۱۲-۸، ولتاژ میانگین در یک نیم چرخه برابر است با:

$$V_{av} = \frac{2}{\pi} V_{max} = \frac{2 \times 12V}{\pi} \approx 7.64V$$

۱- بسته به شرایط و نیاز می توان آمپرسنج ها و ولتسنج ها را به نحو دلخواه کالیبره کرد که بحث آن در این جا مورد نظر ما نیست.

معادله‌ی ولتاژ - زمان مربوط به نمودار شکل ۱۲-۲۶ را بنویسید.

### ۱۲-۷ مقاومت در یک مدار ac سینوسی



شکل ۱۲-۲۷ مداری ساده شامل مقاومت  $R$  و یک منبع ac سینوسی را نشان می‌دهد. با توجه به قانون ولتاژ کیرشهف (بخش ۶-۷ را ببینید) داریم:

$$v_R = v$$

یا

$$v_R = V_{\max} \sin \omega t \quad (12-12)$$

همچنین با توجه به تعریف مقاومت، رابطه‌ی ۴-۱، جریانی که در هر لحظه از مقاومت  $R$  می‌گذرد، برابر است با:

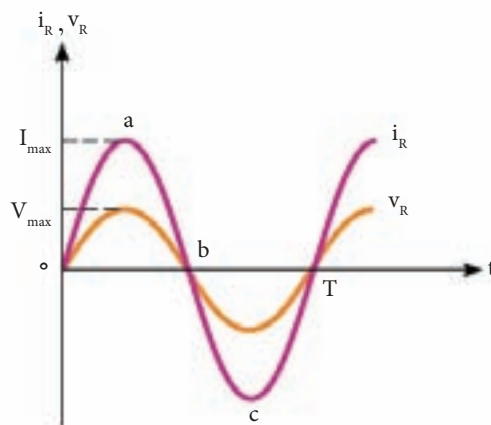
$$i_R = \frac{v_R}{R} = \frac{V_{\max}}{R} \sin \omega t$$

یا

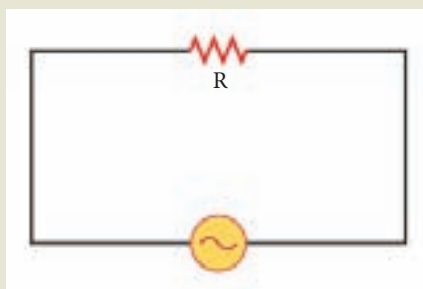
$$i_R = I_{\max} \sin \omega t \quad (12-13)$$

مقایسه‌ی رابطه‌های ۱۲-۱۲ و ۱۲-۱۳ نشان می‌دهد که جریان  $i_R$  و ولتاژ  $v_R$  هر دو با  $\sin \omega t$  متناسب‌اند، بنابراین جریان و ولتاژ در یک مدار ac سینوسی شامل مقاومت با یکدیگر هم فازند، که به معنی آن است که بیشینه‌ها یا کمینه‌های متناظر آن‌ها در یک زمان رخ می‌دهند.

شکل ۱۲-۲۸ که نمودارهای  $i_R$  و  $v_R$  است، این واقعیت را به صورت تابعی از زمان  $t$  نشان می‌دهد. مقیاس‌های عمودی برای جریان و ولتاژ متفاوت‌اند. از این رو ارتفاع نسبی دو منحنی اهمیتی ندارد.



شکل ۱۲-۲۸ جریان  $i_R$  و ولتاژ  $v_R$  دو سر مقاومت روی منحنی یکسانی، هر دو بر حسب زمان  $t$ ، رسم شده‌اند. آن‌ها هم فازند و یک چرخه را در دوره‌ی تناوب  $T$  می‌پیمایند. جریان و ولتاژ هر دو در نقطه‌ی  $a$  به بیشینه می‌رسند، در نقطه‌ی  $b$  صفر می‌شوند و در نقطه‌ی  $c$  به کم‌ترین مقدار خود می‌رسند.



شکل ۱۲-۲۹

در مدار شکل ۱۲-۲۹، مقاومت  $R$  برابر  $200\ \Omega$  است و منبع ac با ولتاژ بیشینه‌ی  $V_{\max} = 24\text{V}$  و بسامد  $f = 50\text{Hz}$  کار می‌کند.

الف) ولتاژ دوسر مقاومت بر حسب زمان  $t$  چیست؟

ب) معادله‌ی جریان - زمان را بنویسید و مقدار جریان را در لحظه‌ی  $t = \frac{1}{200}\text{s}$  پیدا کنید.

حل:

الف) در مداری شامل یک مقاومت  $R$ ، ولتاژ دو سر مقاومت همواره با ولتاژ دو سر منبع ac برابر است. با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$R = 200\ \Omega, V_{\max} = 24\text{V}, f = 50\text{Hz}$$

با توجه به داشتن بسامد منبع، بسامد زاویه‌ای برابر است با:

$$\omega = 2\pi f = 100\pi$$

با قراردادن این مقادیر در رابطه‌ی ۱۲-۱۲ داریم:

$$v_R = (24\text{V}) \sin 100\pi t$$

شناسه سینوسی را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$v_R = (24\text{V}) \sin(314t \text{ rad/s})$$

ب) شدت جریان بیشینه برابر است با:

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R} = \frac{24\text{V}}{200} = 0.12\text{A}$$

به این ترتیب از رابطه‌ی ۱۲-۱۳ داریم:

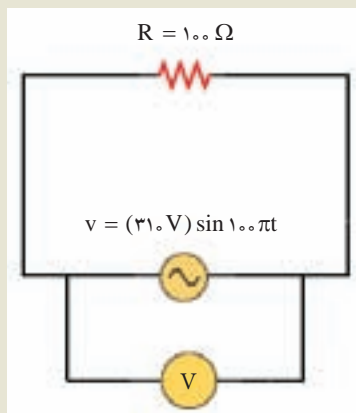
$$i_R = (0.12\text{A}) \sin 100\pi t$$

در لحظه  $t = \frac{1}{200}\text{s}$  داریم:

$$i_R = (0.12\text{A}) \sin\left(100\pi \times \frac{1}{200}\right) = (0.12\text{A}) \sin \frac{\pi}{2} = 0.12\text{A}$$

توجه کنید  $\sin \frac{\pi}{2} = 1$ .





شکل ۱۲-۳۰

در مدار شکل ۱۲-۳۰، ولت سنج برای خواندن ولتاژ مؤثر کالیبره شده است.

(الف) عددی که ولت سنج می‌خواند، چقدر است؟

(ب) معادله‌ی شدت جریان را بنویسید.

(پ) توان میانگین مصرفی در مقاومت چقدر است؟

(ت) در لحظه‌ای  $t = \frac{1}{100}$  s چه توانی در مقاومت مصرف می‌شود؟

**حل:**

(الف) چون ولت سنج برای خواندن ولتاژ مؤثر کالیبره شده است، داریم:

$$V_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (31.0 \text{ V}) \approx 22.0 \text{ V}$$

(ب) جریان پیشینه در مدار برابر است با:

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{max}}}{R} = \frac{31.0 \text{ V}}{100 \Omega} = 3/1 \text{ A}$$

به این ترتیب از رابطه‌ی ۱۲-۱۳ داریم:

$$i_R = (3/1 \text{ A}) \sin 100\pi t$$

(پ) همان‌طور که پیش از این گفته شد، توان میانگین مصرفی در مقاومت از رابطه‌ی  $P_{\text{av}} = RI_{\text{rms}}^2$  به دست می‌آید:

به این ترتیب داریم:

$$I_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (3/1 \text{ A}) \approx 2/2 \text{ A}$$

پس:

$$P_{\text{av}} = (100 \Omega)(2/2 \text{ A}) = 22.0 \text{ W}$$

(ت) در لحظه‌ای  $t = \frac{1}{100}$  s جریانی که از مقاومت می‌گذرد برابر است با:

$$i_R = (3/1 \text{ A}) \sin(100\pi \times \frac{1}{100}) = (3/1 \text{ A}) \sin \pi = 0.$$

توجه کنید  $\sin \pi = 0$  چون در این لحظه جریان از مقاومت نمی‌گذارد توان مصرفی آن نیز در این لحظه صفر است.

یک مقاومت  $1\text{k}\Omega$  مانند مدار شکل ۱۲-۲۵ به یک منبع ac سینوسی با ولتاژ بیشینه  $100\text{V}$  بسته شده است. اگر بسامد منبع ac برابر  $200\text{Hz}$  باشد، معادله‌های ولتاژ و جریان را بر حسب زمان پیدا کنید.

### ۱۲-۸ خازن در یک مدار ac سینوسی

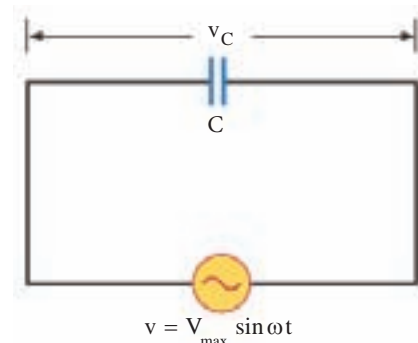
شکل ۱۲-۲۹ مداری را نشان می‌دهد که شامل خازنی با ظرفیت  $C$  یک مولد ac سینوسی است که به یکدیگر بسته شده‌اند. ولتاژ دو سر خازن در هر لحظه همان ولتاژی است که توسط منبع ac تولید می‌شود و برابر است با:

$$v_C = V_{\max} \sin \omega t \quad (12-14)$$

از آنجا که به دست آوردن معادله جریان - زمان در مدار شکل ۱۲-۲۹ نیازمند ریاضیاتی فراتر از سطح این کتاب است تنها بدون اثبات به ارائه این معادله که به صورت زیر است، می‌پردازیم:

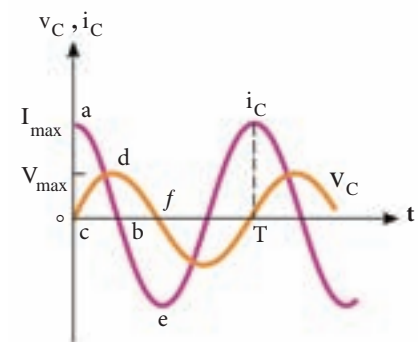
$$i_C = I_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (12-15)$$

که در آن  $I_{\max} = \omega C V_{\max}$ .



شکل ۱۲-۲۹ یک خازن که به دو سر یک منبع ac سینوسی بسته شده است.

**توجه:** ممکن است مخالفت کنید که بار در واقع نمی‌تواند از خازن بگذرد، زیرا دو صفحه آن از یکدیگر عایق‌اند. هر چند مخالفت شما درست است ولی باید توجه کنید که خازن، باردار (شارژ) و بی بار (دشارژ) می‌شود. در هر لحظه جریان  $i_C$  به یک صفحه وارد و جریان مساوی از صفحه‌ی دیگر خارج می‌شود، درست مثل این که بار از خازن هدایت شده است. بنابراین اغلب در مورد گذشتن جریان متناوب از خازن صحبت می‌کنیم.



شکل ۱۲-۲۹ جریان  $i_C$  در خازن به اندازه  $\frac{\pi}{2}$  یا ربع چرخه از ولتاژ  $V_C$  جلوتر است در لحظه‌هایی که جریان صفر می‌شود، یعنی  $t = \frac{T}{4}$  و  $t = \frac{3T}{4}$ ، خازن پیشینه شارژ می‌رسد و ولتاژ دو سر خازن دارای مقدار پیشینه است.

مقایسه رابطه‌های ۱۲-۱۴ و ۱۲-۱۵ نشان می‌دهد که ولتاژ و جریان در مدار شکل ۱۲-۲۹ با یکدیگر هم فاز نیستند و جریان به اندازه  $\frac{\pi}{2}$  ( $90^\circ$ ) یا ربع چرخه از ولتاژ جلوتر است (شکل ۱۲-۲۹). به عبارت دیگر،  $i_C$  یک ربع چرخه بیش از  $v_C$  به مقدار بیشینه یا کمینه‌ی خود می‌رسد.

## مقاومت خازنی

خازن‌ها در برابر عبور جریان متناوب از خود مقاومت نشان می‌دهند که آن را **مقاومت یا راکتانس خازنی** یک خازن می‌نامند و با نماد  $X_C$  نشان می‌دهند<sup>۱</sup> آزمایش نشان می‌دهند هرچه بسامد منبع ac بالاتر و ظرفیت خازن بیش تر باشد، مقاومت خازنی  $X_C$  کوچک تر است. به عبارت دیگر خازن‌ها تمایل دارند که جریان‌های با بسامد بالا را عبور دهند و مانع عبور جریان‌های کم بسامد و همچنین جریان‌های dc شوند.

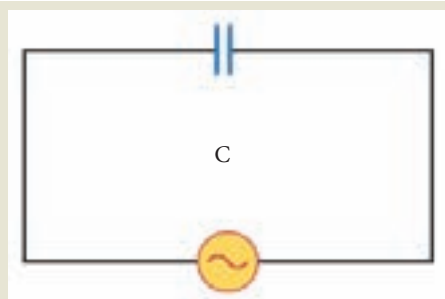
از مقایسه‌ی رابطه  $I_{\max} = \omega C V_{\max}$ ، که در به دست آوردن معادله ۱۲-۱۵ تعریف کردیم، و رابطه‌ی  $I_{\max} = V_{\max} / R$  در می‌یابیم که مقاومت خازنی  $X_C$  را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (12-16)$$

با توجه به این تعریف، بیشینه‌ی جریان در یک مدار (ac شامل خازن) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{X_C} \quad (12-17)$$

### مثال ۱۱-۱۲



شکل ۱۲-۳۰

در مدار شکل ۱۲-۳۰، ظرفیت C برابر  $20\mu F$  و منبع سینوسی ac با ولتاژ بیشینه کار می‌کند.

الف) مقاومت خازنی خازن را پیدا کنید.  
ب) بیشینه‌ی جریان در مدار چقدر است؟

**حل: الف)** با جای گذاری داده‌های مسئله در رابطه‌ی ۱۲-۱۶ داریم:

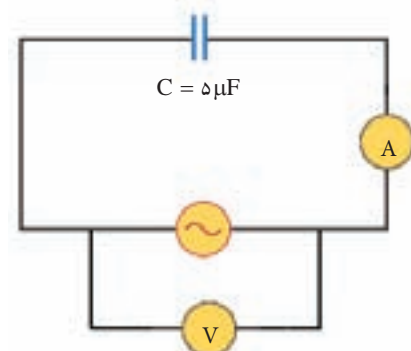
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi (100\text{ Hz})(20 \times 10^{-6}\text{ F})} = \frac{10^2}{4\pi} \approx 80\Omega$$

ب) برای به دست آوردن بیشینه‌ی جریان در مدار با توجه به رابطه‌ی ۱۲-۱۷ داریم:

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{X_C} = \frac{24\text{ V}}{80\Omega} = 0.3\text{ A}$$

۱- در برخی از کتاب‌های درسی از واژه‌ی فارسی واکنایی خازنی به جای راکتانس خازنی استفاده شده است.

در مدار شکل ۱۲-۳۱، ولت سنج و آمپر سنج برای خواندن مقادیر مؤثر کالیبره شده‌اند و به ترتیب مقدارهای  $100\text{ V}$  و  $5\text{ A}$  را می‌خوانند.  
الف) مقاومت خازنی خازن را به دست آورید.  
ب) منبع  $\text{ac}$  سینوسی با چه بسامدی کار می‌کند؟



شکل ۱۲-۳۱

### مقاومت خازنی معادل

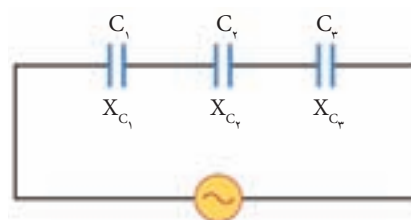
شکل ۱۲-۳۲ مداری شامل سه خازن را نشان می‌دهد که به طور متوالی به یک منبع  $\text{ac}$  سینوسی بسته شده‌اند. مشابه آن چه در بخش ۶-۴ دیدیم، مقاومت خازنی معادل در اتصال متوالی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X_{C_T} = X_{C_1} + X_{C_2} + X_{C_3} \quad (12-18)$$

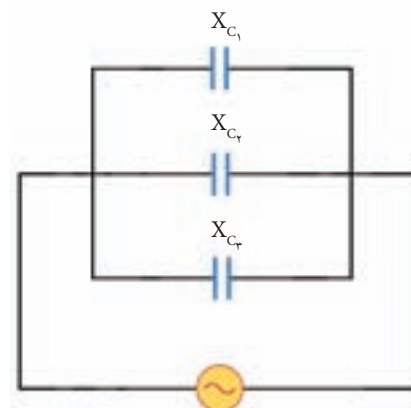
شکل ۱۲-۳۳ مداری شامل سه خازن را نشان می‌دهد که به طور موازی به یک منبع  $\text{ac}$  سینوسی بسته شده‌اند. در این جا نیز مشابه آن چه در بخش ۷-۲ دیدیم می‌توان نشان داد که مقاومت خازنی معادل در اتصال موازی از رابطه ی زیر به دست می‌آید.

$$\frac{1}{X_{C_T}} = \frac{1}{X_{C_1}} + \frac{1}{X_{C_2}} + \frac{1}{X_{C_3}} \quad (12-19)$$

**توجه:** در هر یک از اتصال‌های متوالی یا موازی، بسامد مقاومت خازنی معادل، برابر بسامد منبع  $\text{ac}$  است و مقاومت خازنی معادل از رابطه ی  $X_{C_T} = \frac{1}{2\pi f C_T}$  به دست می‌آید.



شکل ۱۲-۳۲ سه خازن که به طور متوالی به یک منبع  $\text{ac}$  سینوسی بسته شده‌اند. ولتاژ منبع در هر لحظه، برابر مجموع افت ولتاژهای دو سر هر یک از خازن‌هاست.



شکل ۱۲-۳۳ مداری شامل سه خازن که به طور موازی به یک منبع  $\text{ac}$  سینوسی بسته شده‌اند. ولتاژ دو سر هر یک از خازن‌ها در هر لحظه، درست برابر ولتاژ در همان لحظه است.

### ۱۲-۹ القاگر در یک مدار $\text{ac}$ سینوسی

شکل ۱۲-۳۴ مداری را نشان می‌دهد که شامل یک القاگر و یک منبع  $\text{ac}$  سینوسی است. با استفاده از قانون ولتاژ کیرشهف و همان روشی که به معادله (۱۲-۱۲) انجامید، در می‌یابیم که ولتاژ دو سر القاگر چنین است:

$$V_L = V_{\max} \sin \omega t \quad (12-20)$$

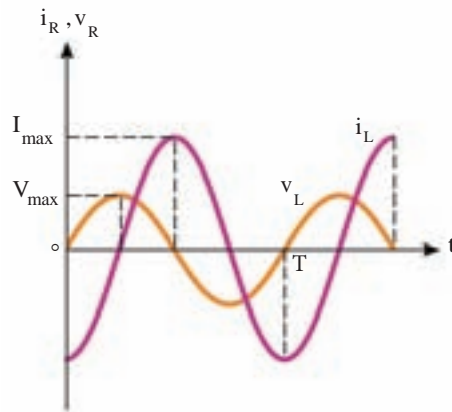
در این جا نیز ریاضیات مورد نیاز برای یافتن معادله جریان - زمان فراتر از سطح این کتاب است و صرفاً به ارائه‌ی این معادله بدون اثبات می پردازیم. به این ترتیب داریم:

$$i_L = I_{\max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (21-12)$$

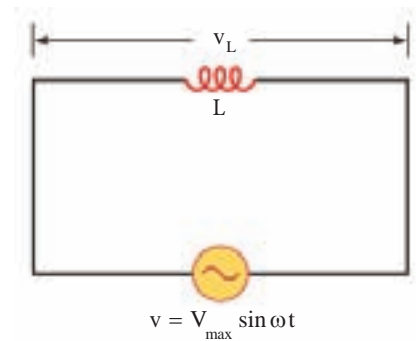
$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{\omega L}$$

که در آن

مقایسه‌ی دو رابطه‌ی ۲۰-۱۲ و ۲۱-۱۲ نشان می‌دهد که ولتاژ و جریان در مدار شکل ۱۲-۳۴ با یکدیگر هم فاز نیستند و جریان به اندازه  $\frac{\pi}{2}$  (یا ربع چرخه از ولتاژ عقب‌تر است) (شکل ۱۲-۳۵). به عبارت دیگر  $i_L$  یک ربع چرخه پس از  $V_L$  به مقدار بیشینه یا کمینه‌ی خود می‌رسد.



شکل ۱۲-۳۵ جریان در القاگر به اندازه  $90^\circ$  از ولتاژ عقب می‌افتد. همان‌طور که دیده می‌شود در لحظه‌ی  $t = \frac{T}{4}$  ولتاژ بیشینه است و ربع چرخه بعد و در لحظه‌ی  $t = \frac{T}{2}$  جریان بیشینه می‌شود.



شکل ۱۲-۳۴ یک القاگر به دو سر یک منبع ac سینوسی بسته شده است.

## مقاومت القایی

القاگرها نیز در برابر عبور جریان متناوب از خود مقاومتی نشان می‌دهند که آن را **مقاومت یا راکتانس القایی** یک القاگر می‌نامند و با نماد  $X_L$  نشان می‌دهند.<sup>۱</sup> مقاومت القایی در واقع توصیفی از نیروی محرکه‌ی خود القایی است که با هر تغییری در جریانی که از القاگر می‌گذرد مخالفت می‌کند. آزمایش نشان می‌دهد که القاگر در مقابل جریان‌های با بسامد پایین‌تر مقاومت القایی کم‌تری از خود نشان می‌دهند به طوری که هنگام عبور جریان‌های dc از القاگر، مقاومت القایی عملاً صفر می‌شود. در این بحث مقاومت اهمی القاگر را نادیده گرفته‌ایم.

از مقایسه رابطه‌ی  $I_{\max} = V_{\max} / \omega L$  که در به دست آوردن رابطه‌ی ۲۱-۱۲

۱- در برخی از کتاب‌های درسی از واژه‌های فارسی و انگلیسی القایی به جای راکتانس القایی استفاده شده است.

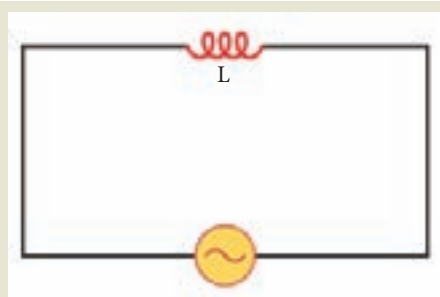
تعریف کردیم، و رابطه‌ی  $I_{\max} = V_{\max} / R$  در می‌یابیم که مقاومت القایی  $X_L$  را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (12-22)$$

با توجه به این تعریف بیشینه جریان در یک مدار ac شامل القاگر، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{X_L} \quad (12-23)$$

### مثال ۱۲-۱۲



شکل ۱۲-۳۶

در مدار شکل ۱۲-۳۶، ضریب خود القایی القاگر برابر  $20\text{ mH}$  و منبع ac سینوسی با ولتاژ بیشینه  $V_{\max} = 36\text{ V}$  و بسامد  $f = 50\text{ Hz}$  کار می‌کند.  
الف) مقاومت القایی القاگر را پیدا کنید.  
ب) بیشینه‌ی جریان در مدار چه قدر است؟

**حل:**

الف) با جای گذاری داده‌های مسئله در رابطه ۱۲-۲۲ داریم:

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi (50\text{ Hz})(20 \times 10^{-3}\text{ H}) = 6.28\ \Omega$$

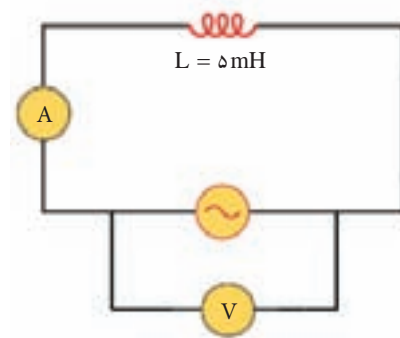
ب) با توجه به رابطه‌ی ۱۲-۲۳، بیشینه جریان در مدار برابر است با:

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{X_L} = \frac{36\text{ V}}{6.28\ \Omega} \approx 5.73\text{ A}$$

### تمرین ۱۲-۶

در مدار شکل ۱۲-۳۷، ولت‌سنج و آمپرسنج به ترتیب مقادارهای مؤثر  $60\text{ V}$  و  $3\text{ A}$  را می‌خوانند.

الف) مقاومت القایی القاگر را پیدا کنید.  
ب) منبع ac سینوسی با چه بسامدی کار می‌کند؟



شکل ۱۲-۳۷

## مقاومت القایی معادل

بیش تر القاگرهایی که در دسترس اند، ضریب خود القایی مشخصی دارند که ممکن است پاسخگوی نیاز ما برای قرار دادن در یک مدار الکتریکی نباشند. به همین جهت برای داشتن القاگرهای با ضریب خود القایی مناسب، اغلب مجبوریم که القاگر را به طور متوالی یا موازی ببندیم. ضریب خود القایی کلی یا معادل در چنین مواردی درست شبیه مقاومت معادل در مدارهای متوالی و موازی به دست می آید. لازم به ذکر است که هنگام محاسبه ضریب خود القایی معادل، اثر میدان های مغناطیسی القاگرها را روی یکدیگر نادیده می گیریم. شکل ۱۲-۳۷ مداری شامل سه القاگر را نشان می دهد که به طور متوالی به یک منبع سینوسی بسته شده اند. ضریب خود القایی معادل در این مدار از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 \quad (12-24)$$

برای به دست آوردن مقاومت القایی معادل در یک مدار متوالی کافی است طرفین معادله ۱۲-۲۴ را در بسامد زاویه ای منبع ac ضرب کنیم. در این صورت داریم:

$$\omega L_T = \omega L_1 + \omega L_2 + \omega L_3$$

یا:

$$X_{L_T} = X_{L_1} + X_{L_2} + X_{L_3} \quad (12-25)$$

همچنین شکل ۱۲-۳۸ مداری شامل سه القاگر را نشان می دهد که به طور موازی به یک منبع ac سینوسی بسته شده اند. در اتصال موازی القاگرهای ضریب خود القایی معادل از رابطه ی زیر به دست می آید:

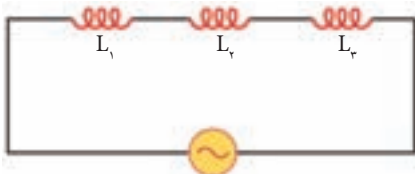
$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \quad (12-26)$$

در این جا نیز برای به دست آوردن مقاومت القایی معادل در یک مدار موازی می توان طرفین رابطه ی ۱۲-۲۶ را در وارون بسامد زاویه ای منبع ac یعنی  $\frac{1}{\omega}$ ، ضرب کنیم. در این صورت داریم:

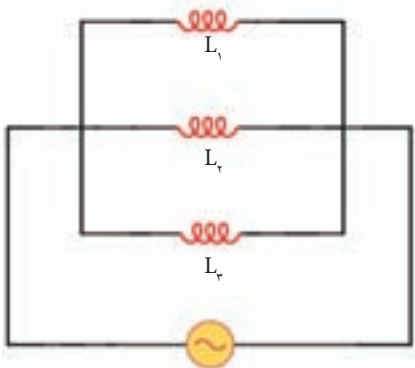
$$\frac{1}{\omega L_T} = \frac{1}{\omega L_1} + \frac{1}{\omega L_2} + \frac{1}{\omega L_3}$$

یا:

$$\frac{1}{X_{L_T}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}} \quad (12-27)$$



شکل ۱۲-۳۷ القاگرها به طور متوالی به منبع ac بسته شده اند.



شکل ۱۲-۳۸ القاگرها به طور موازی به منبع ac بسته شده اند.

- الف) در مداری ac شامل n القاگر مشابه که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند، ضریب خود القایی معادل از چه رابطه‌ای به دست می‌آید؟
- ب) در مداری ac شامل n القاگر مشابه که به طور موازی به یکدیگر بسته شده‌اند، ضریب خود القایی معادل از چه رابطه‌ای به دست می‌آید؟

## مثال ۱۲-۱۳

فرض کنید در مدار شکل ۱۲-۳۷ داشته باشیم:

$$L_1 = 2 \text{ mH}, L_2 = 10 \text{ mH}, L_3 = 8 \text{ mH}$$

- الف) ضریب خود القایی معادل را در این مدار پیدا کنید.
- ب) اگر منبع ac مدار با بسامد ۵۰ هرتز کار کند، مقاومت القایی معادل را به دست آورید.

**حل:**

الف) چون القاگرها به طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند با توجه به رابطه‌ی ۱۲-۲۴ داریم:

$$L_T = (2 \text{ mH}) + (10 \text{ mH}) + (8 \text{ mH}) = 20 \text{ mH}$$

ب) با توجه به نتیجه قسمت الف، مقاومت القایی معادل مدار برابر است با:

$$X_{L_T} = \omega L_T = 2\pi f L_T = (2\pi \times 50 \text{ Hz})(20 \times 10^{-3} \text{ H}) = 6.28 \Omega$$

در مدار شکل ۱۲-۳۸ فرض کنید:

$$L_1 = 3 \text{ mH}, L_2 = 18 \text{ mH}, L_3 = 6 \text{ mH}$$

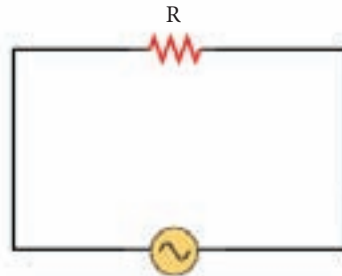
- الف) ضریب خود القایی معادل را در این مدار پیدا کنید.
- ب) اگر منبع ac مدار با بسامد ۱۰۰ Hz کار کند، مقاومت القایی معادل را به دست آورید.





## پرسش‌های مفهومی

- ۱- مهمترین تفاوت جریان متناوب و جریان مستقیم چیست؟
- ۲- شکل ۱۲-۳۹ یک مدار اهمی خالص را نشان می‌دهد. توضیح دهید آیا بین موج ولتاژ و موج جریان اختلاف فازی وجود دارد یا خیر؟



شکل ۱۲-۳۹

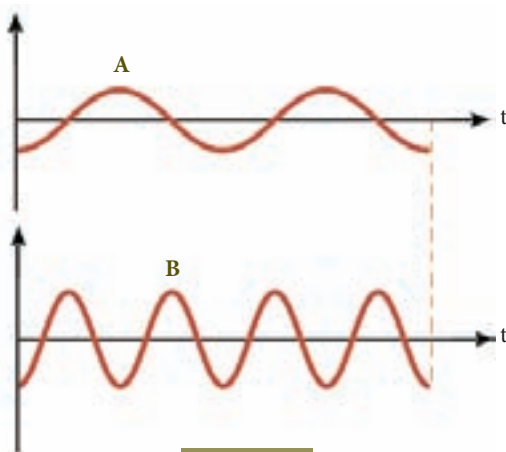
- ۳- شکل ۱۲-۴۰ دو موج سینوسی را نشان می‌دهد. اختلاف فاز، تاخیر یا تقدم فاز این دو موج را با هم مقایسه کنید. طول موج و دوره‌ی تناوب دو موج را نیز با هم مقایسه کنید.



شکل ۱۲-۴۰

- ۴- دو چرخه کامل یک موج ولتاژ دندانه اره‌ای و مربعی را که دارای مقدار پیک تا پیک ۲۰ ولت است، رسم کنید.
- ۵- دو موج سینوسی به گونه‌ای رسم کنید که تمام ویژگی‌های آن‌ها یکسان باشد ولی یکی از موج‌ها نسبت به موج دیگر  $\frac{\pi}{4}$  رادیان (۴۵ درجه) تقدم فاز داشته باشد.
- ۶- زاویه‌های فاز  $\frac{\pi}{6}$ ،  $\frac{\pi}{3}$  و  $\frac{2\pi}{3}$  رادیان را بر حسب درجه بنویسید.

۷- نسبت طول موج، دوره‌ی تناوب و بسامد دو موج A و B شکل ۱۲-۴۱ را به ترتیب به دست آورید.



شکل ۱۲-۴۱

۸- در هر یک از مدارهای زیر اختلاف فاز بین موج‌های ولتاژ و شدت جریان چه قدر است؟

الف) مداری شامل مقاومت  $R$  و یک منبع  $ac$  سینوسی.

ب) مداری شامل خازن  $C$  و یک منبع  $ac$  سینوسی.

ج) مداری شامل القاگر  $L$  و یک منبع  $ac$  سینوسی.

۹- رفتار خازن در یک مدار  $ac$  سینوسی در هر یک از حالت‌های زیر چگونه است؟  
الف) بسامد منبع  $ac$  افزایش یابد.

ب) بسامد منبع  $ac$  کاهش یابد.

پ) با ثابت ماندن بسامد، ظرفیت‌های خازن افزایش یابد.

۱۰- در یک مدار  $ac$  سینوسی شامل القاگر، با افزایش بسامد منبع، مقاومت القایی القاگر چه تغییری می‌کند؟

### مسئله‌ها

۱- دوره‌ی تناوب، بسامد و بسامد زاویه‌ای موج شکل ۱۲-۴۲ را پیدا کنید.



شکل ۱۲-۴۲

۲- شکل ۱۲-۴۳ موجی سینوسی را نشان می‌دهد که با سرعت  $10 \text{ m/s}$  منتشر می‌شود. طول موج و بسامد زاویه‌ای این موج چه قدر است؟



شکل ۱۲-۴۳

۳- ولتاژ پیک تا پیک موج ولتاژ شکل ۱۲-۴۴ برابر  $80 \text{ mV}$  است، مطلوب است محاسبه‌ی:

الف) دوره‌ی تناوب و بسامد زاویه‌ای موج.

ب) مقدار  $V_{\text{rms}}$ .



شکل ۱۲-۴۴

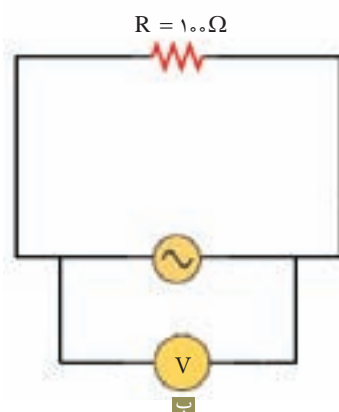
۴- در هریک از حالت‌های زیر بسامد موج جریان متناوب چه قدر است؟

الف) یک چرخه در  $1 \text{ ms}$ .

ب) ۲۰ چرخه در ۲ ثانیه.

پ) ۵۰ چرخه در ۱ ثانیه.

۵- شکل ۱۲-۴۵ الف نمودار ولتاژ سینوسی یک مولد جریان متناوب را نشان می‌دهد. این مولد به همراه یک مقاومت  $R$ ، یک مدار اهمی خالص را تشکیل داده‌اند (شکل ۱۲-۴۵ ب).



الف

شکل ۱۲-۴۵

الف) معادله‌ی ولتاژ بر حسب زمان را بنویسید.

ب) معادله‌ی جریان بر حسب زمان را بنویسید.

پ) اگر ولت‌سنج برای نشان دادن مقدار مؤثر ولتاژ کالیبره شده باشد، چه عددی را می‌خواند.

۶- در نمودار ولتاژ متناوب شکل ۱۰-۴۲ الف، ولتاژ میانگین را در یک نیم چرخه پیدا کنید.

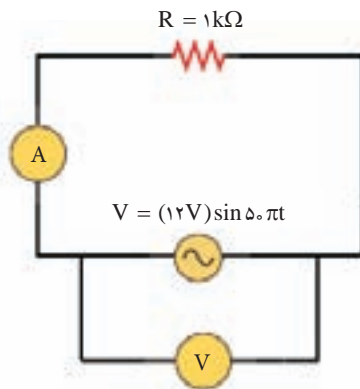
۷- در مدار شکل ۱۲-۴۶ ولت‌سنج و آمپرسنج برای خواندن مقدارهای مؤثر کالیبر شده‌اند.

الف) ولت‌سنج و آمپرسنج به ترتیب چه عددی را می‌خوانند؟

ب) توان میانگین مصرفی در مقاومت چه قدر است؟

پ) معادله‌ی شدت جریان را پیدا کنید و آن را برای یک چرخه کامل رسم کنید.

ت) در لحظه‌ی  $t = 1.0 \text{ ms}$  توان مصرف شده در مقاومت چه قدر است؟

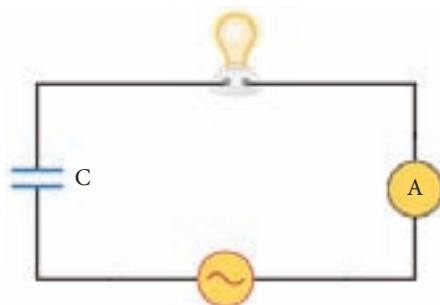


شکل ۱۲-۴۶

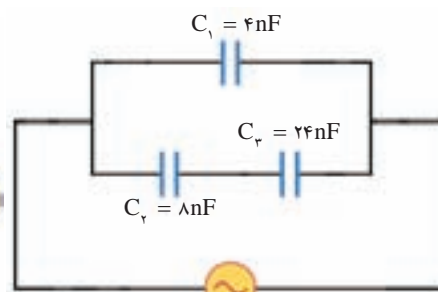
۸- پیچه‌ای درون میدان مغناطیسی یکنواختی می‌چرخد. به ازای چه زاویه‌ای (بین خط‌های میدان  $\vec{B}$  و خط عمودی بر سطح پیچه) مقدار ولتاژ لحظه‌ای  $\frac{1}{7}$  برابر مقدار ولتاژ بیشینه است؟

۹- در مدار شکل ۱۲-۴۷ مقاومت خازنی معادل چه قدر است؟ فرض کنید منبع ac سینوسی با بسامد  $20 \text{ Hz}$  کار می‌کند.

۱۰- در مدار شکل ۱۲-۴۸ اگر ظرفیت خازن افزایش یابد، نور لامپ چه تغییری می‌کند؟ فرض کنید منبع ac سینوسی با بسامد ثابت  $50$  هرتز کار می‌کند.



شکل ۴۸-۱۲



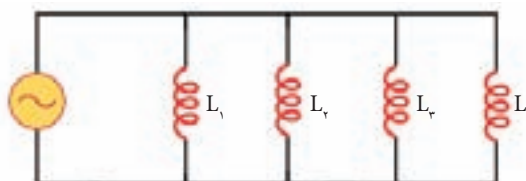
شکل ۴۷-۱۲

۱۱- در مدار شکل ۴۹-۱۲ ضرایب القایی هر یک از القاگرها عبارت‌اند از:

$$L_1 = 100 \text{ mH}, L_2 = 50 \text{ mH}, L_3 = L_4 = 25 \text{ mH}$$

الف) ضریب خود القایی معادل را پیدا کنید.

ب) اگر منبع ac سینوسی با بسامد  $50 \text{ Hz}$  کار کند، مقاومت القایی معادل چه قدر است؟



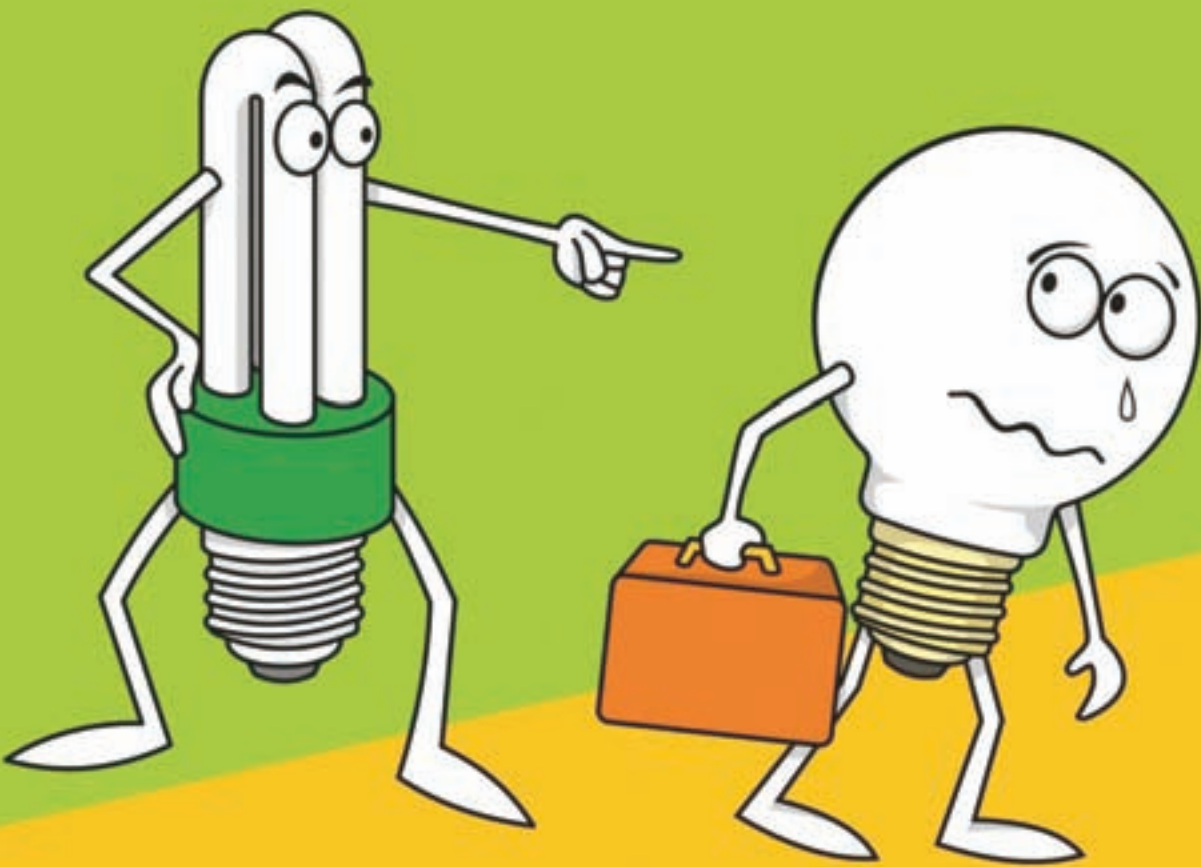
شکل ۴۹-۱۲

## يعقوب كندی



ابو یوسف یعقوب کندی (وفات ۲۶۵ق) از قبیله ی کند در بصره که جدّ اعلایش از اصحاب پیامبر اسلام بوده و در مغرب زمین پُر آوازه تر از سرزمین های مسلمان است. در فرهنگ غرب با نام آلکیندوس (Alkindus) شناخته می شود. یعقوب بر همه ی علوم روزگار خود از یونانی، ایرانی، و هندی آگاهی داشت. پُرشماری و گوناگونی نوشته هایش دلیل بی چون و چرائی بر این ادعاست. از جمله ۳۸ اثر ریاضی، ۲۱ کتاب در اخترشناسی، یک کتاب در فیزیک نجومی، ۴ نگاشته در زمینه ی جغرافیا، ۳ کتاب در شیمی و داروسازی، ۷ کتاب در موسیقی علمی، و سرانجام ۱۷ اثر ارزنده در فیزیک شامل: چهار کتاب در فیزیک نور که دست مایه دانشمندان پس از وی به ویژه ابن هیثم قرار گرفته است با نام های «اصلاح المناظر» کتابی فراگیر در دانش نور، «الشّعاعات الشّمسیه» درباره ی پرتوهای خورشید و تابش آن ها از خورشید به زمین و بازتاب آن ها از زمین، «علل الاختلاف فی مشاهدات» در شناخت نور هندسی، «رساله فی علل اللون الارزق الذی یرا فی الجوّ فی جهه السّماء» درباره ی دلیل آبی بودن رنگ آسمان، دو کتاب درباره ی عناصر با نام های «رساله فی علل التّی لها قیل أنّ التّار و الهواء و اماء و الارض عناصر لجميع کائنه الفاسد و حصّه بذالک دون غیرها من الکائنه» درباره ی دلیل چهار عنصری بودن جهان هستی یعنی آتش، آب، هوا و خاک، و «رساله فی الابانه أنّ طبیعه الفلک مخالفه لطابعه العناصر الاربعه و أنّها طبیعه خامسه» در بردارنده ی دلایل بر این که چهار عنصر یاد شده هستی را می سازند و تعمیم آن در موجودات، یک کتاب درباره ی جزر و مدّ با نام «رساله فی علل الفاعله لالمدّ و الجزر»، دو کتاب در زمینه ی هواشناسی، برف و باران و آذرخش (رعد و برق) با نام های «رساله فی علل الثلج و البرد و البرق و الصواعق و الرّعد و الزّمهریر» و کتاب دیگری که هیچ گونه نسخه ای از آن در دست نیست و تنها در متون لاتین از آن یاد شده است. کتاب دیگری درباره ی درخشش ستارگان، نوشته ای درباره ی افروختن آتش با آئینه با نام «رساله فی المراثا المحرّقه»، چهار کتاب درباره ی نور و روشنایی در ستارگان و یک اثر در زمینه ی آب دریاها، و سرانجام «رساله فی الاوزان» درباره ی اوزان و مقادیر... و نگاشته های کندی در موسیقی که بر آمده از استادی وی در مبانی علمی و فیزیکی موسیقی است را نیز بایستی در گروه کتاب های فیزیک این بزرگ ترین فیلسوف عرب به شمار آورد. یعقوب کندی در دانش پزشکی نیز سرآمد روزگار خود بود به گونه ای که نخستین پزشکی بوده که از موسیقی در درمان بیمارانش بهره می گرفته است.

# پیوست ها



## پیوست الف

مروری کوتاه در ریاضیات

### نشانه‌ها و نمادهای ریاضی

$a = b$  یعنی  $a$  مساوی  $b$  است.

$a \neq b$  یعنی  $a$  مساوی  $b$  نیست.

$a > b$  یعنی  $a$  بزرگ‌تر از  $b$  است.

$a < b$  یعنی  $a$  کوچک‌تر از  $b$  است.

$a \geq b$  یعنی  $a$  کوچک‌تر از  $b$  نیست.

$a \leq b$  یعنی  $a$  بزرگ‌تر از  $b$  نیست.

$a \propto b$  یعنی  $a$  متناسب با  $b$  است.

$a \approx b$  یعنی  $a$  تقریباً مساوی  $b$  است.

$a \gg b$  یعنی  $a$  بسیار بزرگ‌تر از  $b$  است.

$a \ll b$  یعنی  $a$  بسیار کوچک‌تر از  $b$  است.

### توان‌ها و ریشه‌ها

برای هر عدد  $a$ ، توان  $n$  آن عدد عبارت است از  $n$  بار ضرب آن عدد در خودش، و به صورت  $a^n$  نوشته می‌شود.  $n$  را نما می‌نامند. از این قرار،

$$a^1 = a, a^2 = a.a, a^3 = a.a.a, a^4 = a.a.a.a, \dots$$

برای مثال،

$$3^2 = 3 \times 3 = 9, 3^3 = 3 \times 3 \times 3 = 27, 3^4 = 3 \times 3 \times 3 \times 3, \dots$$

یک نمای منفی دال بر این است که یک  $n$  بار بر عدد تقسیم کنند؛ بنابراین:

$$a^{-1} = \frac{1}{a}, a^{-2} = \frac{1}{a^2}, a^{-3} = \frac{1}{a^3}, \dots$$

نمای صفر، بی توجه به مقدار  $a$  حاصلش ۱ است،

$$a^0 = 1$$

قاعده‌های ترکیب نماها در حاصل ضرب‌ها، کسرها، و در توان‌های توان‌ها عبارت‌اند از:

$$a^n \cdot a^m = a^{n+m}$$

$$\frac{a^n}{a^m} = a^{n-m}$$

$$(a^n)^m = a^{n \cdot m}$$

برای مثال، به سهولت می‌توان ثابت کرد که:



$$3^2 \times 3^3 = 3^5$$

$$\frac{3^2}{3^3} = 3^{-1} = \frac{1}{3}$$

$$(3^2)^3 = 3^{2 \times 3} = 3^6$$

توجه کنید که برای هر دو عدد  $a$  و  $b$

$$(a.b)^n = a^n . b^n$$

برای مثال،

$$(2 \times 3)^3 = 2^3 \times 3^3$$

ریشه‌ی  $n$ ام  $a$  عددی است که توان  $n$ ام آن مساوی  $a$  است. ریشه  $n$ ام عدد  $a$  به صورت  $a^{1/n}$  نوشته می‌شود. ریشه دوم عدد  $a$  یعنی  $a^{1/2}$  را معمولاً جذر آن می‌نامند و به صورت  $\sqrt{a}$  نمایش می‌دهند.

$$a^{1/2} = \sqrt{a}$$

چنانکه نمادگذاری  $a^{1/n}$  هم نشان می‌دهد، ریشه‌ها عبارت‌اند از توان‌های کسری. و از قاعده‌های معمول در ترکیب نماها پیروی می‌کند:

$$(a^{1/n})^n = a^{n/n} = a$$

$$(a^{1/n})^m = a^{m/n}$$

### حساب کردن با نمادگذاری علمی

نمادگذاری علمی برای عددها در ضرب و تقسیم عددها بسیار بزرگ یا بسیار کوچک، کاملاً مفید است به خاطر این که می‌توانیم به بخش‌های اعشاری و صحیح اعداد به طور جداگانه پردازیم. برای مثال، در ضرب  $4 \times 10^{10}$  به  $5 \times 10^{12}$ ، به صورت زیر، ۴ را در ۵ و  $10^{10}$  را در  $10^{12}$  ضرب می‌کنیم:

$$\begin{aligned} (4 \times 10^{10}) \times (5 \times 10^{12}) &= (4 \times 5) \times (10^{10} \times 10^{12}) \\ &= 2 \times 10^{10+12} = 2 \times 10^{22} = 2 \times 10^{23} \end{aligned}$$

در تقسیم این اعداد نیز به همین شیوه عمل می‌کنیم:

$$\frac{4 \times 10^{10}}{5 \times 10^{12}} = \frac{4}{5} \times \frac{10^{10}}{10^{12}} = \frac{4}{5} \times 10^{10-12} = \frac{4}{5} \times 10^{-2} = \frac{4}{5} \times 10^{-3}$$

در جمع یا تفریق عددها در نمادگذاری علمی، باید مراقب باشیم که عددها را با توان‌های یکسان ده بیان کنیم. برای مثال، مجموع  $3 \times 10^8$  و  $1/5 \times 10^9$  عبارت است از

$$1/5 \times 10^9 + 3 \times 10^8 = 1/5 \times 10^9 + 3/10 \times 10^9 = 1/10 \times 10^9$$

## جبر

یک معادله، عبارت است از یک گزاره ریاضی که به ما می گوید یک کمیت یا ترکیبی از کمیت ها با کمیت یا ترکیبی از کمیت های دیگر مساوی است. بیشتر اوقات باید یکی از کمیت های معادله را برحسب کمیت های دیگر معادله به دست بیاوریم. برای مثال می توانیم با حل معادله:

$$x + a = b$$

جواب  $x$  را برحسب  $a$  و  $b$  به دست بیاوریم. در اینجا  $a$  و  $b$  مقدارهای عددی ثابت، یا عبارات ریاضی هستند که معلوم تلقی می شوند، و  $x$  به منزله ی مجهول معادله است. قاعده های جبری به ما می آموزند که چگونه با تغییر و تبدیل در معادله ها به راه حل و جواب آن ها برسیم. مهم ترین قاعده های، سه قاعده اند به شرح زیر:

۱- هرگاه جمله های یکسان به دو طرف یک معادله بیفزاییم یا از دو طرف آن کم کنیم، اعتبار معادله برقرار می ماند و تغییری در آن حاصل نمی شود.

این قاعده در حل معادله  $x + a = b$  سودمند است. از دو طرف معادله  $a$  را کسر می کنیم و داریم:

$$x + a - a = b - a$$

یعنی:

$$x = b - a$$

برای این که بینیم این قاعده در یک مثال عددی مشخص چگونه عمل می کند معادله ی

$$x + 7 = 5$$

را در نظر می گیریم. با کسر کردن ۷ از دو طرف معادله، داریم

$$x = 5 - 7$$

یا

$$x = -2$$

توجه داشته باشید که در یک معادله به شکل  $x + a = b$ ، ممکن است بخواهیم  $a$  را برحسب  $x$  و  $b$  پیدا کنیم، البته این در صورتی است که  $x$  قبلاً از روی اطلاعات دیگر معلوم بوده باشد اما  $a$  یک کمیت ریاضی باشد که هنوز معین نیست. اگر چنین باشد، باید  $x$  را از دو طرف معادله کسر کنیم، و خواهیم داشت:

$$a = b - x$$

بیش تر معادله های فیزیکی شامل چندین کمیت ریاضی هستند که بسته به شرایط گاهی اوقات نقش کمیت های معلوم را بازی می کنند، و گاهی هم نقش کمیت های مجهول را. در نتیجه، بسته به همین برای یافتن کمیت (همچون  $x$ ) مورد بررسی قرار دهیم.

۲- هرگاه دو طرف یک معادله را به یک و همان عامل ضرب کنیم، اعتبار معادله محفوظ می‌ماند و تغییری در آن حاصل نمی‌شود.

این قاعده، در حل معادله‌ای چون:

$$ax = b$$

سودمند است. به طور ساده، دو طرف را به  $a$  تقسیم می‌کنیم، و داریم:

$$\frac{ax}{a} = \frac{b}{a}$$

$$x = \frac{b}{a}$$

غالباً این ضرورت پیش می‌آید که هر دو قاعده‌ی بالا را با هم ترکیب کنیم، برای مثال، در حل معادله‌ی:

$$2x + 10 = 16$$

با تفریق ۱۰ از دو طرف شروع می‌کنیم و داریم:

$$2x + 10 = 16$$

یا

$$2x = 6$$

و سپس طرفین را به ۲ تقسیم می‌کنیم و به دست می‌آوریم:

$$x = \frac{6}{2}$$

یا

$$x = 3$$

۳- هرگاه دو طرف یک معادله را به توان یکسان برسانیم اعتبار معادله محفوظ می‌ماند و تغییری در آن حاصل نمی‌شود.  
این قاعده، حل معادله‌ی:

$$x^r = b$$

را ممکن می‌سازد. هر دو طرف را به توان  $1/r$  می‌رسانیم، و داریم:

$$(x^r)^{1/r} = b^{1/r}$$

یا

$$x = b^{1/r}$$

رابطه‌ی معادله‌ی درجه‌ی دوم:

$$ax^2 + bx + c = 0 \Rightarrow x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

قضیه‌ی فیثاغورس

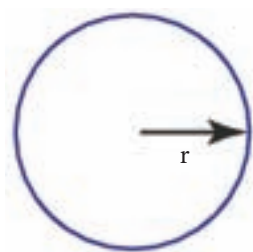
$$a^2 + b^2 = c^2$$

## محیط، مساحت و حجم

دایره‌ای به شعاع  $r$

$$\text{محیط} = 2\pi r$$

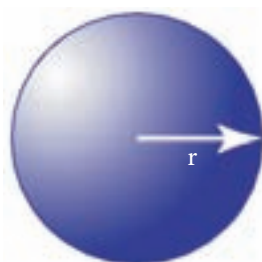
$$\text{مساحت} = \pi r^2$$



کره‌ای به شعاع  $r$

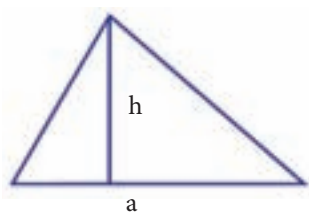
$$\text{مساحت} = 4\pi r^2$$

$$\text{حجم} = \frac{4}{3}\pi r^3$$



مثلثی با قاعده‌ی  $a$  و ارتفاع  $h$ :

$$\text{مساحت} = \frac{1}{2} a h$$



استوانه‌ای به شعاع  $r$  و ارتفاع  $h$

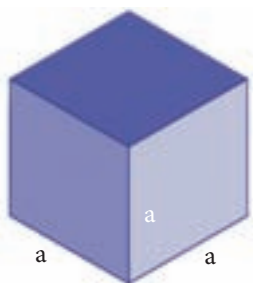
$$\text{مساحت} = \pi r^2 + 2\pi r h$$

$$\text{حجم} = \pi r^2 h$$



مکعبی به ضلع  $a$

$$\text{حجم} = a^3$$



## دستگاه بین‌المللی یکاها

برای انجام اندازه‌گیری‌های درست و قابل اطمینان به یکاهای اندازه‌گیری‌ای نیاز داریم که تغییر نکنند و دارای قابلیت باز تولید در مکان‌های مختلف باشند.

دستگاه یکاهایی که دانشمندان علوم و مهندسان در سراسر جهان به کار می‌برند را به طور متداول **دستگاه متریک** می‌نامند، ولی این دستگاه از سال ۱۳۳۹ به طور رسمی با نام **دستگاه بین‌المللی** یا SI خوانده شده است.

در سال ۱۳۵۰ (ه‌ش) مجمع عمومی وزن‌ها و مقیاس‌ها هفت کمیت را به عنوان کمیت‌های اصلی انتخاب کرد که اساس دستگاه بین‌المللی یکاها را تشکیل دهند. جدول زیر یکاهای سه کمیت اصلی زمان، طول و جرم را نشان می‌دهد که در ادامه بررسی خواهیم.

سه کمیت اصلی SI و یکاهای آن‌ها		
کمیت	نام یکا	نماد یکا
زمان	ثانیه	s
طول	متر	m
جرم	کیلوگرم	kg

تعریف یکاهای اساسی دستگاه متریک در طول سال‌ها تحول یافته است. هنگامی که دستگاه متریک در سال ۱۷۹۱ میلادی توسط آکادمی علوم فرانسه تثبیت شد، متر برابر با یک ده میلیونیم فاصله‌ی بین قطب شمال تا استوا تعریف شده بود. همچنین ثانیه برابر با زمان لازم برای حرکت آونگی به طول یک متر از یک طرف به طرف دیگر تعریف شده بود. با این تعریف‌ها باز تولید دقیق یکاها، پر دردسر و سخت بود و با توافق بین‌المللی، تعریف‌های مناسب‌تری جای آن‌ها را گرفتند.

## پیوست پ

### ۳-۱ پیشوندها و تبدیل یکاها

اینک که در پیوست ب با برخی از یکاهای اصلی در SI آشنا شدیم به سادگی می‌توانیم یکاهای بزرگ‌تر و کوچک‌تر را برای همان کمیت‌های فیزیکی معرفی کنیم. در SI این یکاهای دیگر با مضرب‌های  $10^1$  یا  $10^{-1}$  به یکاهای اصلی مربوط می‌شوند. به این ترتیب یک کیلومتر ( $1\text{ km}$ ) برابر  $1000$  متر و یک سانتی‌متر ( $1\text{ cm}$ ) برابر  $\frac{1}{100}$  متر است. معمولاً مضرب‌های  $10^1$  یا  $\frac{1}{10}$  را به صورت نمایی بیان می‌کنیم.

برای مثال:

$$\frac{1}{1000} = 10^{-3} \text{ و } 1000 = 10^3$$

با این نمادگذاری  $1\text{ km} = 10^3\text{ m}$  و  $1\text{ cm} = 10^{-2}\text{ m}$ .

اسم یکاهای اضافی با افزودن یک پیشوند به اسم یکای اصلی به دست می‌آید. برای مثال پیشوند «کیلو» با کوتاه نوشت  $k$  همواره یکایی  $1000$  برابر بزرگ‌تر را نشان

می‌دهد. بنابراین:

$$1\text{ km} = 10^3\text{ متر} = 10^3\text{ m}$$

$$1\text{ kg} = 10^3\text{ گرم} = 10^3\text{ g}$$

$$1\text{ kW} = 10^3\text{ وات} = 10^3\text{ W}$$

برای راحتی کار، وقتی با اندازه‌های بسیار بزرگ یا بسیار کوچک سر و کار داریم، از پیشوندهایی که در جدول زیر آمده است استفاده می‌کنیم. همان‌طور که می‌بینید، هر پیشوند نشانه‌ای توان مشخصی از  $10$  است که به عنوان ضریب به کار برده می‌شود. استفاده از هر پیشوند برای یکای SI به منزله‌ی ضرب کردن آن یکا در ضریب مربوط به آن پیشوند است.

#### پیشوندهای یکاهای SI

ضریب	پیشوند	نماد	ضریب	پیشوند	نماد
$10^{24}$	یوتا	Y	$10^{-1}$	دسی	d
$10^{21}$	زتا	Z	$10^{-2}$	سانتی	c
$10^{18}$	اِگزا	E	$10^{-3}$	میلی	m
$10^{15}$	پتا	P	$10^{-6}$	میکرو	$\mu$
$10^{12}$	ترا	T	$10^{-9}$	نانو	n
$10^9$	گیگا (جیگا)	G	$10^{-12}$	پیکو	p
$10^6$	مگا	M	$10^{-15}$	فمتو	f
$10^3$	کیلو	k	$10^{-18}$	آتو	a
$10^2$	هکتو	h	$10^{-21}$	زپتو	z
$10^1$	دکا	da	$10^{-24}$	یوکتو	y

پیشوندهایی که کاربرد بیش تری دارند و بهتر است آن‌ها را بخاطر بسپارید با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

**توجه:** معمولاً در رایانه‌ها و بعضی از ماشین حساب‌ها به جای استفاده از پیشوندهای یکاهای SI، نماد گذاری علمی را مختصرتر نشان می‌دهند. مثلاً می‌نویسند  $8.2E5$  و  $4.31E-11$  که در آن‌ها E نشان دهنده‌ی «توان ده» است و برحسب پیشوندهای یکاهای SI به صورت  $8/2 \times 10^5$  و  $4/31 \times 10^{-11}$  نوشته می‌شوند.

## علامت‌های اختصاری استاندارد

نماد	نام یکا	کمیت	نماد	نام یکا	کمیت
s	ثانیه	دوره‌ی تناوب	A	آمپر	جریان
Wb	وبر	شار مغناطیسی	H	هانری	القابیدگی
T	تسلا	میدان مغناطیسی	V	ولت	ولتاژ
N/C	نیوتون بر کولن	شدت میدان الکتریکی	W	وات	توان
N	نیوتون	نیرو	$\Omega$	اهم	مقاومت
C	کولن	مقدار بار الکتریکی	Hz	هرتز	بسامد
J	ژول	انرژی	V	ولت	نیروی محرکه الکتریکی
m	متر	طول	F	فاراد	ظرفیت
s	ثانیه	زمان	rad/s	رادیان بر ثانیه	بسامد زاویه‌ای



## چیز هایی که لازم است بدانید

### armature

### آرمیچر

بخشی از موتور یا مولد (ژنراتور) الکتریکی که نیروی محرکه‌ی الکتریکی در آن تولید می‌شود.

### super conductor

### ابررسانا

ماده‌ای که در دمای خاصی مقاومت آن در برابر عبور جریان الکتریکی صفر می‌شود.

### circuit breaker

### مدار قطع‌کن

وسیله‌ای در مدار الکتریکی که هنگام افزایش جریان تا حد به وجود آمدن خطر آتش‌سوزی مدار را قطع می‌کند.

### Len's law

### قانون لنز

قانونی برای تعیین جهت جریان القایی در یک مدار.

### maguetic flux

### شار مغناطیسی

کمیتی که نشان‌دهنده‌ی میزان عبور خط‌های میدان مغناطیسی از یک سطح است. اگر میدان مغناطیسی بر سطح عمود باشد، شار عبوری از آن بیشینه است.

### inductor

### القاگر

از یک القاگر می‌توان برای تولید یک میدان مغناطیسی دلخواه استفاده کرد.

### self inducion

### خودالقایی

یک emf القایی در هر پیچ‌های که جریان تغییر کند، ظاهر می‌شود.

### capacitive fime constant

### ثبت زمانی خازنی

از رابطه‌ی  $\tau = RC$  به دست می‌آید.

## inductive time constant

## ثابت زمانی القایی

از رابطه‌ی  $\tau = R / L$  به دست می‌آید.

## mutual inductance

## القای متقابل

اگر دو پیچه نزدیک یکدیگر باشند، یک جریان متغیر در هر پیچه می‌تواند یک emf در پیچه‌ی دیگر القا کند. این اثر القای متقابل خوانده می‌شود.

## diamagnetism

## دیامغناطیس

پدیده‌ای که در همه‌ی مواد هنگام حضور در میدان مغناطیسی ظاهر می‌شود. مواد دیامغناطیس تا وقتی که در میدان مغناطیسی خارجی قرار نگرفته باشند، خاصیت مغناطیسی از خود بروز نمی‌دهند.

## paramagnetism

## پارا مغناطیس

موادی که اتم‌های آن دارای دو قطبی‌های مغناطیسی دائم است ولی به طور کاتوره‌ای و تصادفی نسبت به یکدیگر واقع‌اند.

## ferromagnetism

## فرومغناطیس

موادی که می‌توانند با توجه به حوزه‌های مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی دائم یا غیر دائم از خود بروز دهند.

## ampere

## آمپر (A)

یکای SI برای جریان الکتریکی. یک آمپر جریان یک کولن بار در یک ثانیه -  $1.6 \times 10^{-19}$  الکترون (یا پروتون) در ثانیه - است.

## ammeter

## آمپر سنج

وسیله‌ای برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی. گالوانومتر را ببینید.

## magnet

## آهنربا

هر جسمی که خواص مغناطیسی، یعنی توانایی جذب اجسام آهنی یا مواد مغناطیسی دیگر را، داشته باشد.

## electromagnet

## آهنربای الکتریکی

آهنربایی که ویژگی‌های مغناطیسی‌اش را جریان الکتریکی تولید می‌کند.

## grounding

## اتصال به زمین

فراهم آوردن امکان حرکت آزادانه‌ی بارهای الکتریکی در امتداد مسیری از رسانا به زمین.

## in series

## اتصال سری

اصطلاح متداول برای بخش‌هایی از مدار الکتریکی که طوری دنبال هم قرار گرفته‌اند که جریان پس از عبور از یکی از قطعه‌های آن، باید از بقیه هم بگذرد.

## in parallel

## اتصال موازی

اصطلاح متداول برای بخش‌هایی از مدار الکتریکی که در دو نقطه به هم متصل شده‌اند تا مسیرهای متفاوتی را برای جریان بین این نقاط به وجود آورند.

## potential difference

## اختلاف پتانسیل (ولتاژ)

اختلاف پتانسیل یا ولتاژ بین دو نقطه. بارهای آزاد وقتی در یک مدار الکتریکی شارش می‌یابد که اختلافی بین آن دو نقطه وجود داشته باشد و این شارش تا رسیدن دو نقطه به پتانسیل یکسان ادامه می‌یابد.

## electromagnetic induction

## القای الکترومغناطیسی

پدیده‌ی القای جریان (یا ولتاژ) در رسانا با تغییر میدان مغناطیسی در نزدیکی آن. اگر بتوان میدان مغناطیسی داخل حلقه‌ی بسته‌ای را به هر طریق تغییر داد، جریانی در آن حلقه القا می‌شود. قانون فارادی را هم ببینید.

## induction

## القا

باردار کردن جسم بدون تماس مستقیم.

**induced**

**القایی**

الف) اصطلاحی برای بارهای الکتریکی که توزیعشان بر اثر حضور جسم باردار در آن حوالی تغییر می‌کند.

ب) اصطلاحی برای ولتاژ، جریان، میدان الکتریکی، یا میدان مغناطیسی که بر اثر تغییر یا حرکت در میدان الکتریکی یا مغناطیسی به وجود می‌آید.

**electrod**

**الکتروُد**

پایانه، مثلاً پایانه‌ی باتری که جریان الکتریکی می‌تواند از آن عبور کند.

**electrostatics**

**الکتریسیته‌ی ساکن**

مطالعه‌ی بارهای الکتریکی ساکن و برهم کنش آن‌ها با یکدیگر.

**electron**

**الکترون**

ذره‌ی منفی موجود در اتم.

**conduction electrons**

**الکترون‌های رسانش**

الکترون‌های فلز که آزادانه حرکت و بار الکتریکی حمل می‌کنند.

**electricity**

**الکتریسیته**

اصطلاحی کلی برای پدیده‌های الکتریکی.

**electrically polarized**

**قطبیده‌ی الکتریکی**

اصطلاحی برای اتم یا مولکولی که بارها در آن طوری قرار گرفته‌اند که یک طرف آن اندکی مثبت‌تر یا منفی‌تر از طرف مقابل است.

**electric potential energy**

**انرژی پتانسیل الکتریکی**

انرژی‌ای که بار الکتریکی به سبب موقعیت خود در میدان الکتریکی دارد.

ohm

اُهم ( $\Omega$ )

یکای SI برای مقاومت الکتریکی. یک اُهم مقاومت قطعه‌ای است که وقتی ولتاژ یک ولت به دو سر آن اعمال شود جریانی برابر یک آمپر را بکشد.

electric charge

بار الکتریکی

ویژگی الکتریکی بنیادی که جاذبه یا دافعه‌ی متقابل بین الکترون‌ها و پروتون‌ها مربوط به آن است.

charging by induction

باردار کردن القایی

باز توزیع بارهای الکتریکی درون و بیرون اجسام که ناشی از تأثیر جسم باردار در نزدیکی آن جسم و بدون تماس با آن است.

charging by contact

باردار کردن تماسی

انتقال بار الکتریکی بین اجسام با مالش یا تماس ساده‌ی آن‌ها با یکدیگر.

comservation of charge

پایستگی بار

این اصل که بار الکتریکی را نمی‌توان خلق یا نابود ساخت، بلکه فقط می‌توان آن را از جسمی به جسم دیگر منتقل کرد.

electric potential

پتانسیل الکتریکی

انرژی پتانسیل الکتریکی (برحسب ژول) به ازای واحد بار (برحسب کولن) در محل میدان الکتریکی که با ولت اندازه‌گیری می‌شود.

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$$

transistor

ترانزیستور

پشت جلد کتاب را ببینید.

transformer

ترانسفورماتور (مبدل)

وسیله‌ای برای زیاد یا کم کردن ولتاژ یا انتقال توان الکتریکی از یک پیچ‌هی سیم به پیچ‌هی دیگر، با استفاده از القای الکترومغناطیسی.

## electric power

## توان الکتریکی

آهنگ انتقال انرژی الکتریکی یا آهنگ انجام یافتن کار که می‌توان آن را با حاصل ضرب جریان در ولتاژ اندازه گرفت.

$$P = VI \quad \text{یا} \quad \text{ولتاژ} \times \text{جریان} = \text{توان الکتریکی}$$

## electric current

## جریان الکتریکی

شارش بار الکتریکی که انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کند. جریان الکتریکی برحسب آمپر اندازه‌گیری می‌شود که هر آمپر به معنای شارش  $۱.۶ \times ۱۰^{-۱۹}$  الکترون (یا پروتون) در ثانیه است.

## alternating current

## جریان متناوب (ac)

جریان الکتریکی که جهتش به سرعت معکوس می‌شود. بارهای الکتریکی اطراف مکان‌های تقریباً ثابت، معمولاً با آهنگ ۶۰ هرتز، ارتعاش می‌کنند.

## direct current

## جریان مستقیم (dc)

جریان الکتریکی که در آن بار همیشه در یک جهت شارش می‌یابد.

## volume

## حجم

مقدار فضایی که جسم اشغال می‌کند.

## capacitor

## خازن

وسیله‌ای که برای ذخیره‌سازی بار (انرژی الکتریکی) در مدار الکتریکی به کار می‌رود.

## magnetism

## خاصیت مغناطیسی

ویژگی قابلیت جذب اجسام ساخته شده از آهن، فولاد و مگنتیت.

## magnetic field lines

## خط‌های میدان مغناطیسی

خط‌هایی که شکل میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند. قطب‌نمایی که روی چنین خطی قرار گیرد می‌چرخد تا با آن همسو شود.

**vacuum**

**خلأ**

نبود ماده؛ تهی

**diode**

**دیود**

قطعه‌ای الکترونیکی که جریان الکتریکی را در مدار به یک جهت محدود سازد؛ وسیله‌ای برای تبدیل جریان متناوب به جریان مستقیم.

**conductor**

**رسانا**

(الف) ماده‌ای که گرما را در آن بتوان منتقل کرد.  
(ب) ماده‌ای، معمولاً فلزی، که بار الکتریکی در آن جریان می‌یابد.

**conduction**

**رسانش**

(الف) در گرما، انتقال انرژی از ذره‌ای به ذره‌ی دیگر در برخی مواد، یا از ماده‌ای به ماده‌ی دیگر که در تماس مستقیم با آن است.  
(ب) در الکتریسیته، جریان بار الکتریکی در رسانا.

**generator**

**ژنراتور (مولد)**

ماشینی که، معمولاً با چرخاندن پیچه‌ای در میدان مغناطیسی ثابت، جریان الکتریکی تولید می‌کند.

**Joule**

**ژول (J)**

یکای SI برای کار و دیگر شکل‌های انرژی.

**fuse**

**فیوز**

وسيله‌ای در مدار الکتریکی که وقتی جریان به اندازه‌ی زیاد شود که خطر آتش‌سوزی به وجود آید، آن را قطع می‌کند.

**law**

**قانون**

فرضی کلی یا گزاره‌ای درباره‌ی کمیت‌های طبیعی که بارها به محکِ آزمون گذارده شده و هیچ گونه تناقضی برای آن یافت نشده است.

## Ohm's law

## قانون اهم

جریان در مدار با ولتاژ اعمال شده به آن نسبت مستقیم، و با مقاومت مدار نسبت عکس دارد.

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

## Faraday's law

## قانون فارادی

تعبیر ساده شده‌ی این قانون به این صورت است که با تغییر میدان مغناطیسی در محل یک پیچه، جریان الکتریکی در آن پیچه القا می‌شود.

## Coulomb's law

## قانون کولن

رابطه‌ی بین نیروی الکتریکی، بارها، و فاصله: نیروی الکتریکی بین دو بار با حاصل ضرب بارها و عکس مجذور فاصله‌ی آن‌ها از هم متناسب است. (ضریب تناسب  $k$  برابر  $9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$  است). اگر بارها همنام باشند، نیرو دافعه است؛ اگر بارها ناهمنام باشند، نیروی جاذبه است.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

## Colomb

## کولن (C)

یکای SI برای بار الکتریکی. یک کولن بار الکترون (یا پروتون) است.

## Galvanometer

## گالوانومتر

دستگاهی که برای آشکارسازی جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک به کار می‌رود.

معمولاً صفر گالوانومتر در میان صفحه‌ی مدرج یا مقیاس‌بندی شده‌ی آن قرار دارد، یعنی عقربه‌ی آن در حالت عادی وسط صفحه‌ی مدرج می‌ایستد.

## meter

## متر (m)

یکای استاندارد طول در SI.

## circuit

## مدار

هر مسیر کاملی که بار الکتریکی بتواند در آن جریان یابد.



## series circuit

## مدار سری

مدار الکتریکی که در آن قطعه‌های مختلف طوری به هم متصل شده‌اند که جریان یکسانی از همه‌ی آن‌ها می‌گذرد.

## short circuit

## مدار کوتاه

گسیختگی مدار الکتریکی بر اثر شارش بار در مسیر دارای مقاومت کم بین دو نقطه‌ای که نباید مستقیماً به هم متصل شوند، در نتیجه جریان از مسیر درست خود منحرف می‌شود؛ عملاً «کوتاه شدن مدار» است.

## parallel circuit

## مدار موازی

مدار الکتریکی متشکل از دو قطعه یا بیش‌تر که طوری به هم متصل شده‌اند که ولتاژ یکسانی به دو سر هر قطعه اعمال می‌شود و هر یک از آن‌ها مستقل از قطعه‌های دیگر مدار را کامل می‌کند.

## (resistor) resistance

## مقاومت الکتریکی

قطعه‌ای در مدار الکتریکی که برای مقاومت در برابر شارش بار الکتریکی طراحی شده است.

## electrical resistance

## مقاومت الکتریکی

مقاومت ماده در برابر شارش بار الکتریکی در آن که برحسب اهم (با نماد  $\Omega$ ) اندازه‌گیری می‌شود.

## voltage source

## منبع ولتاژ

ابزاری مثل باتری، یا ژنراتور (مولد) که اختلاف پتانسیل الکتریکی تأمین می‌کند.

## electric field

## میدان الکتریکی

میدان نیرویی که فضای اطراف هر بار یا گروهی از بارهای را پر می‌کند. آن را برحسب نیرو تقسیم بر بار ( $N/C$ ) اندازه‌گیری می‌کنند.

## magnetic field

## میدان مغناطیسی

ناحیه‌ی تأثیر مغناطیسی اطراف قطب مغناطیسی یا ذره‌ی باردار متحرک.

## electrical force

## نیروی الکتریکی

نیروی وارد از یک بار به بار دیگر. بارهای همنام یکدیگر را دفع و بارهای ناهمنام یکدیگر را جذب می‌کنند.

## electromotive force

## نیروی محرکه‌ی الکتریکی (emf)

هر ولتاژی که جریان الکتریکی به وجود آورد. باتری یا ژنراتور (مولد) منبع emf هستند.

## magnetic force

## نیروی مغناطیسی

بین دو آهنربا، برای قطب‌های ناهمنام جاذبه و برای قطب‌های همنام دافعه است.

## semiconductor

## نیمرسانا

قطعه‌ی ساخته شده از ماده‌ای که نه تنها خواصی بین ماده‌ی رسانا و عایق دارد، بلکه مقاومتش بر اثر تغییر وضعیت دما، ولتاژ، و میدان الکتریکی یا مغناطیسی ناگهان تغییر می‌کند.

## Watt

## وات

یکای SI برای توان. هرگاه یک ژول کار در یک ثانیه انجام شود، یک وات به مصرف رسیده است.

$$1\text{ W} = 1\text{ J} / 1\text{ s}$$

## Volte

## ولت (V)

یکای SI برای پتانسیل الکتریکی. یک ولت اختلاف پتانسیل الکتریکی‌ای است که در عبور از آن یک کولن بار انرژی یک ژون به دست می‌آورد یا از دست می‌دهد.

$$1\text{ V} = \frac{1\text{ J}}{1\text{ C}}$$

معیاری از اختلاف پتانسیل الکتریکی.

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

دستگاهی برای اندازه‌گیری ولتاژ دو سر یک قطعه‌ی الکتریکی. ولت‌سنج را به طور موازی در مدارهای الکتریکی می‌بندند.

اتم (یا گروهی از اتم‌های وابسته به هم) که با بار الکتریکی خالص حاصل از به دست آوردن یا از دست دادن الکترون‌ها به هم پیوسته‌اند. یون مثبت، اتمی که کمبود الکترون دارد، یک بار مثبت خالص دارد. یون منفی، اتمی که الکترون اضافی دارد، یک بار منفی خالص دارد.

واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی

induction	القا
inductance	ضریب خودالقایی
Farady's law of conduction	قانون القای فارادی
magnetic flux	شار مغناطیسی
Lens's law	قانون لنز
Inductor	القاگر
solenoid	سیملوله
self induction	خودالقایی
self induced emf	نیروی محرکه‌ی خودالقایی
inductive time constant	ثابت زمانی القایی
mutual induction	القای متقابل
mutal inductance	ضریب القای متقابل
alternting current	جریان متناوب
electric field	میدان الکتریکی
electric field lines	خط‌های میدان الکتریکی
Point charge	بار نقطه‌ای
electric charge	انرژی پتانسیل الکتریکی
electric potential energy	پتانسیل الکتریکی
electric current	جریان الکتریکی
single loop circuit	مدار تک حلقه
ammeter	آمپرسنج
voltmeter	ولت‌سنج
copacitane	ظرفیت
copacitor	خازن
dielectric	دی‌الکتریک
magnetic field	میدان مغناطیسی

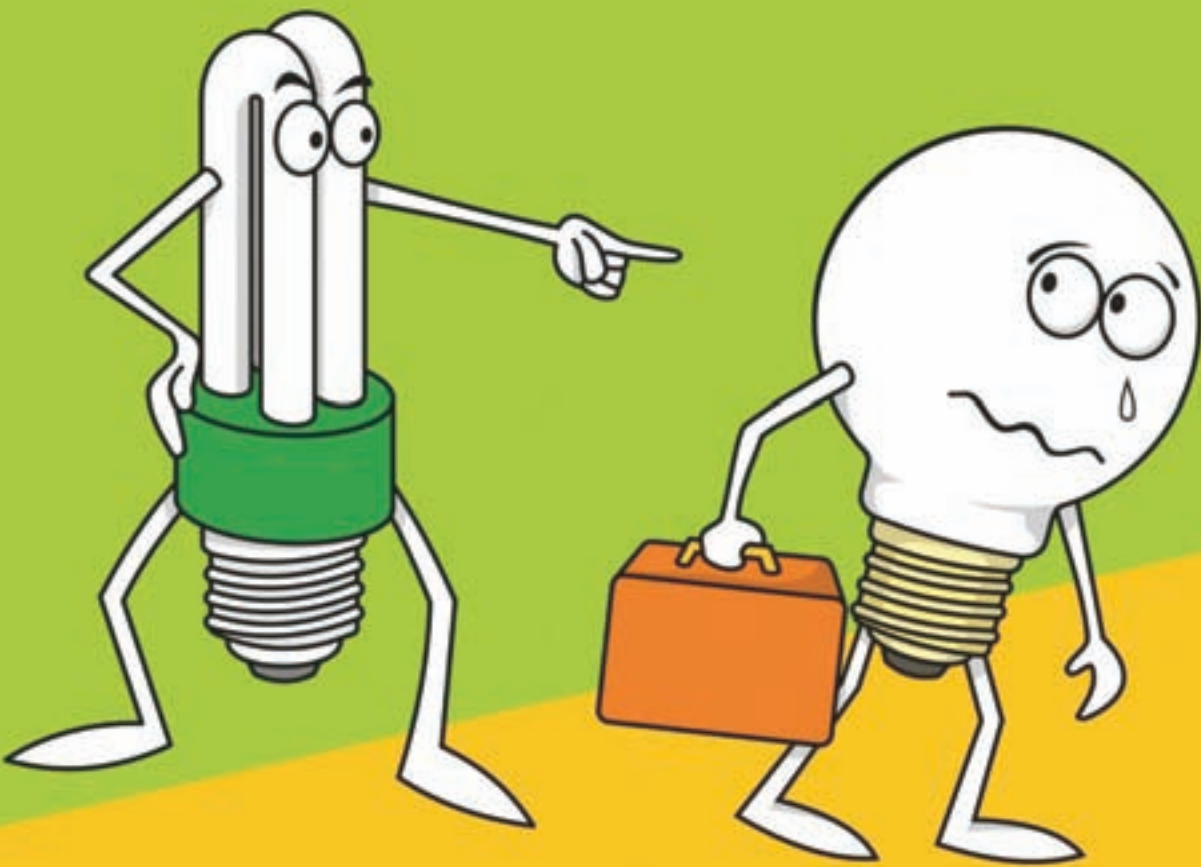
Ohm's law	قانون اهم
electric power	توان الکتریکی
semi conductor	نیم رسانا
super conductor	ابر رسانا
coil	پیچ
magnetic materials	مواد مغناطیسی
diamagnetism	دیامغناطیسی
paramagnetism	پارامغناطیسی
ferromagnetism	فرومغناطیسی
resistance	مقاومت
resistivity	مقاومت ویژه
wavelength	طول موج
frequency	بسامد
Coulomb's law	قانون کولن
electrostatic	الکتریسیته ی ساکن
positive charge	بار مثبت
negative charge	بار منفی
electron	الکترون
neutron	نوترون
proton	پروتون
nucleus	هسته
ionization	یونش
ion	یون
conductor	رسانا
insulator	عایق (نارسانا)
induced charge	بارهای القایی
electric force	نیروی الکتریکی
test charge	بار آزمون
uniform electric	میدان یکنواخت

vacuum	خلأ
parallel plate capocitor	خازن تخت (مسطح)
series	متوالی
paraller	موازی
equivalent capacitance	ظرفیت معادل
electromotive force	نیروی محرکه‌ی الکتریکی
conventional current	جریان قراردادی
ampere	آمپر
temperature	دما
terminal	پایانه
internal resistance	مقاومت درونی
Kirchhoff's rules	قانون‌های کیرشهف
junction	گره
Ohmmeter	اهم‌سنج
charging	باردار شدن (شارژ)
discharging	تخلیه (دشارژ)
time constant	ثابت زمانی
magnet	آهنربا
permanent magnet	آهنربای دائمی
like poles	قطب‌های همنام
compass	قطب‌نما
loudspeaker	بلندگو
generator	مولد
capacitive time constant	ثابت زمانی خازنی
capacitive reactance	مقاومت (واکنایی) خازنی
inductive	مقاومت (واکنایی) القایی
triboelectric effect	اثر تریبوالکتریک
piezoelectric effect	اثر پیزوالکتریک
thermoelectric effect	اثر ترموالکتریک

root mean square (rms)	ریشه‌ی میانگین مربعی (مؤثر)
average	میانگین متوسط



# پیوست ها





## پیوست الف

مروری کوتاه در ریاضیات

### نشانه‌ها و نمادهای ریاضی

$a = b$  یعنی  $a$  مساوی  $b$  است.

$a \neq b$  یعنی  $a$  مساوی  $b$  نیست.

$a > b$  یعنی  $a$  بزرگ‌تر از  $b$  است.

$a < b$  یعنی  $a$  کوچک‌تر از  $b$  است.

$a \geq b$  یعنی  $a$  کوچک‌تر از  $b$  نیست.

$a \leq b$  یعنی  $a$  بزرگ‌تر از  $b$  نیست.

$a \propto b$  یعنی  $a$  متناسب با  $b$  است.

$a \approx b$  یعنی  $a$  تقریباً مساوی  $b$  است.

$a \gg b$  یعنی  $a$  بسیار بزرگ‌تر از  $b$  است.

$a \ll b$  یعنی  $a$  بسیار کوچک‌تر از  $b$  است.

### توان‌ها و ریشه‌ها

برای هر عدد  $a$ ، توان  $n$  آن عدد عبارت است از  $n$  بار ضرب آن عدد در خودش، و به صورت  $a^n$  نوشته می‌شود.  $n$  را نما می‌نامند. از این قرار،

$$a^1 = a, a^2 = a.a, a^3 = a.a.a, a^4 = a.a.a.a, \dots$$

برای مثال،

$$3^2 = 3 \times 3 = 9, 3^3 = 3 \times 3 \times 3 = 27, 3^4 = 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81, \dots$$

یک نمای منفی دال بر این است که یک  $n$  بار بر عدد تقسیم کنند؛ بنابراین:

$$a^{-1} = \frac{1}{a}, a^{-2} = \frac{1}{a^2}, a^{-3} = \frac{1}{a^3}, \dots$$

نمای صفر، بی توجه به مقدار  $a$  حاصلش ۱ است،

$$a^0 = 1$$

قاعده‌های ترکیب نماها در حاصل ضرب‌ها، کسرها، و در توان‌های توان‌ها عبارت‌اند از:

$$a^n \cdot a^m = a^{n+m}$$

$$\frac{a^n}{a^m} = a^{n-m}$$

$$(a^n)^m = a^{n \cdot m}$$

برای مثال، به سهولت می‌توان ثابت کرد که:

$$3^2 \times 3^3 = 3^5$$

$$\frac{3^2}{3^3} = 3^{-1} = \frac{1}{3}$$

$$(3^2)^3 = 3^{2 \times 3} = 3^6$$

توجه کنید که برای هر دو عدد  $a$  و  $b$

$$(a.b)^n = a^n . b^n$$

برای مثال،

$$(2 \times 3)^3 = 2^3 \times 3^3$$

ریشه‌ی  $n$ ام  $a$  عددی است که توان  $n$ ام آن مساوی  $a$  است. ریشه  $n$ ام عدد  $a$  به صورت  $a^{1/n}$  نوشته می‌شود. ریشه دوم عدد  $a$  یعنی  $a^{1/2}$  را معمولاً جذر آن می‌نامند و به صورت  $\sqrt{a}$  نمایش می‌دهند.

$$a^{1/2} = \sqrt{a}$$

چنانکه نمادگذاری  $a^{1/n}$  هم نشان می‌دهد، ریشه‌ها عبارت‌اند از توان‌های کسری. و از قاعده‌های معمول در ترکیب نماها پیروی می‌کند:

$$(a^{1/n})^n = a^{n/n} = a$$

$$(a^{1/n})^m = a^{m/n}$$

### حساب کردن با نمادگذاری علمی

نمادگذاری علمی برای عددها در ضرب و تقسیم عددها بسیار بزرگ یا بسیار کوچک، کاملاً مفید است به خاطر این که می‌توانیم به بخش‌های اعشاری و صحیح اعداد به طور جداگانه پردازیم. برای مثال، در ضرب  $4 \times 10^{10}$  به  $5 \times 10^{12}$ ، به صورت زیر، ۴ را در ۵ و  $10^{10}$  را در  $10^{12}$  ضرب می‌کنیم:

$$\begin{aligned} (4 \times 10^{10}) \times (5 \times 10^{12}) &= (4 \times 5) \times (10^{10} \times 10^{12}) \\ &= 2 \times 10^{10+12} = 2 \times 10^{22} = 2 \times 10^{23} \end{aligned}$$

در تقسیم این اعداد نیز به همین شیوه عمل می‌کنیم:

$$\frac{4 \times 10^{10}}{5 \times 10^{12}} = \frac{4}{5} \times \frac{10^{10}}{10^{12}} = \frac{4}{5} \times 10^{10-12} = \frac{4}{5} \times 10^{-2} = \frac{4}{5} \times 10^{-3}$$

در جمع یا تفریق عددها در نمادگذاری علمی، باید مراقب باشیم که عددها را با توان‌های یکسان ده بیان کنیم. برای مثال، مجموع  $3 \times 10^8$  و  $1/5 \times 10^9$  عبارت است از

$$1/5 \times 10^9 + 3 \times 10^8 = 1/5 \times 10^9 + 3/10 \times 10^9 = 1/10 \times 10^9$$

## جبر

یک معادله، عبارت است از یک گزاره ریاضی که به ما می گوید یک کمیت یا ترکیبی از کمیت ها با کمیت یا ترکیبی از کمیت های دیگر مساوی است. بیشتر اوقات باید یکی از کمیت های معادله را برحسب کمیت های دیگر معادله به دست بیاوریم. برای مثال می توانیم با حل معادله:

$$x + a = b$$

جواب  $x$  را برحسب  $a$  و  $b$  به دست بیاوریم. در اینجا  $a$  و  $b$  مقدارهای عددی ثابت، یا عبارات ریاضی هستند که معلوم تلقی می شوند، و  $x$  به منزله ی مجهول معادله است. قاعده های جبری به ما می آموزند که چگونه با تغییر و تبدیل در معادله ها به راه حل و جواب آن ها برسیم. مهم ترین قاعده های، سه قاعده اند به شرح زیر:

۱- هرگاه جمله های یکسان به دو طرف یک معادله بیفزاییم یا از دو طرف آن کم کنیم، اعتبار معادله برقرار می ماند و تغییری در آن حاصل نمی شود.

این قاعده در حل معادله  $x + a = b$  سودمند است. از دو طرف معادله  $a$  را کسر می کنیم و داریم:

$$x + a - a = b - a$$

یعنی:

$$x = b - a$$

برای این که بینیم این قاعده در یک مثال عددی مشخص چگونه عمل می کند معادله ی

$$x + 7 = 5$$

را در نظر می گیریم. با کسر کردن ۷ از دو طرف معادله، داریم

$$x = 5 - 7$$

یا

$$x = -2$$

توجه داشته باشید که در یک معادله به شکل  $x + a = b$ ، ممکن است بخواهیم  $a$  را برحسب  $x$  و  $b$  پیدا کنیم، البته این در صورتی است که  $x$  قبلاً از روی اطلاعات دیگر معلوم بوده باشد اما  $a$  یک کمیت ریاضی باشد که هنوز معین نیست. اگر چنین باشد، باید  $x$  را از دو طرف معادله کسر کنیم، و خواهیم داشت:

$$a = b - x$$

بیش تر معادله های فیزیکی شامل چندین کمیت ریاضی هستند که بسته به شرایط گاهی اوقات نقش کمیت های معلوم را بازی می کنند، و گاهی هم نقش کمیت های مجهول را. در نتیجه، بسته به همین برای یافتن کمیت (همچون  $x$ ) مورد بررسی قرار دهیم.

۲- هرگاه دو طرف یک معادله را به یک و همان عامل ضرب کنیم، اعتبار معادله محفوظ می‌ماند و تغییری در آن حاصل نمی‌شود.

این قاعده، در حل معادله‌ای چون:

$$ax = b$$

سودمند است. به طور ساده، دو طرف را به  $a$  تقسیم می‌کنیم، و داریم:

$$\frac{ax}{a} = \frac{b}{a}$$

$$x = \frac{b}{a}$$

غالباً این ضرورت پیش می‌آید که هر دو قاعده‌ی بالا را با هم ترکیب کنیم، برای مثال، در حل معادله‌ی:

$$2x + 10 = 16$$

با تفریق ۱۰ از دو طرف شروع می‌کنیم و داریم:

$$2x + 10 = 16$$

یا

$$2x = 6$$

و سپس طرفین را به ۲ تقسیم می‌کنیم و به دست می‌آوریم:

$$x = \frac{6}{2}$$

یا

$$x = 3$$

۳- هرگاه دو طرف یک معادله را به توان یکسان برسانیم اعتبار معادله محفوظ می‌ماند و تغییری در آن حاصل نمی‌شود.  
این قاعده، حل معادله‌ی:

$$x^r = b$$

را ممکن می‌سازد. هر دو طرف را به توان  $1/r$  می‌رسانیم، و داریم:

$$(x^r)^{1/r} = b^{1/r}$$

یا

$$x = b^{1/r}$$

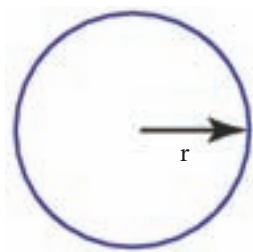
رابطه‌ی معادله‌ی درجه‌ی دوم:

$$ax^2 + bx + c = 0 \Rightarrow x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

قضیه‌ی فیثاغورس

$$a^2 + b^2 = c^2$$

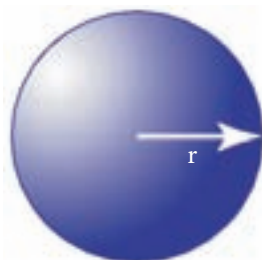
## محیط، مساحت و حجم



دایره‌ای به شعاع  $r$

محیط  $= 2\pi r$ ؛

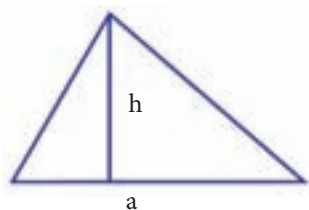
مساحت  $= \pi r^2$



کره‌ای به شعاع  $r$

مساحت  $= 4\pi r^2$ ؛

حجم  $= \frac{4}{3}\pi r^3$



مثلثی با قاعده‌ی  $a$  و ارتفاع  $h$ :

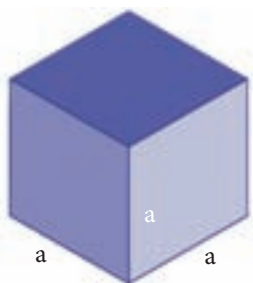
مساحت  $= \frac{1}{2} a h$



استوانه‌ای به شعاع  $r$  و ارتفاع  $h$

مساحت  $= \pi r^2 + 2\pi r h$

حجم  $= \pi r^2 h$



مکعبی به ضلع  $a$

حجم  $= a^3$

## دستگاه بین‌المللی یکاها

برای انجام اندازه‌گیری‌های درست و قابل اطمینان به یکاهای اندازه‌گیری‌ای نیاز داریم که تغییر نکنند و دارای قابلیت باز تولید در مکان‌های مختلف باشند.

دستگاه یکاهایی که دانشمندان علوم و مهندسان در سراسر جهان به کار می‌برند را به طور متداول **دستگاه متریک** می‌نامند، ولی این دستگاه از سال ۱۳۳۹ به طور رسمی با نام **دستگاه بین‌المللی** یا SI خوانده شده است.

در سال ۱۳۵۰ (ه‌ش) مجمع عمومی وزن‌ها و مقیاس‌ها هفت کمیت را به عنوان کمیت‌های اصلی انتخاب کرد که اساس دستگاه بین‌المللی یکاها را تشکیل دهند. جدول زیر یکاهای سه کمیت اصلی زمان، طول و جرم را نشان می‌دهد که در ادامه بررسی خواهیم.

سه کمیت اصلی SI و یکاهای آن‌ها		
کمیت	نام یکا	نماد یکا
زمان	ثانیه	s
طول	متر	m
جرم	کیلوگرم	kg

تعریف یکاهای اساسی دستگاه متریک در طول سال‌ها تحول یافته است. هنگامی که دستگاه متریک در سال ۱۷۹۱ میلادی توسط آکادمی علوم فرانسه تثبیت شد، متر برابر با یک ده میلیونیم فاصله‌ی بین قطب شمال تا استوا تعریف شده بود. همچنین ثانیه برابر با زمان لازم برای حرکت آونگی به طول یک متر از یک طرف به طرف دیگر تعریف شده بود. با این تعریف‌ها باز تولید دقیق یکاها، پر دردسر و سخت بود و با توافق بین‌المللی، تعریف‌های مناسب‌تری جای آن‌ها را گرفتند.

## پیوست پ

### ۳-۱ پیشوندها و تبدیل یکاها

اینک که در پیوست ب با برخی از یکاهای اصلی در SI آشنا شدیم به سادگی می‌توانیم یکاهای بزرگ‌تر و کوچک‌تر را برای همان کمیت‌های فیزیکی معرفی کنیم. در SI این یکاهای دیگر با مضرب‌های  $10^1$  یا  $10^{-1}$  به یکاهای اصلی مربوط می‌شوند. به این ترتیب یک کیلومتر ( $1\text{ km}$ ) برابر  $1000$  متر و یک سانتی‌متر ( $1\text{ cm}$ ) برابر  $\frac{1}{100}$  متر است. معمولاً مضرب‌های  $10^1$  یا  $\frac{1}{10}$  را به صورت نمایی بیان می‌کنیم.

برای مثال:

$$\frac{1}{1000} = 10^{-3} \text{ و } 1000 = 10^3$$

با این نمادگذاری  $1\text{ km} = 10^3\text{ m}$  و  $1\text{ cm} = 10^{-2}\text{ m}$ .

اسم یکاهای اضافی با افزودن یک پیشوند به اسم یکای اصلی به دست می‌آید. برای مثال پیشوند «کیلو» با کوتاه نوشت  $k$  همواره یکایی  $1000$  برابر بزرگ‌تر را نشان

می‌دهد. بنابراین:

$$1\text{ km} = 10^3\text{ متر} = 10^3\text{ m}$$

$$1\text{ kg} = 10^3\text{ گرم} = 10^3\text{ g}$$

$$1\text{ kW} = 10^3\text{ وات} = 10^3\text{ W}$$

برای راحتی کار، وقتی با اندازه‌های بسیار بزرگ یا بسیار کوچک سرو کار داریم، از پیشوندهایی که در جدول زیر آمده است استفاده می‌کنیم. همان‌طور که می‌بینید، هر پیشوند نشانه‌ای توان مشخصی از  $10$  است که به عنوان ضریب به کار برده می‌شود. استفاده از هر پیشوند برای یکای SI به منزله‌ی ضرب کردن آن یکا در ضریب مربوط به آن پیشوند است.

پیشوندهای یکاهای SI

نماد	پیشوند	ضریب	نماد	پیشوند	ضریب
d	دسی	$10^{-1}$	Y	یوتا	$10^{24}$
c	سانتی	$10^{-2}$	Z	زتا	$10^{21}$
m	میلی	$10^{-3}$	E	اِگزا	$10^{18}$
$\mu$	میکرو	$10^{-6}$	P	پتا	$10^{15}$
n	نانو	$10^{-9}$	T	ترا	$10^{12}$
p	پیکو	$10^{-12}$	G	گیگا (جیگا)	$10^9$
f	فِمَتو	$10^{-15}$	M	مِگا	$10^6$
a	اَتو	$10^{-18}$	k	کیلو	$10^3$
z	زِپتو	$10^{-21}$	h	هِکتو	$10^2$
y	یوکتو	$10^{-24}$	da	دِکا	$10^1$

پیشوندهایی که کاربرد بیش تری دارند و بهتر است آن‌ها را بخاطر بسپارید با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند.

**توجه:** معمولاً در رایانه‌ها و بعضی از ماشین حساب‌ها به جای استفاده از پیشوندهای یکاهای SI، نماد گذاری علمی را مختصرتر نشان می‌دهند. مثلاً می‌نویسند  $8.2E5$  و  $4.31E-11$  که در آن‌ها E نشان دهنده‌ی «توان ده» است و برحسب پیشوندهای یکاهای SI به صورت  $8/2 \times 10^5$  و  $4/31 \times 10^{-11}$  نوشته می‌شوند.



## علامت‌های اختصاری استاندارد

نماد	نام یکا	کمیت	نماد	نام یکا	کمیت
s	ثانیه	دوره‌ی تناوب	A	آمپر	جریان
Wb	وبر	شار مغناطیسی	H	هانری	القابیدگی
T	تسلا	میدان مغناطیسی	V	ولت	ولتاژ
N/C	نیوتون بر کولن	شدت میدان الکتریکی	W	وات	توان
N	نیوتون	نیرو	$\Omega$	اهم	مقاومت
C	کولن	مقدار بار الکتریکی	Hz	هرتز	بسامد
J	ژول	انرژی	V	ولت	نیروی محرکه الکتریکی
m	متر	طول	F	فاراد	ظرفیت
s	ثانیه	زمان	rad/s	رادیان بر ثانیه	بسامد زاویه‌ای

## چیز هایی که لازم است بدانید

## armature

## آرمیچر

بخشی از موتور یا مولد (ژنراتور) الکتریکی که نیروی محرکه‌ی الکتریکی در آن تولید می‌شود.

## super conductor

## ابررسانا

ماده‌ای که در دمای خاصی مقاومت آن در برابر عبور جریان الکتریکی صفر می‌شود.

## circuit breaker

## مدار قطع‌کن

وسیله‌ای در مدار الکتریکی که هنگام افزایش جریان تا حد به وجود آمدن خطر آتش‌سوزی مدار را قطع می‌کند.

## Len's law

## قانون لنز

قانونی برای تعیین جهت جریان القایی در یک مدار.

## maguetic flux

## شار مغناطیسی

کمیتی که نشان‌دهنده‌ی میزان عبور خط‌های میدان مغناطیسی از یک سطح است. اگر میدان مغناطیسی بر سطح عمود باشد، شار عبوری از آن بیشینه است.

## inductor

## القاگر

از یک القاگر می‌توان برای تولید یک میدان مغناطیسی دلخواه استفاده کرد.

## self inducion

## خودالقایی

یک emf القایی در هر پیچ‌های که جریان تغییر کند، ظاهر می‌شود.

## capacitive fime constant

## ثبت زمانی خازنی

از رابطه‌ی  $\tau = RC$  به دست می‌آید.

**inductive time constant**

**ثابت زمانی القایی**

از رابطه‌ی  $\tau = R / L$  به دست می‌آید.

**mutual inductance**

**القای متقابل**

اگر دو پیچه نزدیک یکدیگر باشند، یک جریان متغیر در هر پیچه می‌تواند یک emf در پیچه‌ی دیگر القا کند. این اثر القای متقابل خوانده می‌شود.

**diamagnetism**

**دیامغناطیس**

پدیده‌ای که در همه‌ی مواد هنگام حضور در میدان مغناطیسی ظاهر می‌شود. مواد دیامغناطیس تا وقتی که در میدان مغناطیسی خارجی قرار نگرفته باشند، خاصیت مغناطیسی از خود بروز نمی‌دهند.

**paramagnetism**

**پارا مغناطیس**

موادی که اتم‌های آن دارای دو قطبی‌های مغناطیسی دائم است ولی به طور کاتوره‌ای و تصادفی نسبت به یکدیگر واقع‌اند.

**ferromagnetism**

**فرومغناطیس**

موادی که می‌توانند با توجه به حوزه‌های مغناطیسی، خاصیت مغناطیسی دائم یا غیر دائم از خود بروز دهند.

**ampere**

**آمپر (A)**

یکای SI برای جریان الکتریکی. یک آمپر جریان یک کولن بار در یک ثانیه -  $1.6 \times 10^{-19}$  الکترون (یا پروتون) در ثانیه - است.

**ammeter**

**آمپر سنج**

وسیله‌ای برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی. گالوانومتر را ببینید.

**magnet**

**آهنربا**

هر جسمی که خواص مغناطیسی، یعنی توانایی جذب اجسام آهنی یا مواد مغناطیسی دیگر را، داشته باشد.

## آهنربای الکتریکی **electromagnet**

آهنربایی که ویژگی‌های مغناطیسی‌اش را جریان الکتریکی تولید می‌کند.

## اتصال به زمین **grounding**

فراهم آوردن امکان حرکت آزادانه‌ی بارهای الکتریکی در امتداد مسیری از رسانا به زمین.

## اتصال سری **in series**

اصطلاح متداول برای بخش‌هایی از مدار الکتریکی که طوری دنبال هم قرار گرفته‌اند که جریان پس از عبور از یکی از قطعه‌های آن، باید از بقیه هم بگذرد.

## اتصال موازی **in parallel**

اصطلاح متداول برای بخش‌هایی از مدار الکتریکی که در دو نقطه به هم متصل شده‌اند تا مسیرهای متفاوتی را برای جریان بین این نقاط به وجود آورند.

## اختلاف پتانسیل (ولتاژ) **potential difference**

اختلاف پتانسیل یا ولتاژ بین دو نقطه. بارهای آزاد وقتی در یک مدار الکتریکی شارش می‌یابد که اختلافی بین آن دو نقطه وجود داشته باشد و این شارش تا رسیدن دو نقطه به پتانسیل یکسان ادامه می‌یابد.

## القای الکترومغناطیسی **electromagnetic induction**

پدیده‌ی القای جریان (یا ولتاژ) در رسانا با تغییر میدان مغناطیسی در نزدیکی آن. اگر بتوان میدان مغناطیسی داخل حلقه‌ی بسته‌ای را به هر طریق تغییر داد، جریانی در آن حلقه القا می‌شود. قانون فارادی را هم ببینید.

## القا **induction**

باردار کردن جسم بدون تماس مستقیم.

**induced**

**القایی**

الف) اصطلاحی برای بارهای الکتریکی که توزیعشان بر اثر حضور جسم باردار در آن حوالی تغییر می‌کند.

ب) اصطلاحی برای ولتاژ، جریان، میدان الکتریکی، یا میدان مغناطیسی که بر اثر تغییر یا حرکت در میدان الکتریکی یا مغناطیسی به وجود می‌آید.

**electrod**

**الکتروُد**

پایانه، مثلاً پایانه‌ی باتری که جریان الکتریکی می‌تواند از آن عبور کند.

**electrostatics**

**الکتریسیته‌ی ساکن**

مطالعه‌ی بارهای الکتریکی ساکن و برهم کنش آن‌ها با یکدیگر.

**electron**

**الکترون**

ذره‌ی منفی موجود در اتم.

**conduction electrons**

**الکترون‌های رسانش**

الکترون‌های فلز که آزادانه حرکت و بار الکتریکی حمل می‌کنند.

**electricity**

**الکتریسیته**

اصطلاحی کلی برای پدیده‌های الکتریکی.

**electrically polarized**

**قطبیده‌ی الکتریکی**

اصطلاحی برای اتم یا مولکولی که بارها در آن طوری قرار گرفته‌اند که یک طرف آن اندکی مثبت‌تر یا منفی‌تر از طرف مقابل است.

**electric potential energy**

**انرژی پتانسیل الکتریکی**

انرژی‌ای که بار الکتریکی به سبب موقعیت خود در میدان الکتریکی دارد.

ohm

اُهم ( $\Omega$ )

یکای SI برای مقاومت الکتریکی. یک اُهم مقاومت قطعه‌ای است که وقتی ولتاژ یک ولت به دو سر آن اعمال شود جریانی برابر یک آمپر را بکشد.

electric charge

بار الکتریکی

ویژگی الکتریکی بنیادی که جاذبه یا دافعه‌ی متقابل بین الکترون‌ها و پروتون‌ها مربوط به آن است.

charging by induction

باردار کردن القایی

باز توزیع بارهای الکتریکی درون و بیرون اجسام که ناشی از تأثیر جسم باردار در نزدیکی آن جسم و بدون تماس با آن است.

charging by contact

باردار کردن تماسی

انتقال بار الکتریکی بین اجسام با مالش یا تماس ساده‌ی آن‌ها با یکدیگر.

comservation of charge

پایستگی بار

این اصل که بار الکتریکی را نمی‌توان خلق یا نابود ساخت، بلکه فقط می‌توان آن را از جسمی به جسم دیگر منتقل کرد.

electric potential

پتانسیل الکتریکی

انرژی پتانسیل الکتریکی (برحسب ژول) به ازای واحد بار (برحسب کولن) در محل میدان الکتریکی که با ولت اندازه‌گیری می‌شود.

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$$

transistor

ترانزیستور

پشت جلد کتاب را ببینید.

transformer

ترانسفورماتور (مبدل)

وسیله‌ای برای زیاد یا کم کردن ولتاژ یا انتقال توان الکتریکی از یک پیچ‌ی سیم به پیچ‌ی دیگر، با استفاده از القای الکترومغناطیسی.

## electric power

## توان الکتریکی

آهنگ انتقال انرژی الکتریکی یا آهنگ انجام یافتن کار که می‌توان آن را با حاصل ضرب جریان در ولتاژ اندازه گرفت.

$$P = VI \quad \text{یا} \quad \text{ولتاژ} \times \text{جریان} = \text{توان الکتریکی}$$

## electric current

## جریان الکتریکی

شارش بار الکتریکی که انرژی را از محلی به محل دیگر منتقل می‌کند. جریان الکتریکی برحسب آمپر اندازه‌گیری می‌شود که هر آمپر به معنای شارش  $6.25 \times 10^{18}$  الکترون (یا پروتون) در ثانیه است.

## alternating current

## جریان متناوب (ac)

جریان الکتریکی که جهتش به سرعت معکوس می‌شود. بارهای الکتریکی اطراف مکان‌های تقریباً ثابت، معمولاً با آهنگ ۶۰ هرتز، ارتعاش می‌کنند.

## direct current

## جریان مستقیم (dc)

جریان الکتریکی که در آن بار همیشه در یک جهت شارش می‌یابد.

## volume

## حجم

مقدار فضایی که جسم اشغال می‌کند.

## capacitor

## خازن

وسیله‌ای که برای ذخیره‌سازی بار (انرژی الکتریکی) در مدار الکتریکی به کار می‌رود.

## magnetism

## خاصیت مغناطیسی

ویژگی قابلیت جذب اجسام ساخته شده از آهن، فولاد و مگنتیت.

## magnetic field lines

## خط‌های میدان مغناطیسی

خط‌هایی که شکل میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند. قطب‌نمایی که روی چنین خطی قرار گیرد می‌چرخد تا با آن همسو شود.

**خلأ** vacuum

نبود ماده؛ تهی

**دیود** diode

قطعه‌ای الکترونیکی که جریان الکتریکی را در مدار به یک جهت محدود سازد؛ وسیله‌ای برای تبدیل جریان متناوب به جریان مستقیم.

**رسانا** conductor

الف) ماده‌ای که گرما را در آن بتوان منتقل کرد.  
ب) ماده‌ای، معمولاً فلزی، که بار الکتریکی در آن جریان می‌یابد.

**رسانش** conduction

الف) در گرما، انتقال انرژی از ذره‌ای به ذره‌ی دیگر در برخی مواد، یا از ماده‌ای به ماده‌ی دیگر که در تماس مستقیم با آن است.  
ب) در الکتریسیته، جریان بار الکتریکی در رسانا.

**ژنراتور (مولد)** generator

ماشینی که، معمولاً با چرخاندن پیچه‌ای در میدان مغناطیسی ثابت، جریان الکتریکی تولید می‌کند.

**ژول (J)** Joule

یکای SI برای کار و دیگر شکل‌های انرژی.

**فیوز** fuse

وسيله‌ای در مدار الکتریکی که وقتی جریان به اندازه‌ی زیاد شود که خطر آتش‌سوزی به وجود آید، آن را قطع می‌کند.

**قانون** law

فرضی کلی یا گزاره‌ای درباره‌ی کمیت‌های طبیعی که بارها به محکِ آزمون گذارده شده و هیچ گونه تناقضی برای آن یافت نشده است.



## Ohm's law

## قانون اهم

جریان در مدار با ولتاژ اعمال شده به آن نسبت مستقیم، و با مقاومت مدار نسبت عکس دارد.

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

## Faraday's law

## قانون فارادی

تعبیر ساده شده‌ی این قانون به این صورت است که با تغییر میدان مغناطیسی در محل یک پیچه، جریان الکتریکی در آن پیچه القا می‌شود.

## Coulomb's law

## قانون کولن

رابطه‌ی بین نیروی الکتریکی، بارها، و فاصله: نیروی الکتریکی بین دو بار با حاصل ضرب بارها و عکس مجذور فاصله‌ی آن‌ها از هم متناسب است. (ضریب تناسب  $k$  برابر  $9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$  است). اگر بارها همنام باشند، نیرو دافعه است؛ اگر بارها ناهمنام باشند، نیروی جاذبه است.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

## Colomb

## کولن (C)

یکای SI برای بار الکتریکی. یک کولن بار الکترون (یا پروتون) است.

## Galvanometer

## گالوانومتر

دستگاهی که برای آشکارسازی جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک به کار می‌رود.

معمولاً صفر گالوانومتر در میان صفحه‌ی مدرج یا مقیاس‌بندی شده‌ی آن قرار دارد، یعنی عقربه‌ی آن در حالت عادی وسط صفحه‌ی مدرج می‌ایستد.

## meter

## متر (m)

یکای استاندارد طول در SI.

## circuit

## مدار

هر مسیر کاملی که بار الکتریکی بتواند در آن جریان یابد.

## series circuit

## مدار سری

مدار الکتریکی که در آن قطعه‌های مختلف طوری به هم متصل شده‌اند که جریان یکسانی از همه‌ی آن‌ها می‌گذرد.

## short circuit

## مدار کوتاه

گسیختگی مدار الکتریکی بر اثر شارش بار در مسیر دارای مقاومت کم بین دو نقطه‌ای که نباید مستقیماً به هم متصل شوند، در نتیجه جریان از مسیر درست خود منحرف می‌شود؛ عملاً «کوتاه شدن مدار» است.

## parallel circuit

## مدار موازی

مدار الکتریکی متشکل از دو قطعه یا بیش‌تر که طوری به هم متصل شده‌اند که ولتاژ یکسانی به دو سر هر قطعه اعمال می‌شود و هر یک از آن‌ها مستقل از قطعه‌های دیگر مدار را کامل می‌کند.

## (resistor) resistance

## مقاومت الکتریکی

قطعه‌ای در مدار الکتریکی که برای مقاومت در برابر شارش بار الکتریکی طراحی شده است.

## electrical resistance

## مقاومت الکتریکی

مقاومت ماده در برابر شارش بار الکتریکی در آن که برحسب اهم (با نماد  $\Omega$ ) اندازه‌گیری می‌شود.

## voltage source

## منبع ولتاژ

ابزاری مثل باتری، یا ژنراتور (مولد) که اختلاف پتانسیل الکتریکی تأمین می‌کند.

## electric field

## میدان الکتریکی

میدان نیرویی که فضای اطراف هر بار یا گروهی از بارهای را پر می‌کند. آن را برحسب نیرو تقسیم بر بار ( $N/C$ ) اندازه‌گیری می‌کنند.

## magnetic field

## میدان مغناطیسی

ناحیه‌ی تأثیر مغناطیسی اطراف قطب مغناطیسی یا ذره‌ی باردار متحرک.

## electrical force

## نیروی الکتریکی

نیروی وارد از یک بار به بار دیگر. بارهای همنام یکدیگر را دفع و بارهای ناهمنام یکدیگر را جذب می‌کنند.

## electromotive force

## نیروی محرکه‌ی الکتریکی (emf)

هر ولتاژی که جریان الکتریکی به وجود آورد. باتری یا ژنراتور (مولد) منبع emf هستند.

## magnetic force

## نیروی مغناطیسی

بین دو آهنربا، برای قطب‌های ناهمنام جاذبه و برای قطب‌های همنام دافعه است.

## semiconductor

## نیمرسانا

قطعه‌ی ساخته شده از ماده‌ای که نه تنها خواصی بین ماده‌ی رسانا و عایق دارد، بلکه مقاومتش بر اثر تغییر وضعیت دما، ولتاژ، و میدان الکتریکی یا مغناطیسی ناگهان تغییر می‌کند.

## Watt

## وات

یکای SI برای توان. هرگاه یک ژول کار در یک ثانیه انجام شود، یک وات به مصرف رسیده است.

$$1\text{ W} = 1\text{ J} / 1\text{ s}$$

## Volte

## ولت (V)

یکای SI برای پتانسیل الکتریکی. یک ولت اختلاف پتانسیل الکتریکی‌ای است که در عبور از آن یک کولن بار انرژی یک ژون به دست می‌آورد یا از دست می‌دهد.

$$1\text{ V} = \frac{1\text{ J}}{1\text{ C}}$$

معیاری از اختلاف پتانسیل الکتریکی.

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

دستگاهی برای اندازه‌گیری ولتاژ دو سر یک قطعه‌ی الکتریکی. ولت‌سنج را به طور موازی در مدارهای الکتریکی می‌بندند.

اتم (یا گروهی از اتم‌های وابسته به هم) که با بار الکتریکی خالص حاصل از به دست آوردن یا از دست دادن الکترون‌ها به هم پیوسته‌اند. یون مثبت، اتمی که کمبود الکترون دارد، یک بار مثبت خالص دارد. یون منفی، اتمی که الکترون اضافی دارد، یک بار منفی خالص دارد.

واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی

induction	القا
inductance	ضریب خودالقایی
Farady's law of conduction	قانون القای فارادی
magnetic flux	شار مغناطیسی
Lens's law	قانون لنز
Inductor	القاگر
solenoid	سیملوله
self induction	خودالقایی
self induced emf	نیروی محرکه‌ی خودالقایی
inductive time constant	ثابت زمانی القایی
mutual induction	القای متقابل
mutal inductance	ضریب القای متقابل
alternting current	جریان متناوب
electric field	میدان الکتریکی
electric field lines	خط‌های میدان الکتریکی
Point charge	بار نقطه‌ای
electric charge	انرژی پتانسیل الکتریکی
electric potential energy	پتانسیل الکتریکی
electric current	جریان الکتریکی
single loop circuit	مدار تک حلقه
ammeter	آمپرسنج
voltmeter	ولت‌سنج
copacitane	ظرفیت
copacitor	خازن
dielectric	دی‌الکتریک
magnetic field	میدان مغناطیسی

Ohm's law	قانون اهم
electric power	توان الکتریکی
semi conductor	نیم رسانا
super conductor	ابر رسانا
coil	پیچ
magnetic materials	مواد مغناطیسی
diamagnetism	دیامغناطیسی
paramagnetism	پارامغناطیسی
ferromagnetism	فرومغناطیسی
resistance	مقاومت
resistivity	مقاومت ویژه
wavelength	طول موج
frequency	بسامد
Coulomb's law	قانون کولن
electrostatic	الکتریسیته ی ساکن
positive charge	بار مثبت
negative charge	بار منفی
electron	الکترون
neutron	نوترون
proton	پروتون
nucleus	هسته
ionization	یونش
ion	یون
conductor	رسانا
insulator	عایق (نارسانا)
induced charge	بارهای القایی
electric force	نیروی الکتریکی
test charge	بار آزمون
uniform electric	میدان یکنواخت

vacuum	خلأ
parallel plate capocitor	خازن تخت (مسطح)
series	متوالی
paraller	موازی
equivalent capacitance	ظرفیت معادل
electromotive force	نیروی محرکه‌ی الکتریکی
conventional current	جریان قراردادی
ampere	آمپر
temperature	دما
terminal	پایانه
internal resistance	مقاومت درونی
Kirchhoff's rules	قانون‌های کیرشهف
junction	گره
Ohmmeter	اهم‌سنج
charging	باردار شدن (شارژ)
discharging	تخلیه (دشارژ)
time constant	ثابت زمانی
magnet	آهنربا
permanent magnet	آهنربای دائمی
like poles	قطب‌های همنام
compass	قطب‌نما
loudspeaker	بلندگو
generator	مولد
capacitive time constant	ثابت زمانی خازنی
capacitive reactance	مقاومت (واکنایی) خازنی
inductive	مقاومت (واکنایی) القایی
triboelectric effect	اثر تریبوالکتریک
piezoelectric effect	اثر پیزوالکتریک
thermoelectric effect	اثر ترموالکتریک

root mean square (rms)	ریشه‌ی میانگین مربعی (مؤثر)
average	میانگین متوسط

