

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

اللّٰهُمَّ صَلِّ عَلٰی مُحَمَّدٍ وَآلِ مُحَمَّدٍ وَعَجِّلْ فَرَجَهُمْ

## فیزیک (۲)

رشته علوم تجربی

پایه یازدهم

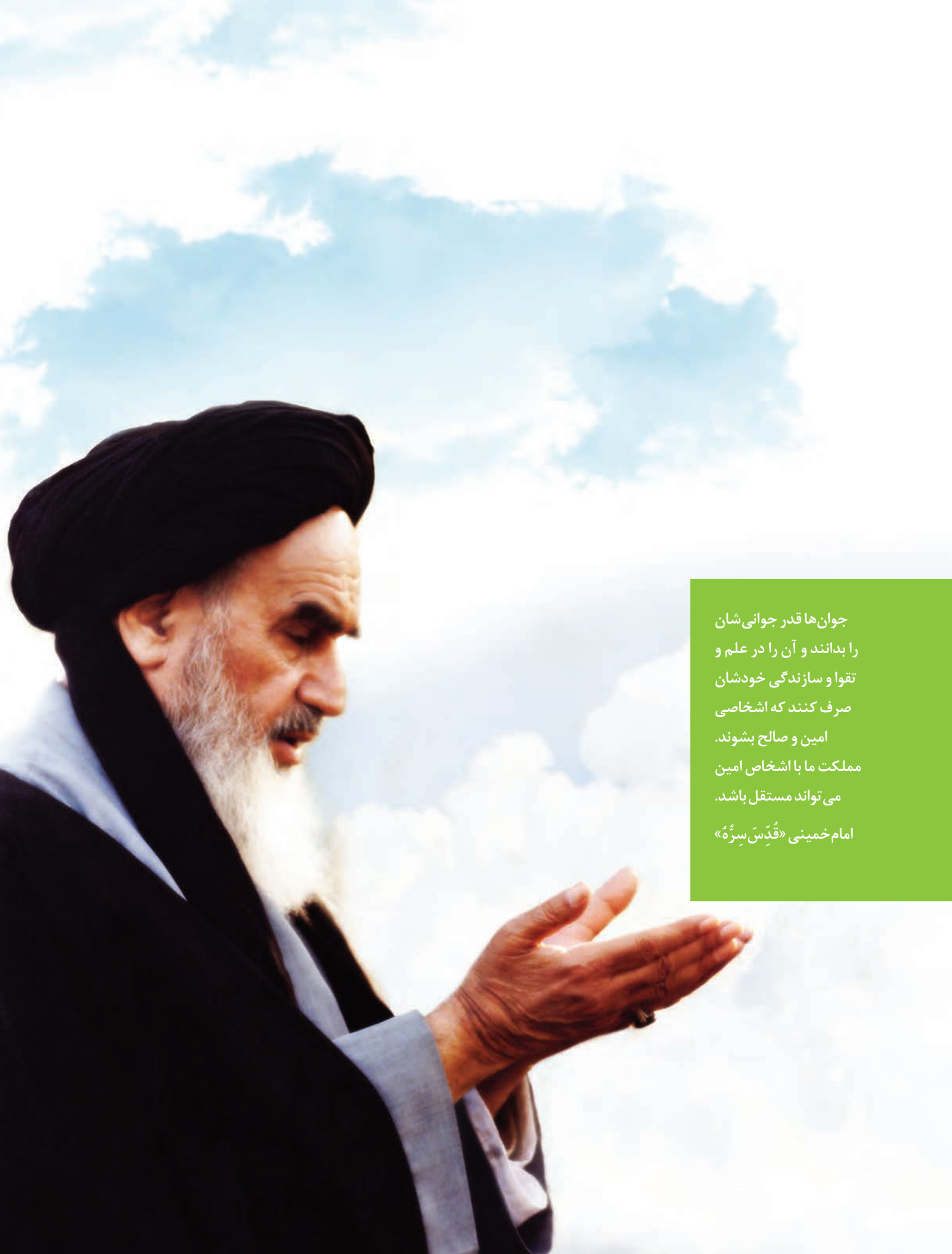
دوره دوم متوسطه



وزارت آموزش و پرورش  
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب: فیزیک (۲) - پایه یازدهم دوره دوم متوسطه - ۱۱۱۲۴۴  
پدیدآورنده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی  
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف: دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری  
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف: احمد احمدی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، سید هدایت سجادی، سیروان مردوخی و علیرضا نیکنام (اعضای شورای برنامه‌ریزی و گروه تألیف) - محمدکاظم بهنیا (ویراستار ادبی)  
مدیریت آماده‌سازی هنری: اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی  
شناسه افزوده آماده‌سازی: احمدرضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) - مجید ذاکری یونسی (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی (طراح جلد) - راحله زادفتح‌اله (طراح گرافیک و صفحه‌آرا) - فاطمه رئیسیان فیروزآباد (رسام) - مرضیه اخلاقی، سیده فاطمه محسنی، پریسا پژوهی‌پاد، آذر روستایی فیروزآباد، زینت بهشتی شیرازی، حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)  
نشانی سازمان: تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)  
تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹  
وبگاه: [www.irtextbook.ir](http://www.irtextbook.ir) و [www.chap.sch.ir](http://www.chap.sch.ir)  
ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش) تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹  
چاپخانه: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»  
سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ چهارم ۱۳۹۹

شابک ۹۷۸-۹۶۴-۰۵-۲۸۳۹-۶  
ISBN: 978-964-05-2839-6



جوان‌ها قدر جوانی‌شان  
را بدانند و آن را در علم و  
تقوا و سازندگی خودشان  
صرف کنند که اشخاصی  
امین و صالح بشوند.  
مملکت ما با اشخاص امین  
می‌تواند مستقل باشد.  
امام خمینی «قَدَسَ سِرَّةً»

کلیه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی وزارت آموزش و پرورش است و هرگونه استفاده از کتاب و اجزای آن به صورت چاپی و الکترونیکی و ارائه در پایگاه‌های مجازی، نمایش، اقتباس، تلخیص، تبدیل، ترجمه، عکس برداری، نقاشی، تهیه فیلم و تکثیر به هر شکل و نوع، بدون کسب مجوز از این سازمان ممنوع است و متخلفان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

## فهرست

- ۱-۱ بار الکتریکی ..... ۲
- ۲-۱ پایداری و کوانتیده بودن بار الکتریکی ..... ۳
- ۳-۱ قانون کولن ..... ۵
- ۴-۱ میدان الکتریکی ..... ۱۰
- ۵-۱ میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار ..... ۱۱
- ۶-۱ خطوط میدان الکتریکی ..... ۱۶
- ۷-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی ..... ۲۰
- ۸-۱ پتانسیل الکتریکی ..... ۲۲
- ۹-۱ توزیع بار الکتریکی در اجسام رسانا ..... ۲۵
- ۱۰-۱ خازن ..... ۲۸
- ۱۱-۱ انرژی خازن ..... ۳۳
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ..... ۳۵



- ۱-۲ جریان الکتریکی ..... ۴۰
- ۲-۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم ..... ۴۳
- ۳-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی ..... ۴۵
- ۴-۲ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها ..... ۵۰
- ۵-۲ توان در مدارهای الکتریکی ..... ۵۳
- ۶-۲ ترکیب مقاومت‌ها ..... ۵۵
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ..... ۶۲



- ۱-۳ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی ..... ۶۶
- ۲-۳ میدان مغناطیسی ..... ۶۷
- ۳-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک در میدان مغناطیسی .... ۷۱
- ۴-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان ..... ۷۳
- ۵-۳ میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیلهٔ جریان الکتریکی ..... ۷۶
- ۶-۳ ویژگی‌های مغناطیسی مواد ..... ۸۳
- ۷-۳ پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی ..... ۸۵
- ۸-۳ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده ..... ۸۷
- ۹-۳ قانون لنز ..... ۹۱
- ۱۰-۳ القاگرها ..... ۹۳
- ۱۱-۳ جریان متناوب ..... ۹۷
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ..... ۱۰۱



- واژه‌نامه ..... ۱۰۶
- منابع ..... ۱۰۸

## خرد هر کجا کنی آرد پدید به نام خدا سازد آن را کلید

### الف) سخنی با دانش آموزان عزیز

کتاب فیزیک ۲ برای پایه یازدهم دوره نظری تألیف و چاپ شده است. این کتاب در ادامه تغییر برنامه درسی آموزش علوم تجربی در دوره اول متوسطه و فیزیک دهم است. برای ارتباط مؤثرتر با برنامه درسی این کتاب و تحقق اهداف آن، توجه به مواردی که در ادامه می آید توصیه می شود. مسیر آموزش و یادگیری: دانش آموزان عزیز! مسیر آموزش و یادگیری، وقتی شوق انگیز و لذت بخش است که با تلاش و جدیت شما برای پیودن آن همراه شود. پیش از همه، باید به توانایی های خود باور و اعتماد داشته باشید. مفاهیمی که در هر سال تحصیلی می خوانید، با سطح درک و فهم شما متناسب است و برای بهبود و ارتقای زندگی فردی، اجتماعی و حرفه ای شما مفیدند. در فرایند آموزش، به طور فعال و با انگیزه مشارکت کنید. اگر امروز نتوانید دانش، مهارت و نگرش خود را بهبود ببخشید، ممکن است فردا دیر باشد! برای تعامل مؤثر و سازنده با دنیای پرشتاب و در حال تغییر امروز، راهی جز «کسب خرد» ندارید و این خرد به تدریج و به تبع باور، تلاش و مشارکت شما در فرایند آموزش به دست می آید.

خرد رهنما و خرد رهگشای  
خرد دست گیرد به هر دو سرای

**یادگیری را بیاموزیم:** هر یک از شما شیوه های یادگیری متفاوت و ابزار یادگیری ویژه خود را دارید و بهتر است بر همین اساس روشی مناسب برای یادگیری خود بیابید و متناسب با آن برنامه ریزی کنید. شاید مهم ترین کاری که می توانید انجام دهید، آن باشد که برای خود زمان های مطالعه با برنامه زمان بندی منظم و کافی در محیطی خالی از عوامل های برهم زننده تمرکز، در نظر بگیرید. روشن است که باید وقت بیشتری را صرف جنبه هایی کنید که یادگیری آن برای شما دشوارتر است. اگر با شنیدن و انجام آزمایش مطالب درسی را می آموزید، حضور فعال در کلاس های درس بسیار مهم است. اگر با توضیح دادن آنها را می آموزید، آنگاه علاوه بر حضور فعال در کلاس های درس، کار کردن با دانش آموزان دیگر نیز برای شما بسیار راه گشا است. اگر حل کردن مسئله برای شما دشوار است وقت بیشتری را صرف یادگیری روش حل مسئله ها کنید. با توجه به آنچه گفته شد، اکنون به پرسش های زیر پاسخ دهید:

**آیا من توانایی به کار بردن مفهوم های ریاضی را در فیزیک دارم؟** اگر پاسخ شما منفی است، به کتاب های ریاضیات پایه هفتم تا دهم خود مراجعه کنید و افزون بر اینها از معلم خود نیز راهنمایی های لازم را بخواهید. آسان ترین فعالیت ها در فیزیک برای من کدام ها بوده اند؟ نخست این فعالیت ها را انجام دهید؛ این کار به ایجاد اعتماد به نفس در شما کمک می کند. آیا اگر کتاب را پیش از کلاس خوانده باشم، مطلب را بهتر می فهمم یا پس از آن؟ آیا زمانی که صرف یادگیری فیزیک می کنم کافی است؟ برای من بهترین ساعت روز برای مطالعه فیزیک کدام است؟ زمان خاصی از روز را برگزینید و آن را تغییر ندهید. آیا در جای آرامی که بتوانم تمرکز خود را حفظ کنم، کار می کنم؟

**کار گروهی:** دانشمندان و مهندسان به ندرت در انزوا کار می کنند؛ بلکه بیشتر با یکدیگر همکاری دارند. در آموزش مدرسه ای نیز اگر با دیگر دوستانتان کار کنید، هم فیزیک بیشتر می آموزید و هم از این یادگیری بیشتر لذت خواهید برد. امروزه بسیاری از معلمان به این همکاری گروهی و مشارکت در یادگیری در کلاس های درس توجه ویژه ای دارند.

**یادداشت برداری در کلاس درس:** یک مؤلفه بسیار مهم در فرایند یادگیری هر درس، حضور فعال در کلاس آن درس و یادداشت برداری است. در کلاس فیزیک و در فرایند آموزش فعالیت هایی انجام می شود که شما را یاری می کند تا درک خوبی از مفاهیم فیزیکی و کاربردهای آنها پیدا کنید. اگر نتوانستید در یکی از جلسه های کلاسی شرکت کنید، از یکی از اعضای گروه یا هم کلاسی های خود بخواهید که شما را در جریان آنچه گذشته است، قرار دهد.

**چه موقع فیزیک را فهمیده ایم؟** برخی از دانش آموزان هنگام خواندن درس فیزیک، خود را در این اندیشه می یابند که «من مفهوم ها را می دانم، اما نمی توانم مسئله ها را حل کنم.» حال آنکه در فیزیک، درک واقعی یک مفهوم یا اصل، با توانایی در به کار بردن آن اصل در مسئله های مختلف مرتبط است. فراگیری چگونگی حل مسئله ها اهمیت اساسی دارد؛ شما فیزیک را خوب فرا نگرفته اید؛ مگر آنکه بتوانید آنچه را فرا گرفته اید، در موقعیت های مناسب به کار برید.

**مسئله های فیزیک را چگونه حل کنیم؟** برای حل انواع مختلف مسئله های فیزیک به روش های متفاوتی نیاز داریم. صرف نظر از نوع مسئله ای که در دست دارید، گام های کلیدی مؤثری وجود دارند که باید آنها را مراعات کنید.

• گام اول: شناسایی مفهوم‌های مرتبط: نخست تشخیص دهید چه مفهوم‌های فیزیکی‌ای به مسئله مربوط‌اند، اگرچه در این مرحله هیچ محاسبه‌ای وجود ندارد؛ اما گاهی بحث‌انگیزترین بخش راه‌حل مسئله همین مرحله است. در این مرحله باید متغیر هدف مسئله – یعنی کمیتی را که سعی در یافتن مقدار آن دارید – شناسایی کنید. این کمیت می‌تواند نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره باردار، توان یک مولد یا انرژی ذخیره‌شده در یک سیمولوله باشد.

• گام دوم: آمادگی برای حل مسئله: براساس مفهوم‌هایی که در گام اول برگزیده‌اید، معادله‌هایی را که برای حل مسئله نیاز دارید، بنویسید و در مورد چگونگی به کار بردن آنها تصمیم بگیرید. اگر لازم می‌دانید طرح و مدلی از وضعیتی رسم کنید که توسط مسئله توصیف شده است.

• گام سوم: اجرای راه حل: در این مرحله، محاسبات ریاضی مسئله را انجام دهید. پیش از آنکه دست به کار محاسبه‌ها شوید، فهرستی از همه متغیرهای معلوم و مجهول تهیه کنید. سپس معادله‌ها را حل کنید و مجهول‌ها را به دست آورید.

• گام چهارم: ارزیابی پاسخ: هدف شما از حل مسئله فیزیک تنها به دست آوردن یک عدد یا یک فرمول نیست؛ هدف آن است که درک و شناخت بهتری حاصل شود. به این معنا که باید پاسخ را بیازمایید و دریابید که به شما چه می‌گوید. فراموش نکنید که از خود بپرسید «آیا این پاسخ با معناست؟» اگر مجهول شما اندازه میدان مغناطیسی یک سیمولوله حامل جریان است، پاسخ شما نباید عدد بسیار بزرگی مانند  $5 \times 10^5$  تسلا باشد؛ در این صورت، حتماً چیزی در فرایند حل مسئله شما نادرست بوده است. بازگردید و روش کار خود را واری و راه‌حل را اصلاح کنید.

## ب) سخنی با دبیران ارجمند

اهداف برنامه آموزش فیزیک در دوره متوسطه دوم، مطابق با برنامه درسی ملی در چهار عرصه ارتباط با خود، خلق و خلقت مبتنی بر ارتباط با خدا تعریف شده و در جهت تقویت پنج عنصر تفکر و تعقل، ایمان، علم، عمل و اخلاق پیش خواهد رفت. بر این اساس مهم‌ترین شایستگی‌های مدنظر حوزه علوم تجربی که در درس فیزیک باید در دانش آموز تحقق یابد، عبارت‌اند از:

• نظام‌مندی طبیعت را براساس درک و تحلیل مفاهیم، الگوها و روابط بین پدیده‌های طبیعی به عنوان نشانه‌های الهی کشف و گزارش کند و نتایج آن را برای حل مسائل حال و آینده در ابعاد فردی و اجتماعی در قالب اندیشه یا ابزار ارائه دهد / به کار گیرد.

• با ارزیابی رفتارهای متفاوت در ارتباط با خود و دیگران در موقعیت‌های گوناگون زندگی، رفتارهای سالم را انتخاب کند، گزارش کند و به کار گیرد.  
• با درک ماهیت، روش و فرایند علم تجربی، امکان به کارگیری این علم را در حل مسائل واقعی زندگی (حال و آینده)، تحلیل و محدودیت‌ها و توانمندی‌های علوم تجربی را در حل این مسائل گزارش کند.

• با استفاده از منابع علمی معتبر و بهره‌گیری از علم تجربی، بتواند اندیشه‌هایی مبتنی بر تجارب شخصی، برای مشارکت در فعالیت‌های علمی ارائه دهد و در این فعالیت‌ها با حفظ ارزش‌ها و اخلاق علمی مشارکت کند.

شیوه‌های آموزش: تجربه نشان می‌دهد که درک ایده‌های نهفته در بیشتر مفاهیم فیزیک و کاربرد آنها در زندگی برای اغلب دانش‌آموزان امکان‌پذیر است. آنچه در این راه در میزان موفقیت دانش‌آموزان مؤثر است، شیوه‌های آموزش مادر کلاس درس است. این شیوه‌ها می‌توانند درک و فهم مفاهیم فیزیک را برای همه دانش‌آموزان، بدون توجه به توانایی علمی آنان، باز کند. بنابراین، می‌توان گفت شیوه آموزش کارآمد کلید موفقیت هر برنامه درسی است. انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربه خود و به کارگیری شیوه‌های آموزشی مؤثر، بستر مناسبی برای یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش و همچنین شوق انگیزتر شدن فضای کلاس فراهم کنند.

در برنامه جدید آموزش فیزیک به هر بحث و موضوع تنها یک بار پرداخته شده است و حدّ نهایی آن براساس آنچه در کتاب درسی آمده، تعیین می‌شود. بنابراین لازم است همکاران محترم از افزودن مطالب غیرضروری به درس و ارزشیابی از آنها اجتناب نمایند.

### قدردانی

گروه فیزیک لازم می‌داند از دبیرخانه راهبردی فیزیک، اتحادیه انجمن‌های علمی آموزشی معلمان فیزیک ایران و انجمن‌های استان‌ها، کارگروه معلمان فیزیک و همکارانی که به‌طور مستقل در اعتبارسنجی این کتاب با ما همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی کند.



## الکتریسیته ساکن



صفحه‌های لمسی، امروزه کاربردی گسترده در زندگی روزمره پیدا کرده‌اند، از صفحه‌های رایانه گرفته تا گوشی‌های تلفن همراه و ابزارهای پزشکی و صنعتی. این صفحه‌ها به روش‌های مختلفی عمل می‌کنند که یکی از متداول‌ترین آنها مبتنی بر استفاده از فازن‌ها است. با تماس انگشت با یک صفحه لمسی، ظرفیت الکتریکی در آن محل عوض می‌شود که مدارهای الکترونیکی دستگاه می‌توانند آن تغییر را آشکار کنند.

از آذرخش گرفته (شکل ۱-۱) تا درخشش لامپی کوچک، از آنچه اتم‌ها را به شکل مولکول به هم پیوند می‌دهد، تا پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب (شکل ۱-۲)، و همچنین بسیاری از پدیده‌های دیگر مانند قابلیت چسبیدن نوار سلوفان بر ظروف و حتی بالا رفتن یک مارمولک از دیوار و بسیاری از وسیله‌های اطراف ما، همگی منشأ الکتریکی دارند. مبانی فیزیکی مرتبط با این پدیده‌ها نخستین بار مورد توجه فیلسوفان یونان قدیم قرار گرفت که دریافتند اگر قطعه‌ای از کهربا با پارچه پشمی مالش داده شود و سپس به خرده‌های کاه نزدیک گردد، آن خرده‌ها به سوی کهربا کشیده می‌شوند. امروز می‌دانیم این کشش ناشی از یک نیروی الکتریکی است. در واقع واژه الکتریسیته از واژه یونانی **الکترون** گرفته شده است که به معنای کهرباست.



شکل ۱-۱ توصیف آذرخش مبتنی بر اصول الکتریسیته ساکن است.

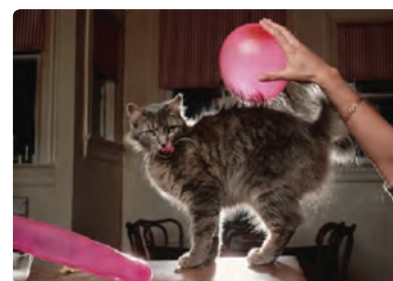
وقتی لباس‌های بافتنی را از تن خارج می‌کنیم، یا پس از اینکه چند قدم بر روی فرش راه می‌رویم، دستگیره فلزی در را با دست بگیریم، عملاً وجود الکتریسیته را به صورت یک شوک الکتریکی حس می‌کنیم. در این فصل، به مطالعه بارهای ساکن می‌پردازیم که به آن **الکتریسیته ساکن** (الکتروستاتیک) می‌گویند و ضمن یادآوری مطالب الکتریسیته دوره اول متوسطه، به جزئیات دقیق‌تری از چگونگی ایجاد بار الکتریکی در یک جسم، عوامل مؤثر بر نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی ذره‌ای، میدان الکتریکی، انرژی پتانسیل الکتریکی و اختلاف پتانسیل الکتریکی، توزیع بار در یک جسم رسانا و کاربرد خازن‌ها می‌پردازیم.



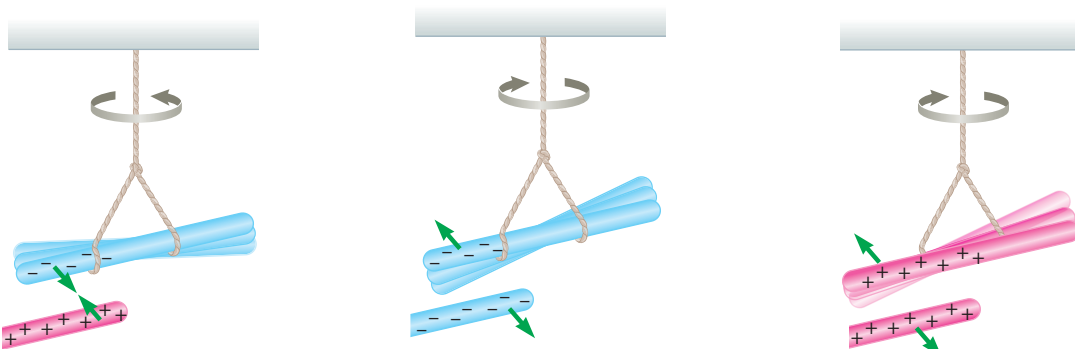
شکل ۱-۲ انتقال پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب به صورت الکتریکی صورت می‌گیرد.

## ۱-۱ بار الکتریکی

در کتاب علوم تجربی پایه هشتم دیدید که معمولاً وقتی دو جسم با یکدیگر مالش داده می‌شوند، هر دوی آنها دارای بار الکتریکی می‌شوند (شکل ۱-۳) و بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند (شکل ۱-۴). از این تجربه‌ها نتیجه گرفتیم که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد. این دو نوع بار الکتریکی توسط دانشمند آمریکایی بنیامین فرانکلین، بار مثبت و بار منفی نام‌گذاری شد. او می‌توانست آنها را هر چیز دیگری نیز بنامد، اما استفاده از علامت‌های جبری به جای نام‌های دیگر این مزیت را دارد که وقتی در یک جسم از این دو نوع بار به مقدار مساوی وجود داشته باشد، جمع جبری بارهای جسم صفر می‌شود که به معنای خنثی بودن آن جسم است.



شکل ۱-۳ مالش بادکنک به بدن گربه سبب ایجاد بار الکتریکی در آنها و در نتیجه برافراشته شدن موهای گربه می‌شود.

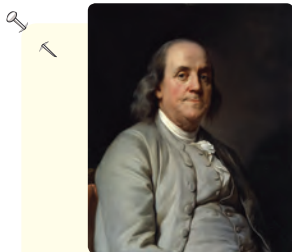


پ) وقتی میله پلاستیکی مالش داده شده با پارچه پشمی را به میله شیشه‌ای مالش داده شده با پارچه ابریشمی نزدیک کنیم، همدیگر را جذب می‌کنند.

ب) وقتی دو میله پلاستیکی را با پارچه پشمی مالش دهیم، همدیگر را دفع می‌کنند.

الف) وقتی دو میله شیشه‌ای را با پارچه ابریشمی مالش دهیم، همدیگر را دفع می‌کنند.

شکل ۱-۴



### بنیامین فرانکلین (۱۷۹۰ - ۱۷۰۶م)

بنیامین فرانکلین دانشمند، نویسنده و سیاستمدار آمریکایی، در شهر بوستون به دنیا آمد و در شهر فیلادلفیا دیده از جهان فرویست. فرانکلین در حدود سال ۱۷۴۴ میلادی با مبحث الکتروسیسته آشنا شد و عمده کشفیات مهم و بزرگ خویش را در بین سال‌های ۱۷۳۷ و ۱۷۵۱ به انجام رسانید و به شهرت علمی بی‌سابقه‌ای رسید. جالب است که او برخلاف سایر دانشمندان بزرگ، پس از چهل سالگی کارهای علمی اساسی خود را آغاز کرد. مهم‌ترین اثر فرانکلین، کتاب «در باب الکتروسیسته» است که بسیاری آن را با کتاب «اصول ریاضیات» اسحاق نیوتون مقایسه کرده‌اند. فرانکلین در این کتاب شالوده و بنیاد اصول علم الکتروسیسته را بر مبنای تجربیات و مشاهدات علمی خود تشریح کرده است. در واقع تجربیات متعدد و مهم فرانکلین آغازگر دوره‌ای جدید در مبحث الکتروسیسته بوده است و بسیاری از واژگانی که ما امروزه در الکتروسیسته به کار می‌گیریم نخستین بار توسط فرانکلین به کار برده شده است. توانایی و مهارت فرانکلین در انجام آزمایش و بیان واضح وی از مفاهیم فیزیکی و بالاخره کشفیات مهم او موجب ارج و قرب علوم تجربی در قرن هجدهم شد.

نوع باری که دو جسم مختلف بر اثر مالش پیدا می‌کنند، به جنس آنها بستگی دارد. همان‌طور که در کتاب علوم تجربی پایه هشتم خود دیدید باردار بودن یک جسم و نوع بار آن را می‌توانیم با الکتروسکوپ (برق‌نما) تعیین کنیم (شکل ۱-۵).



ب) جسمی باردار را به کلاهک الکتروسکوپ بدون بار نزدیک کرده یا تماس داده ایم.



الف) تصویری از یک الکتروسکوپ درجه‌بندی‌شده بدون بار

### شکل ۱-۵

یکای بار الکتریکی در SI، کولُن (C) است. توجه کنید یک کولُن مقدار بار بزرگی است؛ مثلاً در یک آذرخش نوعی، باری از مرتبه  $10^6$  به زمین منتقل می‌شود و از این رو، در این فصل غالباً با بارهایی از مرتبه میکروکولُن ( $\mu\text{C}$ ) و نانو کولُن (nC) سروکار داریم؛ به عنوان مثال، در مالش شانه پلاستیکی با موهای سر، بارهای منتقل شده از مرتبه نانو کولُن (nC) است.

### پرسش ۱-۱

چرا وقتی روکش پلاستیکی را روی یک ظرف غذا می‌کشید و آن را در لبه‌های ظرف فشار می‌دهید، روکش در جای خود ثابت باقی می‌ماند؟

### ۱-۲ پایستگی و کوانتیده بودن بار الکتریکی

در یک اتم خنثی، تعداد الکترون‌ها برابر با تعداد پروتون‌های هسته است. بنابراین، جمع جبری همه بارها (بار خالص) دقیقاً برابر با صفر است. در تجربه‌هایی مانند مالش اجسام به یکدیگر، الکترون‌ها تولید نمی‌شوند و یا از بین نمی‌روند، بلکه صرفاً از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شوند. اندازه بار منفی الکترون دقیقاً برابر با اندازه بار مثبت پروتون است. این مقدار را بار بنیادی (با نماد  $e$ ) می‌گویند که برابر است با

$$e = 1/602117653 \times 10^{-19} \text{C} \approx 1/60 \times 10^{-19} \text{C}$$

۱- اندازه‌گیری بار الکترون نخستین بار توسط رابرت میلیکان در سال ۱۹۱۳ میلادی انجام شد. این نتیجه اندازه‌گیری مربوط به سال ۲۰۰۵ میلادی است.

در هنگام مالش، با انتقال تعدادی الکترون از یک جسم به جسمی دیگر، تعادل بارها در اتم خنثی بر هم می خورد و جسمی که الکترون از دست می دهد، تعداد الکترون هایش کمتر از تعداد پروتون های آن می شود و بار الکتریکی خالص آن مثبت می گردد و همچنین، جسمی که الکترون اضافی دریافت می کند، الکترون هایش از پروتون های آن فزونی می یابد و بار الکتریکی خالص آن منفی می شود. به دست آوردن یا از دست دادن الکترون دو جسم در تماس با یکدیگر را می توان براساس جدولی موسوم به **سری الکتریسیته مالشی** (تریبو الکتریک؛ Tribo در زبان یونانی به معنای مالش است) معلوم کرد (جدول ۱-۱). در این جدول مواد پایین تر، الکترون خواهی بیشتری دارند؛ یعنی اگر دو ماده در این جدول در تماس با یکدیگر قرار گیرند، الکترون ها از ماده بالاتر جدول به ماده ای که پایین تر قرار دارد منتقل می شوند؛ مثلاً اگر تفلون با نایلون مالش یابد، الکترون ها از نایلون به تفلون منتقل می شوند. در مورد بارهای الکتریکی دو اصل وجود دارد. نخستین آنها **اصل پایداری بار** است که بیان می دارد: مجموع جبری همه بارهای الکتریکی در یک دستگاه منزوی<sup>۲</sup> ثابت است؛ یعنی بار می تواند از جسمی به جسم دیگر منتقل شود، ولی هرگز امکان تولید یا نابودی یک بار خالص وجود ندارد. تاکنون هیچ آزمایشی این اصل را نقض نکرده است.

دومین اصل، **کوانتیده بودن بار** است. در تجربه هایی مانند مالش اجسام به یکدیگر اگر جسم خنثی الکترون به دست آورد یا از دست بدهد، همواره بار الکتریکی مشاهده شده جسم، مضرب درستی از بار بنیادی  $e$  است:

$$q = \pm ne, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1-1)$$

یک مثال آشنا از کوانتیده بودن یک کمیت، تعداد دانش آموزان یک کلاس یا تعداد تخم مرغ های درون یک ظرف است. برای مثال، ما نمی توانیم  $24/3$  دانش آموز در یک کلاس و یا  $12/4$  تخم مرغ در یک ظرف داشته باشیم.

جدول ۱-۱ سری الکتریسیته مالشی (تریبو الکتریک)<sup>۱</sup>

انتهای مثبت سری

موی انسان

شیشه

نایلون

پشم

موی گربه

سُرب

ابریشم

آلومینیم

پوست انسان

کاغذ

چوب

پارچه کتان

کهربا

برنج، نقره

پلاستیک، پلی اتیلن

لاستیک

تفلون

انتهای منفی سری

### مثال ۱-۱

وقتی روی فرش راه می روید و بدنتان بار الکتریکی پیدا می کند، هنگام دست دادن با دوستان، ممکن است با انتقال باری در حدود  $1 \text{ nC}$  به او شوک خفیفی وارد کنید. در این انتقال بار، حدود چند الکترون بین شما و دوستان منتقل شده است؟ **پاسخ:** از رابطه ۱-۱ داریم:

$$q = ne$$

$$n = \frac{q}{e} = \frac{1 \times 10^{-9} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6 \times 10^9 \text{ الکترون}$$

### تمرین ۱-۱

عدد اتمی اورانیوم  $Z = 92$  است. بار الکتریکی هسته اتم اورانیوم چقدر است؟ مجموع بار الکتریکی الکترون های اتم اورانیوم (خنثی) چه مقدار است؟ بار الکتریکی اتم اورانیوم (خنثی) چقدر است؟

۲- منظور از دستگاه منزوی در اینجا دستگاهی است که نه از محیط اطراف خود بار بگیرد و نه به آن بار بدهد.

۱- نیازی به حفظ این جدول نیست.

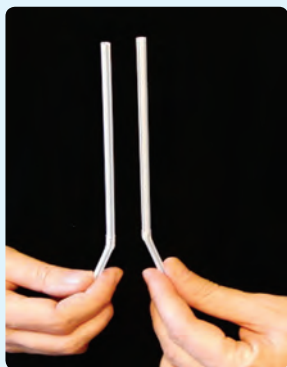
## ۳-۱ قانون کولن

همان طور که می دانیم نیروی الکتریکی که دو جسم باردار برهم وارد می کنند می تواند جاذبه یا دافعه باشد. اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، این نیرو دافعه است (شکل ۶-۱). و اگر ناهمنام باشند، این نیرو جاذبه است.



شکل ۶-۱ گوی های باردار همنام یکدیگر را با نیرویی هم اندازه دفع کرده اند.

## فعالیت ۱-۱ (کار در کلاس)



مطابق شکل، دو نی پلاستیکی را از نزدیکی یک انتهای آنها خم کنید و پس از مالش دادن با پارچه ای پشمی نزدیک یکدیگر قرار دهید. اگر نی ها به خوبی باردار شده باشند، نیروی دافعه آنها را می توانید به وضوح بر روی انگشتان خود حس کنید.

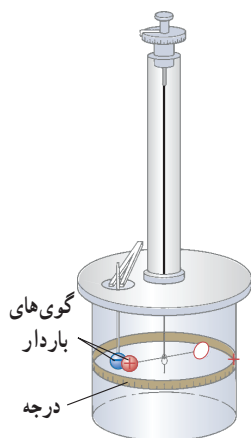
نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار، به چه عامل هایی بستگی دارد و اندازه این نیروها را از چه رابطه ای می توان محاسبه کرد؟ شارل آگوستین کولن، دانشمند فرانسوی برای نخستین بار با انجام آزمایش های ساده و هوشمندانه ای توانست عامل های مؤثر بر نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار را که اصطلاحاً بار نقطه ای خوانده می شود، شناسایی کند. نتیجه آزمایش های او امروزه به نام **قانون کولن** خوانده می شود. شکل ۷-۱ طرحی از آزمایش کولن را نشان می دهد.

قانون کولن بیان می دارد:

اندازه نیروی الکتریکی (الکتروستاتیکی) بین دو بار نقطه ای<sup>۱</sup> که در راستای خط واصل آنها اثر می کند، با حاصل ضرب بزرگی آنها متناسب است و با مربع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد. بنابراین، اندازه این نیرو برابر است با

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (۲-۱)$$

شکل ۷-۱ ترازوی پیچشی کولن. در یک سر یک میله نارسانای سبک افقی یک گوی باردار مثبت کوچک و در سر دیگر آن، یک قرص قرار دارد و میله از وسط توسط یک رشته سیم کنسان و نازک آویخته شده است. یک گوی با بار منفی از حفره ای به داخل استوانه شیشه ای برده می شود. درجه هایی بر سطح استوانه حک شده است که زاویه چرخش میله را نشان می دهد. نیروی مؤثر بین این بارها از اندازه گیری زاویه چرخش تا رسیدن به حالت تعادل به دست می آید.



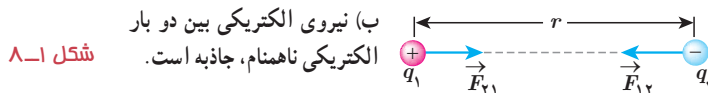
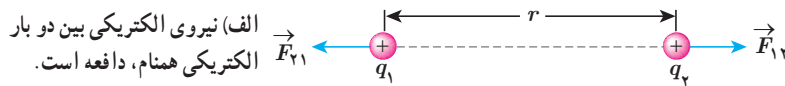
۱- در این بخش با نیروهای بین ذره های باردار (بارهای نقطه ای) سر و کار داریم. البته اگر فاصله یک جسم باردار با جسم دیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هر یک از دو جسم در مقایسه با فاصله بین آنها چشم پوشی کرد، می توان دو جسم را به صورت ذره های باردار در نظر گرفت.

که در آن  $q_1$  و  $q_2$  بارهای الکتریکی دو بار نقطه‌ای برحسب کولن (C)،  $r$  فاصله بین دو بار برحسب متر (m)، و  $F$  بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر هر بار برحسب نیوتون (N) است. در این رابطه  $k$  ثابت الکتروستاتیکی یا ثابت کولن نام دارد و برابر است با<sup>۱</sup>

$$k = 8/98955179 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2 \approx 9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$$

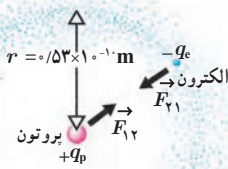
در شکل ۱-۸،  $\vec{F}_{12}$  نیرویی است که بار نقطه‌ای  $q_1$  به بار نقطه‌ای  $q_2$  وارد می‌کند و  $\vec{F}_{21}$  نیرویی است که بار نقطه‌ای  $q_2$  به بار نقطه‌ای  $q_1$  وارد می‌کند. این دو نیروی الکتریکی (بنا به قانون سوم نیوتون) هم اندازه، هم راستا، و در خلاف جهت همدیگرند. به عبارتی:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$



شکل ۱-۸

### مثال ۱-۲



الف) در مدل بور برای اتم هیدروژن، فاصله الکترون از پروتون هسته در حالت پایه  $m \times 5/3 \times 10^{-11}$  است (شکل را ببینید). اندازه نیروی الکتریکی که پروتون به الکترون وارد می‌کند را محاسبه کنید.

ب) در هسته اتم هلیم دو پروتون به فاصله تقریبی  $m \times 2/4 \times 10^{-15}$  از هم قرار دارند. اندازه نیرویی که پروتون‌ها بر هم وارد می‌کنند را محاسبه کنید.

### پاسخ:

الف) با استفاده از قانون کولن برای بزرگی نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار داریم:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = k \frac{|q_e||q_p|}{r^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2) \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5/3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 8/2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

ب) با استفاده از قانون کولن داریم:

$$F = k \frac{|q_p||q_p|}{r^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2) \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(2/4 \times 10^{-15} \text{ m})^2} = 40 \text{ N}$$

که این به مراتب بزرگ‌تر از نیروی محاسبه‌شده در قسمت الف است. این نیروی بزرگ، از جنس دافعه است. بنابراین، هسته اتم باید فرو بیاشد. از اینجا نتیجه می‌گیریم که باید نیروی دیگری وجود داشته باشد که مانع فروپاشی هسته شود. به این نیرو، نیروی هسته‌ای گفته می‌شود.



شارل آگوستین کولن (۱۸۰۶ - ۱۷۳۶م)

شارل آگوستین کولن در فرانسه به دنیا آمد. او در دانشگاه مباحث متنوعی از قبیل فلسفه، ریاضیات، نجوم و شیمی را آموخت، و در طی دوازده سال پس از فارغ‌التحصیلی شغل‌های متنوعی در شاخه‌های مختلف مهندسی داشت و مدتی را نیز خارج از فرانسه گذراند. کولن پس از بازگشت به پاریس در سال ۱۷۸۵ میلادی تقریباً هم‌زمان با بنیامین فرانکلین آزمایش معروف خود را در مورد اینکه نیروی بین دو بار دزدای با مربع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد، به جاب رساند. نتیجه این آزمایش که به قانون کولن معروف شده است از هر آزمون و تجربه‌ای سر بلند بیرون آمده است و تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافت نشده است. کولن معتقد بود چنین قانونی برای قطب‌های مغناطیسی نیز برقرار است، گرچه هیچ‌وقت نتوانست به چنین رابطه‌ای برسد. نام کولن یکی از ۲۲ نامی است که روی برج ایفل ثبت شده است.

ثابت کولن ( $k$ ) را می‌توان برحسب یک ضرب ثابت دیگر به نام ضرب گذردهی الکتریکی خالص ( $\epsilon$ ) نیز نوشت:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

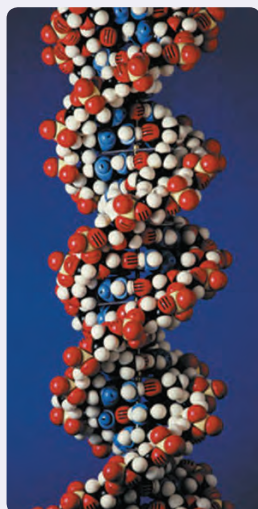
که در آن

$$\epsilon = 8/85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N.m}^2$$

۱- به ذهن سپردن این اعداد لازم نیست.

تمامی اجسام به علت جرمشان بر یکدیگر نیروی گرانشی نیز وارد می‌کنند که همواره از نوع جاذبه است. بزرگی این نیرو برای الکترون و پروتون اتم هیدروژن از مرتبه  $10^{-47}$  N است. بنابراین، در حدود  $10^4$  بار کوچک‌تر از نیروی الکتریکی بین این دو ذره است و این نشان می‌دهد نیروی گرانشی به مراتب ضعیف‌تر از نیروی الکتریکی است.

## خوب است بدانید: DNA



اطلاعات ژنتیکی در مولکول‌های خاصی به نام دنا (DNA) وجود دارد. در واقع دنا دارای اطلاعات و دستورهای برای تعیین و ایجاد صفات ارثی ما و همه جانداران است. در مولکول‌های دنا چهار نوع باز به نام‌های آدنین (A)، سیتوزین (C)، گوانین (G) و تیمین (T) وجود دارد. دنا مولکولی دورشته‌ای است که به صورت مارپیچ دوگانه پیچیده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است این دو رشته توسط نیروهای الکتریکی به یکدیگر پیوند خورده‌اند؛ مثلاً در شکل می‌بینیم که همواره آدنین و تیمین در دو طرف رشته و مقابل هم قرار دارند. به همین ترتیب G و C نیز در دو طرف رشته و مقابل هم قرار دارند.

بارهای مثبت در یک طرف رشته و بارهای منفی در طرف

دیگر، دو رشته را به هم زب می‌کنند. این جاذبه آن قدر هست که رشته‌ها از هم نگسلند، اما به حد کافی ضعیف نیز هست تا در فرایند رونویسی از هم گسیخته گردد.

برایند نیروهای الکتریکی: اگر به جای دو ذره باردار، تعدادی بار نقطه‌ای داشته

باشیم، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برایند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر به تنهایی بر آن ذره وارد می‌کند.

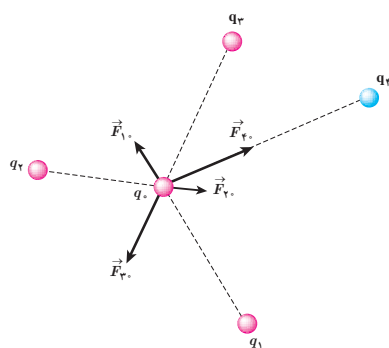
فرض کنید  $n$  ذره باردار داشته باشیم که در نزدیکی بار نقطه‌ای  $q$  قرار دارند. آن‌گاه

نیروی خالص (برایند) وارد بر بار نقطه‌ای  $q$  با جمع برداری زیر داده می‌شود:

$$\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

شکل ۱-۹ نیروی وارد بر بار  $q$  از سوی چهار بار دیگر را نشان می‌دهد.

در این کتاب، مثال‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها نیروهای الکتریکی وارد بر یک ذره باردار در یک راستا قرار دارند یا عمود بر یکدیگرند<sup>۱</sup>.



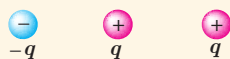
شکل ۱-۹ نیروی برایند وارد بر بار  $q$  در اینجا برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$$

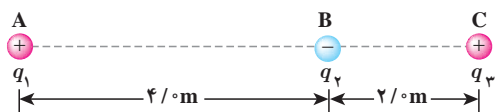
۱- بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا و یا عمود بر هم نیستند، خارج از برنامه درسی این کتاب بوده و نباید مورد ارزشیابی قرار

## پرسش ۱-۲

سه ذره باردار مانند شکل روبه‌رو، روی یک خط راست قرار دارند و فاصله بارهای سمت راست و چپ از بار میانی برابر است. الف) جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار الکتریکی میانی را تعیین کنید. ب) اگر ذره سمت راست به جای  $q$ ، بار  $-q$  داشته باشد، جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار میانی چگونه خواهد بود؟



## مثال ۱-۳



سه ذره با بارهای  $q_1 = +2/5 \mu\text{C}$ ،  $q_2 = -1/10 \mu\text{C}$  و  $q_3 = +4/10 \mu\text{C}$  در نقطه‌های A، B و C مطابق شکل روبه‌رو ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار  $q_2$  را محاسبه کنید.

**پاسخ:** نیروی الکتریکی خالصی که بر بار  $q_2$  وارد می‌شود، برآیند دو نیرویی است که از طرف بارهای  $q_1$  و  $q_3$  بر آن وارد می‌شوند. برای محاسبه این نیرو، نیرویی را که هر یک از بارهای  $q_1$  و  $q_3$  در نبود دیگری، بر بار  $q_2$  وارد می‌کند، محاسبه می‌کنیم. نیروی الکتریکی وارد بر  $q_2$ ، برآیند این دو نیرو است.

فاصله بین بارهای  $q_1$  و  $q_2$  را با  $r_{12}$  و فاصله بین بارهای  $q_2$  و  $q_3$  را با  $r_{23}$  نشان می‌دهیم. با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

$$F_{12} = k \frac{|q_1||q_2|}{r_{12}^2} = (9/10 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/5 \times 10^{-6} \text{ C})(1/10 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4/10 \text{ m})^2}$$

$$= 2/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

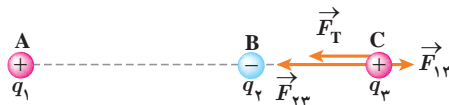
$$F_{23} = k \frac{|q_2||q_3|}{r_{23}^2} = (9/10 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/10 \times 10^{-6} \text{ C})(4/10 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2/10 \text{ m})^2}$$

$$= 9/10 \times 10^{-3} \text{ N}$$

نیرویی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند، دافعه و نیرویی که بار  $q_3$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند جاذبه است.

مطابق شکل، نیروهای  $\vec{F}_{12}$  و  $\vec{F}_{23}$  در جهت‌های مخالف یکدیگرند و برآیند آنها برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{23} + \vec{F}_{12}$$



بنابراین، اندازه نیروی برآیند برابر با تفاضل اندازه آنهاست:

$$F_T = F_{23} - F_{12} = 6/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

و جهت آن در جهت نیروی بزرگ‌تر ( $\vec{F}_{23}$ )، یعنی از سمت راست به طرف چپ، است. اگر محور  $x$  را روی خط واصل سه بار و جهت مثبت آن را به سمت راست در نظر بگیریم و بردار یکه محور  $x$  را،  $\vec{i}$  بنامیم، داریم:

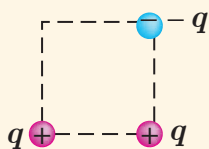
$$\vec{F}_T = (-6/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$



تمرین ۱-۲

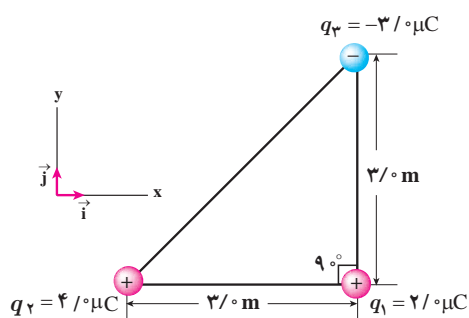
در مثال ۱-۳، نیروی خالص وارد بر بار  $q_2$  را به دست آورید.

پرسش ۱-۳



سه ذره باردار مطابق شکل روبه‌رو، در سه گوشه یک مربع قرار دارند. الف) جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار سمت راست پایینی را تعیین کنید. ب) اگر ذره سمت چپ پایینی به جای  $q$ ، بار  $-q$  داشته باشد، جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار سمت راست پایینی چگونه خواهد بود؟

مثال ۱-۴



سه ذره باردار مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ای ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی خالص وارد بر ذره واقع در رأس قائمه را به دست آورده و اندازه این نیرو را محاسبه کنید. پاسخ: نیروی الکتریکی بین بارهای  $q_1$  و  $q_2$  دافعه و نیروی بین بارهای  $q_1$  و  $q_3$  جاذبه است. با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

$$F_{21} = k \frac{|q_2||q_1|}{r_{21}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 8 \times 10^{-2} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده،  $\vec{F}_{21}$  در جهت مثبت محور  $x$  است. بنابراین،  $\vec{F}_{21} = (8 \times 10^{-2} \text{ N}) \vec{i}$  می‌شود. به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای  $q_1$  و  $q_3$  داریم:

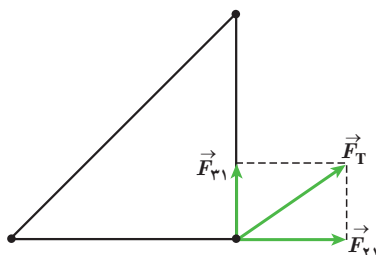
$$F_{31} = k \frac{|q_3||q_1|}{r_{31}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(3 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 6 \times 10^{-2} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده،  $\vec{F}_{31}$  در جهت مثبت محور  $y$  است. بنابراین،  $\vec{F}_{31} = (6 \times 10^{-2} \text{ N}) \vec{j}$  می‌شود. پس برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر بار  $q_1$  برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} = (8 \times 10^{-2} \text{ N}) \vec{i} + (6 \times 10^{-2} \text{ N}) \vec{j}$$

و بزرگی آن با استفاده از رابطه فیثاغورس، چنین به دست می‌آید:

$$F_T = \sqrt{F_{21}^2 + F_{31}^2} = \sqrt{(8 \times 10^{-2} \text{ N})^2 + (6 \times 10^{-2} \text{ N})^2} = 1 \times 10^{-1} \text{ N}$$

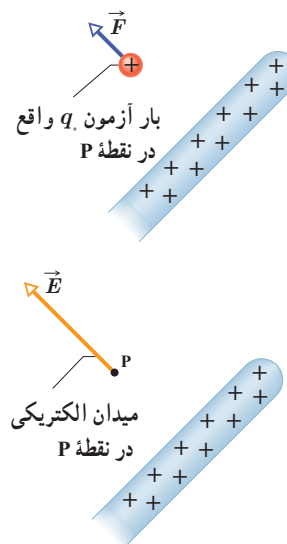


## تمرین ۱-۳

در مثال ۱-۴ الف) اگر علامت بار  $q_2$  تغییر کند جهت نیروی برآیند وارد بر بار  $q_1$  چگونه خواهد شد؟  
 ب) اگر علامت بار  $q_2$  تغییر نکند، جهت نیروی برآیند وارد بر بار  $q_1$  چگونه خواهد شد؟  
 پ) آیا اندازه نیروی برآیند وارد بر بار  $q_1$  در قسمت‌های الف و ب با مقدار به دست آمده در مثال ۱-۴ متفاوت است؟

## ۴-۱ میدان الکتریکی

در بخش ۱-۱ دیدیم که دو بار الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار دارند، برهم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. ولی این پرسش مطرح می‌شود که بارهای  $q_1$  و  $q_2$  چگونه حضور یکدیگر را حس می‌کنند؟ به عبارت دیگر، این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می‌توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ در فیزیک پاسخ این پرسش این گونه است که بار  $q_1$  خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می‌کند که به آن اصطلاحاً **میدان الکتریکی** بار  $q_1$  گفته می‌شود. وقتی بار  $q_2$  را در نقطه‌ای از فضای پیرامون بار  $q_1$  قرار دهیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی‌ای قرار می‌گیرد که بار  $q_1$  پیش‌تر در آن نقطه ایجاد کرده است. بنابراین، بار  $q_1$ ، نه با تماس با بار  $q_2$  بلکه به وسیله میدان الکتریکی خودش بر بار  $q_2$  نیرو وارد می‌کند. میدان الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف یک جسم باردار الکتریکی به صورت زیر تعیین می‌شود: نخست بار کوچک و مثبت  $q_0$  موسوم به **بار آزمون** را در آن نقطه قرار می‌دهیم و سپس نیروی الکتریکی  $\vec{F}$  وارد بر آن را اندازه می‌گیریم. آن‌گاه میدان الکتریکی  $\vec{E}$  ناشی از جسم باردار در آن نقطه به صورت



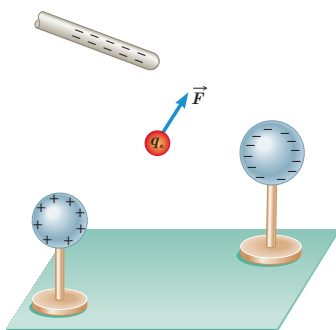
**شکل ۱-۱۰** میله باردار میدانی الکتریکی زیر تعریف می‌شود: ایجاد می‌کند و به وسیله این میدان بر بار آزمون نیرو وارد می‌کند.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

(۳-۱)

بنا به تعریف میدان الکتریکی (رابطه ۳-۱)، میدان الکتریکی کمیتی برداری است که اندازه آن برابر  $E = \frac{F}{q_0}$  و جهت آن همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون است؛ مثلاً شکل ۱-۱۰ قسمتی از میله باردار را نشان می‌دهد که بر بار آزمون واقع در نقطه P نیرو وارد می‌کند. پس میدان در این نقطه، براساس این نیرو تعریف می‌شود. در رابطه ۳-۱ یکای میدان الکتریکی ( $\vec{E}$ )، نیوتون بر کولن (N/C) است.

## مثال ۱-۵



بار آزمون نشان داده شده در شکل  $q = +3/0 \times 10^{-8} \text{ C}$  است و از سوی دو گوی و یک میله باردار نیرویی برابر با  $F = 6/0 \times 10^{-5} \text{ N}$  در جهت نشان داده شده بر آن وارد می‌شود.

الف) میدان الکتریکی در محل بار آزمون را تعیین کنید.

ب) اگر بار  $12 \times 10^{-8} \text{ C}$  را به جای  $q$  قرار دهیم، چه نیرویی به آن وارد می‌شود؟

۱- بار آزمون باید آن قدر کوچک باشد که توزیع بار جسم را برهم نزند.

**پاسخ:** الف) بزرگی میدان الکتریکی با استفاده از رابطه ۱-۳ برابر است با

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{6/0 \times 10^{-5} \text{ N}}{3/0 \times 10^{-8} \text{ C}} = 2/0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

که جهت آن در همان سوی نیروی  $\vec{F}$  نشان داده شده در شکل است.

ب) دوباره با استفاده از رابطه ۱-۳ داریم:

$$F = q_0 E = (12 \times 10^{-8} \text{ C})(2/0 \times 10^3 \text{ N/C}) = 24 \times 10^{-5} \text{ N}$$

جهت این نیرو نیز در همان سوی نیروی  $\vec{F}$  نشان داده شده در شکل است.

### خوب است بدانید: میدان الکتریکی مخازن نفت کش‌ها

وقتی آب به سطحی برخورد کند و از آن بپاشد، قطره‌های آب باردار می‌شوند. معمولاً قطره‌های بزرگ‌تر، دارای بار مثبت و قطره‌های کوچک‌تر، دارای بار منفی می‌شوند. قطره‌های بزرگ‌تر نسبتاً سریع فرو می‌افتند و قطره‌های کوچک‌تر که دارای بار منفی اند بیشتر در هوا می‌مانند. اگر تهویه هوا کم باشد، تعداد قطره‌های موجود در هوا به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و بدین ترتیب، یک میدان الکتریکی بزرگ (حدود  $10^5 \text{ N/C}$ ) ایجاد می‌شود؛ این وضعیتی است که معمولاً در حمام رخ می‌دهد. به همین ترتیب، در حین تمیزکردن مخازن کشتی‌های نفت کش، وقتی قطره‌های آب به صورت افشانه از شیلنگ خارج شده و بر کف مخزن یا دیواره‌های آن می‌پاشند، باردار می‌شوند و در نتیجه مخزن پر از بخار آب باردار می‌شود. ممکن است این ذرات باردار با نوک فلزی آب‌فشان شیلنگ جرقه بزنند. اگر مخزن محتوی بخار نفت خام باشد، این جرقه‌ها می‌توانند بخار را مشتعل کنند و باعث انفجار مخزن گردند. برای رفع این خطر، پیش از تمیزکردن مخزن، یک گاز بی‌اثر به درون آن پمپ می‌شود تا اکسیژن موجود به اندازه‌ای کاهش یابد که از بروز انفجار جلوگیری کند.

### ۵-۱ میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار

می‌خواهیم میدان الکتریکی ناشی از ذره‌ای با بار  $q$  را در نقطه  $A$  که به فاصله  $r$  از بار  $q$  قرار دارد (شکل ۱-۱۱)، محاسبه کنیم. برای این محاسبه از رابطه ۱-۳ استفاده می‌کنیم. اگر بار آزمون  $q_0$  در نقطه  $A$  قرار گیرد، بار  $q$  به آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌کند. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی  $\vec{F}$  را محاسبه می‌کنیم و با جای‌گذاری در رابطه  $E = F/q_0$ ، بزرگی میدان الکتریکی بار  $q$  را در نقطه  $A$  به دست می‌آوریم:

$$F = k \frac{|q|q_0}{r^2} \quad \text{و} \quad E = \frac{F}{q_0}$$

در نتیجه:

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad (4-1)$$

رابطه ۱-۴ عامل‌های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از ذره‌ای با بار  $q$  را مشخص می‌کند. طبق این رابطه، میدان با اندازه بار  $q$ ، نسبت مستقیم و با مربع فاصله از آن، نسبت وارون دارد. همان‌طور که پیش‌تر دیدیم جهت بردار میدان الکتریکی  $\vec{E}$  در نقطه  $A$ ، همان جهت نیروی وارد بر بار آزمونی است که به‌طور فرضی در نقطه  $A$  می‌گذاریم.



شکل ۱-۱۱ می‌خواهیم میدان حاصل از ذره باردار  $q$  را در نقطه  $A$  محاسبه کنیم.

## مثال ۱-۶



مولد وان دوگراف<sup>۱</sup> وسیله‌ای است که با استفاده از تسمه‌ای متحرک، بار الکتریکی را بروی یک کلاهک توخالی فلزی جمع می‌کند. فرض کنید کلاهک این مولد، کره‌ای با شعاع  $0.1\text{ m}$  است و باری به بزرگی  $1\text{ }\mu\text{C}$  روی آن جمع می‌شود. با فرض آنکه همهٔ این بار در مرکز کره قرار داشته باشد، بزرگی میدان الکتریکی این بار را در فاصله‌های  $0.1\text{ m}$ ،  $0.2\text{ m}$ ،  $0.3\text{ m}$  و  $0.4\text{ m}$  از مرکز کره به دست آورید و سپس با نقطه‌یابی، نمودار بزرگی میدان الکتریکی را برحسب فاصله از مرکز کره رسم کنید.

**پاسخ:** با استفاده از رابطهٔ ۱-۴ بزرگی میدان را در نقطه‌های مورد نظر به دست می‌آوریم:

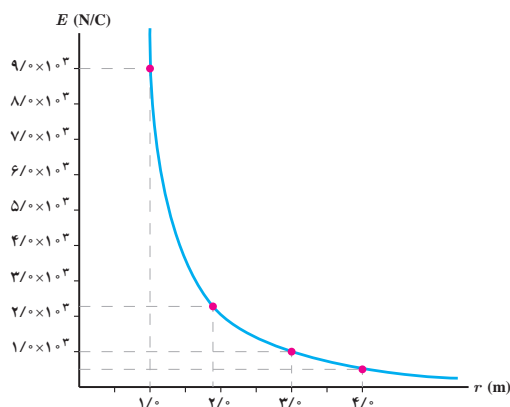
$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

$$E_1 = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.1 \text{ m})^2} = 9/0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.2 \text{ m})^2} = 2/25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2/3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

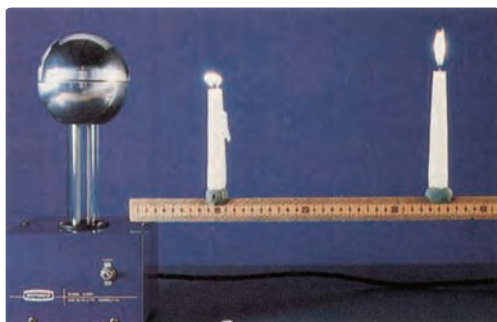
$$E_3 = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.3 \text{ m})^2} = 1/0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_4 = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.4 \text{ m})^2} = 0/5625 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 0/56 \times 10^3 \text{ N/C}$$



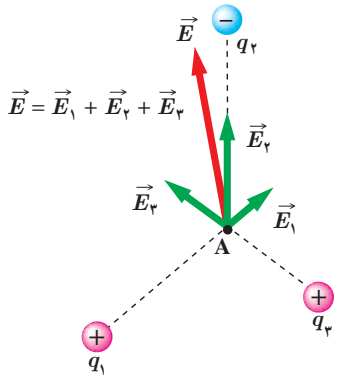
با استفاده از این نتایج نمودار  $E$  برحسب  $r$ ، مانند نمودار روبه‌رو خواهد شد.

برای مشاهدهٔ تجربی نتایج مثال ۱-۶ می‌توان به آزمایش شکل زیر توجه کرد. در این شکل، دو شمع یکی در فاصله‌ای نزدیک و دیگری در فاصله‌ای دور از کلاهک یک مولد وان دوگراف قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید شعلهٔ شمع نزدیک‌تر به سمت کلاهک کشیده شده است، در حالی که شعلهٔ شمع دورتر تغییر چندانی نکرده است. دلیل، آن است که کلاهک مولد وان دوگراف بار منفی بزرگی دارد که یون‌های مثبت شعلهٔ شمع نزدیک‌تر را به سمت خود می‌کشد، در حالی که شمع دیگر در فاصلهٔ دوری از کلاهک قرار گرفته است که تحت تأثیر میدان الکتریکی ضعیف‌تری قرار می‌گیرد.



تمرین ۴-۱

طبق مدل بور برای اتم هیدروژن، در حالت پایه فاصله الکترون از پروتون هسته برابر با  $5/3 \times 10^{-11} \text{ m}$  است. الف) اندازه میدان الکتریکی ناشی از پروتون هسته را در این فاصله تعیین کنید. ب) در چه فاصله‌ای از پروتون هسته، بزرگی میدان الکتریکی برابر با بزرگی میدان الکتریکی حاصل از مولد وان دوگراف مثال پیش در فاصله  $1/0 \text{ m}$  از مرکز کلاهک آن است؟



برای یافتن میدان الکتریکی خالص حاصل از چند ذره باردار در نقطه‌ای از فضا باید نخست میدان الکتریکی ناشی از هر ذره را در آن نقطه به دست آورد و سپس این میدان‌ها را به صورت برداری با یکدیگر جمع کرد:

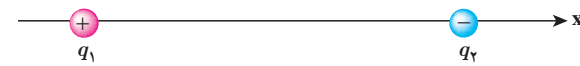
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (5-1)$$

مثلاً شکل ۱۲-۱ میدان الکتریکی خالص در نقطه A را نشان می‌دهد. در این کتاب، صرفاً مثال‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها میدان‌های الکتریکی در یک نقطه، در یک راستا قرار دارند یا عمود بر یکدیگرند<sup>۱</sup>.

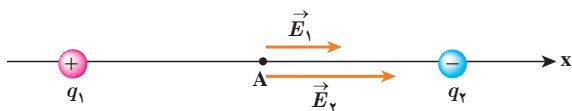
شکل ۱۲-۱ میدان الکتریکی  $\vec{E}$  در نقطه A، جمع برداری میدان‌های  $\vec{E}_1$ ،  $\vec{E}_2$  و  $\vec{E}_3$  در این نقطه است.

مثال ۷-۱

مطابق شکل، دو ذره با بارهای  $q_1 = 4/0 \mu\text{C}$  و  $q_2 = -6/0 \mu\text{C}$  در فاصله  $1 \text{ m}$  از یکدیگر ثابت شده‌اند. اندازه میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های زیر به دست آورید: الف) در وسط خط واصل دو ذره، ب) در نقطه‌ای روی خط واصل دو ذره به فاصله  $1/0 \text{ m}$  از  $q_1$  و  $1/6 \text{ m}$  از  $q_2$ .



**پاسخ:** در غیاب هر یک از دو ذره، میدان حاصل از بار دیگر را محاسبه می‌کنیم. میدان حاصل از مجموعه دو بار، بر این دو میدان خواهد بود.



الف) در شکل اگر بار آزمون را در نقطه A واقع در وسط خط واصل دو ذره قرار دهیم، بار  $q_1$  آن را دفع و بار  $q_2$  آن را جذب می‌کند. بنابراین، همان‌طور که شکل نشان می‌دهد،  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  در نقطه A هم جهت و به سوی بار  $q_2$  (در سوی مثبت محور x) هستند. میدان خالص در نقطه A، بر این دو میدان‌های  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  است:

$$\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = E_1 \vec{i} + E_2 \vec{i}$$

۱- بررسی حالت‌هایی که میدان‌ها هم‌راستا و یا عمود برهم نیستند، خارج از برنامه درسی این کتاب بوده و نباید مورد ارزشیابی قرار بگیرد.

مقادیر  $E_1$  و  $E_2$  را با استفاده از رابطه ۱-۴ به دست می‌آوریم:

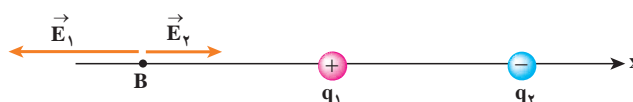
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4.0 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2.3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4.0 \text{ m})^2} = 3.375 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 3.4 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین:

$$\vec{E}_A \approx (2.3 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (3.4 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (5.7 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

ب) اکنون اگر بار آزمون را در نقطه B قرار دهیم شکل میدان‌های الکتریکی به صورت زیر در می‌آید:



میدان خالص در نقطه B، برآیند میدان‌های  $\vec{E}_1$  و  $\vec{E}_2$  است:

$$\vec{E}_B = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = -E_1 \vec{i} + E_2 \vec{i}$$

که در آن  $E_1$  و  $E_2$  برابرند با

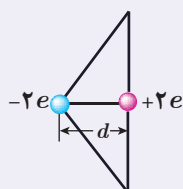
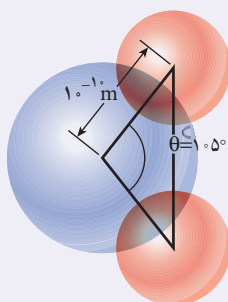
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(8.0 \text{ m})^2} = 5.625 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 5.6 \times 10^2 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(16 \text{ m})^2} = 2.109 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 2.1 \times 10^2 \text{ N/C}$$

بنابراین:

$$\vec{E}_B \approx (-5.6 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i} + (2.1 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i} = (-3.5 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i}$$

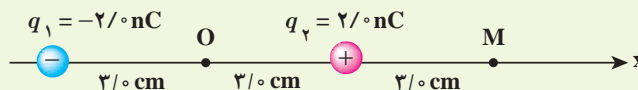
### خوب است بدانید



دوقطبی الکتریکی آرایشی از بارهای الکتریکی است که در آن دو ذره با بزرگی بار  $q$  ی یکسان و علامت مخالف در فاصله  $d$  از هم روی محوری که به آن محور دوقطبی گفته می‌شود قرار گرفته‌اند. مولکول آب ( $\text{H}_2\text{O}$ ) از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن ساخته شده است. اتم اکسیژن الکترون‌های دو اتم هیدروژن را به سمت خود می‌کشد و بدین ترتیب اتم‌های هیدروژن بار مثبت و خودش بار منفی پیدا می‌کند. این سه اتم مطابق شکل به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که خطوط وصل‌کننده مراکز اتم‌های هیدروژن به مرکز اتم اکسیژن، زاویه  $105^\circ$  با یکدیگر می‌سازند. با فرض اینکه کل بار مثبت ( $+2e$ ) دقیقاً در میانه خطی باشد که مراکز اتم‌های هیدروژن را به هم متصل می‌کند و بار منفی ( $-2e$ ) دقیقاً در مرکز اتم اکسیژن قرار داشته باشد، یک دوقطبی الکتریکی خواهیم داشت. بررسی میدان الکتریکی دوقطبی و نیز اثر میدان الکتریکی خارجی بر دوقطبی، اهمیت زیادی در شناخت رفتار الکتریکی مولکول‌های قطبی (مانند مولکول آب) در میدان‌های الکتریکی دارد.

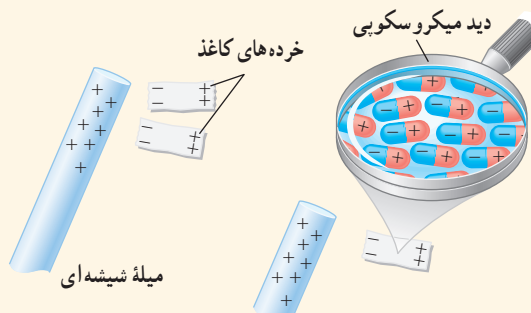
تمرین ۱-۵

شکل زیر، آرایشی از دو بار الکتریکی هم اندازه و غیرهمنام (دوقطبی الکتریکی) را نشان می‌دهد که در آن فاصله دو بار از هم  $6\text{ cm}$  است. میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های O و M به دست آورید.

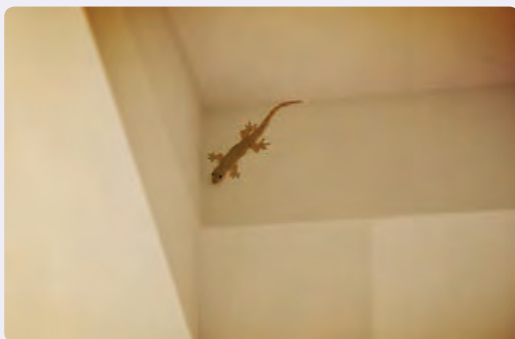


پرسش ۱-۴

با توجه به شکل زیر توضیح دهید چرا یک میله باردار، خرده‌های کاغذ را می‌رباید؟



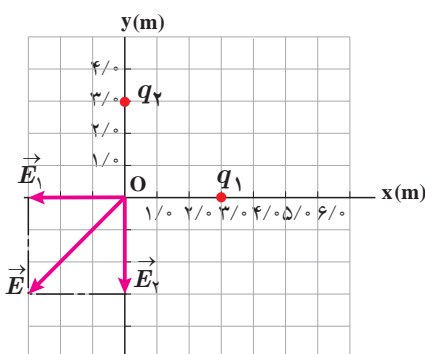
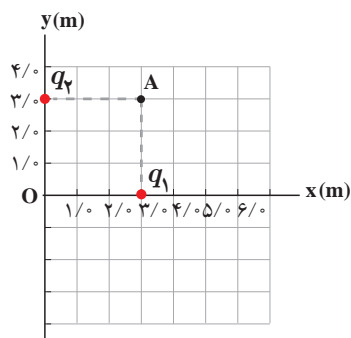
خوب است بدانید: نیروی وان دروالس او چسبیدن مارمولک‌ها به دیوار



نیروی وان دروالس برای توصیف نیروی جاذبه الکتریکی بین مولکول‌ها استفاده می‌شود. دلیل این نام‌گذاری این است که وان دروالس در سال ۱۸۷۳ نخستین پیشنهاد را برای نیروهای الکتریکی بین ذره‌های سازنده گاز به منظور توصیف برخی از ویژگی‌های گازهای غیرآرمانی و مایعات ارائه کرد. منشأ نیروی وان دروالس برهم‌کنش الکتریکی بین دوقطبی‌های الکتریکی است. براساس نیروی وان دروالس می‌توان بسیاری از چسبندگی‌ها از جمله چسبندگی پای مارمولک روی دیوار را توضیح داد.

پای مارمولک تعداد بی‌شماری مو موسوم به ستا دارد که هر مو صدها برجستگی یا سرمثلثی دارد که به کاردک معروف‌اند. وقتی مارمولک پای خود را بر دیوار می‌فشارد تمام این کاردک‌ها توسط نیروی وان دروالس به دیوار می‌چسبند. در این حالت، دوقطبی‌های موجود در سطح کاردک‌ها و سطح دیوار، یکدیگر را جذب می‌کنند. گرچه نیروی وان دروالس ضعیف است، اما مجموع این نیروهای بی‌شماری می‌تواند مارمولک را بر سطح دیوار نگه دارد.

## مثال ۱-۸



شکل روبه‌رو، دو بار نقطه‌ای  $q_1$  و  $q_2$  را در صفحه  $xy$  نشان می‌دهد. میدان الکتریکی خالص را در نقطه  $O$  (مبدأ مختصات) تعیین کنید. ( $q_1 = q_2 = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$ )  
**پاسخ:** در نقطه  $O$  میدان‌های الکتریکی مانند شکل زیر می‌شوند؛ چون بارها با هم برابر و فاصله آنها تا نقطه  $O$  نیز یکسان است، پس اندازه میدان‌ها در این نقطه با هم برابرند:

$$E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{r^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 5 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_1 = (-5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} \quad \text{و} \quad \vec{E}_2 = (-5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{j}$$

در نتیجه میدان الکتریکی خالص برابر است با

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$\vec{E} = (-5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (-5 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{j}$$

و از آنجا اندازه میدان الکتریکی خالص چنین می‌شود:

$$E = \sqrt{(-5 \times 10^3 \text{ N/C})^2 + (-5 \times 10^3 \text{ N/C})^2}$$

$$= 7.07 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 7.1 \times 10^3 \text{ N/C}$$

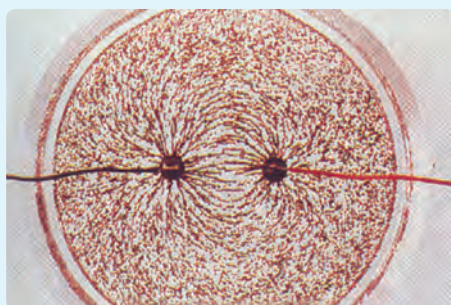
## تمرین ۱-۶

میدان الکتریکی خالص حاصل از آرایش بار مثال ۱-۸ را در نقطه  $A$  تعیین کنید.

## ۱-۶ خطوط میدان الکتریکی

پیش از این دیدیم بارهای الکتریکی در فضای پیرامون خود میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند. آیا می‌توانید بردار میدان الکتریکی را در نقاط پیرامون یک ذره باردار مثبت یا منفی تجسم کنید؟ مایکل فاراد در نخستین بار در میانه قرن نوزدهم میلادی روشی را برای تجسم این بردارها ارائه کرد. برای مجسم کردن میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام باردار از خط‌های جهت‌داری موسوم به خطوط میدان الکتریکی استفاده می‌کنیم.

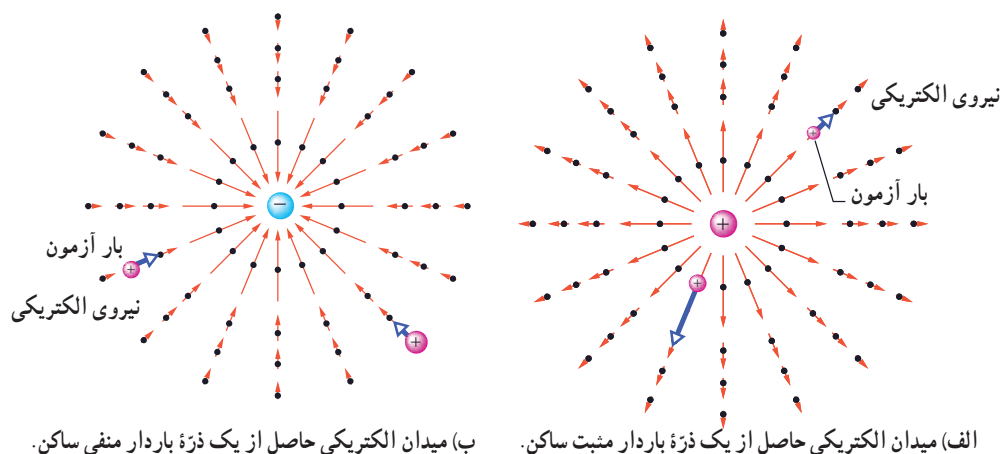
## فعالیت ۱-۲ (کار در کلاس)



درون یک ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی با عمق کم، مقداری پارافین مایع یا روغن کرچک به عمق حدود ۵cm بریزید و داخل آن دو الکتروند نقطه‌ای قرار دهید. الکترونها را با سیم به پایانه‌های مثبت و منفی یک مولد ولتاژ بالا، مانند مولد وان دوگراف وصل کنید. روی سطح پارافین، مقدار کمی بذر چمن یا خاکشیر بپاشید. مولد را روشن کنید. اکنون به سمت‌گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروند توجه کنید. شکل سمت‌گیری دانه‌ها در این فضا را رسم کنید.

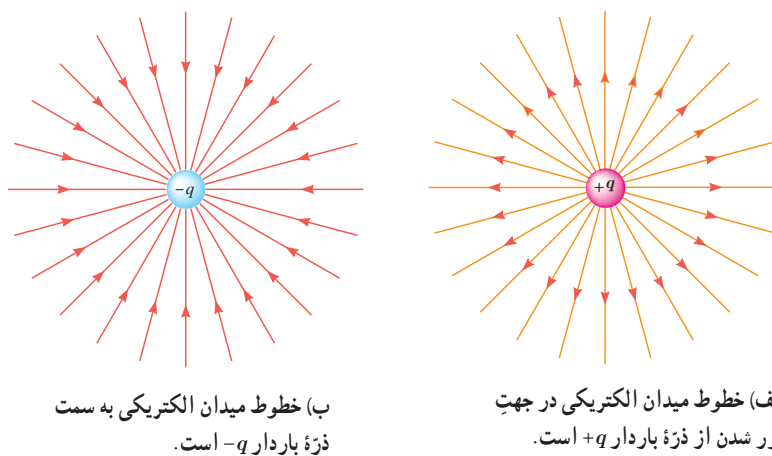


اگر یک بار آزمون را در نزدیکی یک ذره باردار مثبت یا منفی قرار دهیم، بسته به نوع بار، نیروی الکتریکی وارد به بار آزمون در جهت دور شدن از ذره (شکل ۱-۱۳-الف) و یا در جهت نزدیک شدن به آن (شکل ۱-۱۳-ب) خواهد بود.

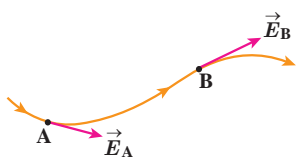


شکل ۱-۱۳

خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت با بردار میدان الکتریکی در آن نقطه است (شکل ۱-۱۴).



شکل ۱-۱۴



شکل ۱-۱۵ میدان الکتریکی در هر نقطه برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است.

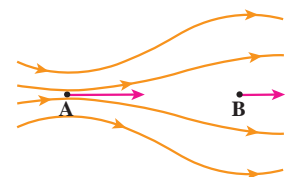
بنابراین، طرحی که از سمت‌گیری دانه‌ها در فعالیت ۲-۱ دیدید، در واقع طرحی از خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو الکتروود بوده است.

قاعده‌های رسم خطوط میدان الکتریکی عبارت‌اند از:

۱- در هر نقطه، بردار میدان الکتریکی باید مماس بر خط میدان الکتریکی عبوری از آن نقطه و در همان جهت باشد (شکل ۱-۱۵).

۲- میزان تراکم خطوط میدان در هر ناحیه از فضا نشان‌دهنده اندازه میدان در آن ناحیه است؛

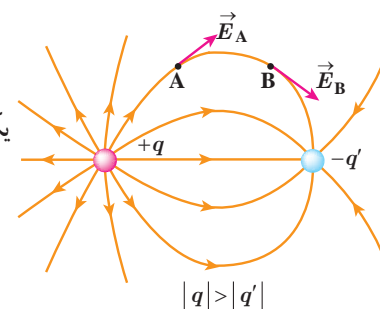
هرجا خطوط میدان متراکم‌تر باشد، اندازه میدان بیشتر است (شکل ۱-۱۶).



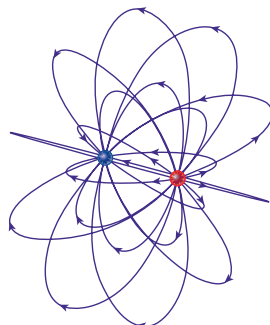
شکل ۱-۱۶ اطراف نقطه A خطوط میدان متراکم‌تر از اطراف نقطه B است. بنابراین، بزرگی میدان در نقطه A بیشتر از نقطه B است.

۳- در آرایشی از بارها خطوط میدان الکتریکی از بارهای مثبت شروع و به بارهای منفی ختم می‌شوند  
 ۴- خطوط میدان بر ایند هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند (شکل ۱۷-۱) یعنی از هر نقطه فضا فقط یک خط میدان الکتریکی می‌گذرد.

تجسم واقعی خطوط میدان، در فضاست، و بنابراین طرحی سه بعدی دارد (شکل ۱۸-۱).



شکل ۱۷-۱ خطوط میدان از بارهای مثبت شروع و به بارهای منفی ختم می‌شوند و هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند.

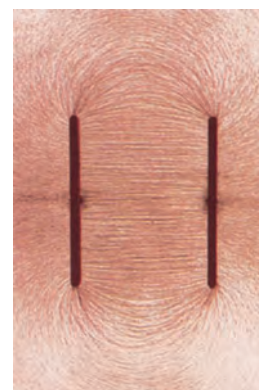


شکل ۱۸-۱ نمایش سه بعدی خطوط میدان برای یک دو قطبی الکتریکی.

### پرسش ۱-۵

به نظر شما چرا خطوط میدان الکتریکی بر ایند هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند؟

میدان الکتریکی یکنواخت: اگر دوباره اسباب فعالیت ۲-۱ را سوار کنید و این بار الکترودهای نقطه‌ای را با دو صفحه فلزی موازی جایگزین کنید و دوباره به سمت گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروده توجه کنید، طرحی از خطوط میدان الکتریکی را مشاهده می‌کنید که در شکل ۱۹-۱ نشان داده شده است. خطوط این میدان، در فضای بین دو صفحه و دور از لبه‌های صفحات، مستقیم، موازی و هم فاصله‌اند؛ یعنی بردار میدان در تمام نقاط بین دو صفحه هم اندازه و هم جهت است. به چنین میدانی، میدان الکتریکی یکنواخت گفته می‌شود (شکل ۱-۲۰).

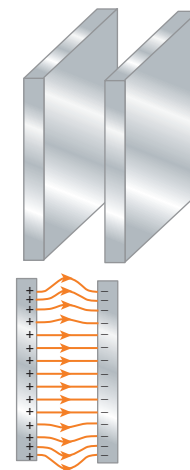


شکل ۱۹-۱ سمت گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروده صفحه‌ای موازی

نیروی الکتریکی وارد بر بار الکتریکی در یک میدان الکتریکی: گرچه برای تعریف میدان الکتریکی یک جسم باردار از بار آزمون مثبت استفاده کردیم، ولی وجود این میدان مستقل از بار آزمون است. بنابراین، اگر بار الکتریکی  $q$  در میدان الکتریکی  $\vec{E}$  ناشی از اجسام باردار دیگری قرار گیرد، این میدان بر آن نیروی  $\vec{F}$  را وارد می‌کند. نیروی  $\vec{F}$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

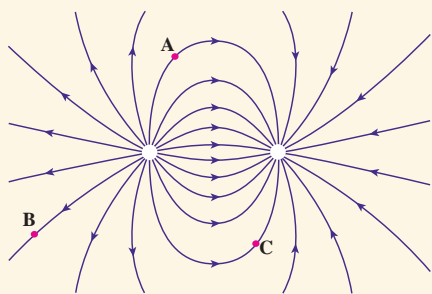
$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (۱-۶)$$

بزرگی این نیرو از رابطه  $F = |q|E$  به دست می‌آید، و جهت آن اگر  $q$  مثبت باشد، در همان جهت  $\vec{E}$  و اگر  $q$  منفی باشد، در خلاف جهت  $\vec{E}$  خواهد بود.



شکل ۲۰-۱ طرحی از خطوط میدان یکنواخت بین دو صفحه رسانای موازی با بارهای هم اندازه و ناهمنام

## پرسش ۱-۶



بار  $q$  - را در نقطه‌های A، B و C از میدان الکتریکی غیریکنواخت شکل روبه‌رو قرار دهید و جهت نیروی الکتریکی وارد بر این بار منفی را تعیین کنید.

## فعالیت ۱-۳



تولید مثل برخی از گل‌ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده‌ها به واسطه میدان الکتریکی، از یک گل به زنبور و از زنبور به گل دیگر منتقل می‌شوند. در این باره تحقیق کنید.

## تمرین ۱-۷

روی سطح بادکنکی به جرم  $1\text{ g}/\text{cm}^3$  بار الکتریکی  $20\text{ nC}$  - ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی قرار می‌دهیم. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را در صورتی که بادکنک معلق بماند، تعیین کنید. از نیروی شناوری وارد به بادکنک چشم‌پوشی کنید.

## فعالیت ۱-۴

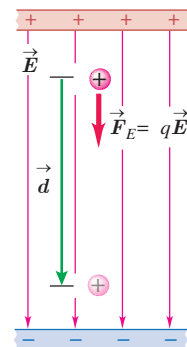


رسوب‌دهنده الکتروستاتیکی (ESP) دود و غبار را از گازهای زائدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌آید جدا می‌سازد. رسوب‌دهنده‌ها انواع مختلفی دارند. در مورد اساس کار این رسوب‌دهنده‌ها تحقیق کنید. شکل‌های روبه‌رو تأثیر رسوب‌دهنده را در کاهش آلودگی هوای ناشی از یک دودکش نشان می‌دهد.

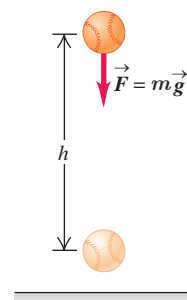
## ۷-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی



شکل ۱-۲۱ ذره باردار  $+q_2$  در میدان الکتریکی فضای اطراف بار  $+q_1$  رها شده است.



شکل ۱-۲۲ ذره باردار  $+q$  در میدان الکتریکی یکنواخت رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود (از نیروی گرانشی چشم‌پوشی شده است).



شکل ۱-۲۳ جسم در میدان گرانشی یکنواخت زمین رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.

دو ذره باردار الکتریکی شکل ۱-۲۱ را در نظر بگیرید که در آن، بار  $+q_1$  در جای خود ثابت و بار  $+q_2$  در فضای اطراف آن رها شده است. می‌دانیم بار  $+q_2$  بر اثر میدان الکتریکی حاصل از بار  $+q_1$  از آن رانده و دارای انرژی جنبشی می‌شود. طبق قانون پایستگی انرژی، انرژی جنبشی نمی‌تواند خود به خود به وجود آمده باشد. به نظر شما این انرژی جنبشی از کجا آمده است؟ این انرژی، ناشی از تغییر (در اینجا کاهش) انرژی پتانسیلی است که به نیروی الکتریکی بین دو ذره شکل ۱-۲۱ وابسته است و همان طور که در کتاب فیزیک سال دهم دیدید به آن **انرژی پتانسیل الکتریکی** می‌گوییم. برای آنکه به توصیفی کمی از این انرژی دست یابیم، میدان الکتریکی یکنواختی را مطابق شکل ۱-۲۲ در نظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحه باردار برقرار شده است.

اگر بار الکتریکی  $+q$  را از مجاورت صفحه مثبت رها کنیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی (با چشم‌پوشی از گرانش)، به طرف صفحه منفی شروع به حرکت می‌کند و به تدریج تندی و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد. این وضعیت، شبیه چیزی است که در کتاب فیزیک سال دهم دیدیم. در آنجا نیز مشاهده کردیم که وقتی جسمی به جرم  $m$  از ارتفاع  $h$  رها می‌شود، جسم رو به پایین حرکت کرده و انرژی جنبشی آن بر اثر کاهش انرژی پتانسیل گرانشی به تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۱-۲۳). همچنین دیدیم که کار نیروی گرانشی برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است ( $W_g = -\Delta U_g$ ).

در اینجا نیز می‌توان گفت: کار نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره باردار در میدان الکتریکی یکنواخت  $\vec{E}$  در یک جابه‌جایی مشخص برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی در همان جابه‌جایی است؛ یعنی:

$$W_E = -\Delta U_E \quad (7-1)$$

گرچه این رابطه برای یک میدان الکتریکی یکنواخت بیان شد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر میدان الکتریکی برقرار است.

بار ذره‌ای  $q$  را در میدان الکتریکی یکنواخت  $\vec{E}$  در نظر بگیرید که جابه‌جایی  $\vec{d}$  را موازی میدان الکتریکی، انجام می‌دهد (شکل ۱-۲۲). طبق تعریف کار که در سال قبل دیدیم، کار انجام شده توسط

نیروی الکتریکی ثابت  $F_E$  در طی جابه‌جایی  $\vec{d}$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_E = (F_E \cos\theta) d = F_E d \cos\theta$$

با توجه به اینکه  $F_E = |q|E$  است، این رابطه به صورت زیر می‌شود:

$$W_E = |q| E d \cos\theta$$

اکنون با استفاده از رابطه ۷-۱ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار ذره‌ای  $q$  چنین محاسبه می‌شود:

$$\Delta U_E = -W_E = -|q| E d \cos\theta \quad (8-1)$$

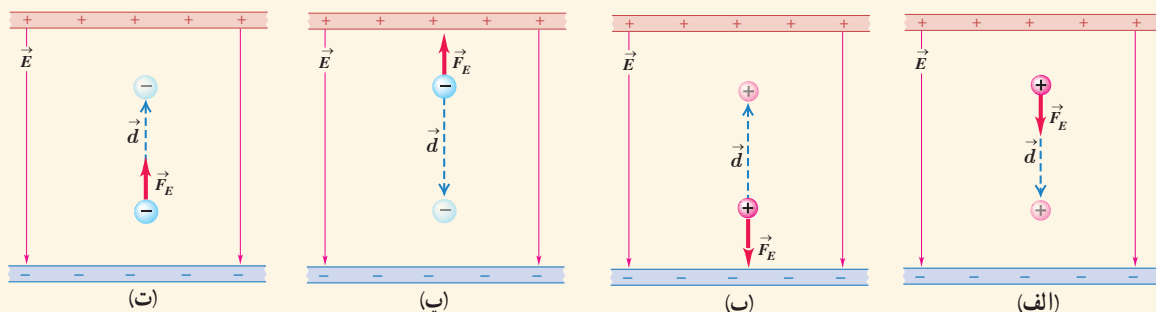
که در آن،  $\theta$  زاویه بین نیروی  $\vec{F}_E$  و جابه‌جایی  $\vec{d}$  است. (در این کتاب، در استفاده از رابطه ۸-۱، صرفاً با جابه‌جایی‌های هم‌راستا با میدان الکتریکی و یا عمود بر میدان الکتریکی سروکار خواهیم

داشت. در این رابطه، بار الکتریکی ( $q$ ) برحسب کولن (C)، بزرگی میدان الکتریکی ( $E$ ) برحسب نیوتون بر کولن (N/C)، اندازه جابه‌جایی ( $d$ ) برحسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی ( $\Delta U_E$ ) برحسب ژول (J) است. توجه کنید که این رابطه چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است.

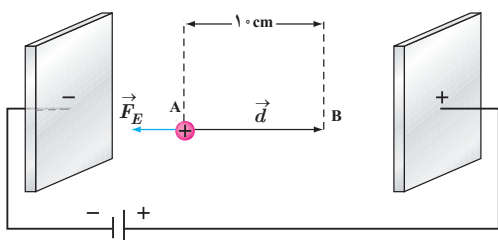
### پرسش ۱-۷

در هر یک از شکل‌های زیر، با توجه به علامت بار ذره جابه‌جا شده، و جهت میدان الکتریکی ( $\vec{E}$ )، جهت نیروی الکتریکی ( $\vec{F}_E$ ) و جهت جابه‌جایی ذره ( $\vec{d}$ )، تعیین کنید که:

الف) کار نیروی الکتریکی ( $W_E$ ) مثبت است یا منفی. (ب) انرژی پتانسیل الکتریکی ( $U_E$ ) کاهش یافته است یا افزایش.



### مثال ۱-۹



در یک میدان الکتریکی یکنواخت  $E = 2/0 \times 10^3 \text{ N/C}$ ، پروتون از نقطه A با سرعت  $\vec{v}$  در خلاف جهت میدان الکتریکی پرتاب شده است. پروتون سرانجام در نقطه B متوقف می‌شود. بار پروتون  $1/6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و جرم آن  $1/67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  است.

الف) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی پروتون در این جابه‌جایی چقدر است؟  
ب) تندی پرتاب پروتون را پیدا کنید (از وزن پروتون و مقاومت هوا چشم‌پوشی شود).

**پاسخ:**

الف) با توجه به رابطه ۱-۸ داریم:

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|Ed \cos \theta = -(1/6 \times 10^{-19} \text{ C})(2/0 \times 10^3 \text{ N/C})(1.0 \times 10^{-2} \text{ m})(\cos 180^\circ) = 3/2 \times 10^{-17} \text{ J}$$

ب) طبق قضیه کار-انرژی جنبشی می‌توان نوشت:

$$W_E = \Delta K \Rightarrow -\Delta U_E = \frac{1}{2}m(v_0^2 - v^2)$$

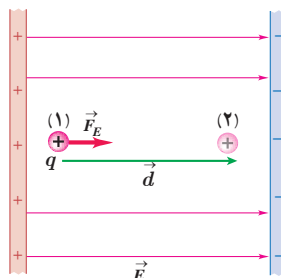
$$-3/2 \times 10^{-17} \text{ J} = \frac{1}{2}(1/67 \times 10^{-27} \text{ kg})(v_0^2) \Rightarrow v_0 = 1/96 \times 10^5 \text{ m/s} \approx 2/0 \times 10^5 \text{ m/s}$$

### تمرین ۱-۸

در مثال ۱-۹ اگر جای قطب‌های باتری عوض شود و پروتون را در نقطه A از حالت سکون رها کنیم، پروتون با چه تندی‌ای به نقطه B می‌رسد؟

## ۸-۱ پتانسیل الکتریکی

در بخش قبل دیدیم تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک ذره باردار به بار الکتریکی آن بستگی دارد؛ مثلاً با دوبرابر شدن بار ذره، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز دو برابر می‌شود. بنابراین، نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار ذره، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است. به این نسبت، **اختلاف پتانسیل الکتریکی** دو نقطه‌ای می‌گوییم که ذره میان آنها جا به جا شده است (شکل ۱-۲۴) و آن را با  $\Delta V$  نمایش می‌دهیم:



شکل ۱-۲۴ نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است.

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{\Delta U_E}{q} \quad (۹-۱)$$

که در آن  $V$  کمیتی نرده‌ای موسوم به پتانسیل الکتریکی است که مقدار آن در نقطه‌های ۱ و ۲ به ترتیب  $V_1$  و  $V_2$  است. در این رابطه، اختلاف پتانسیل الکتریکی ( $\Delta V$ ) برحسب ژول بر کولن (J/C) است که آن را به افتخار *الساندرو ولتا*، ولت می‌نامند و با نماد  $V$  نمایش می‌دهند.

گرچه این رابطه را برای میدان الکتریکی یکنواخت بیان کردیم، اما برای میدان‌های الکتریکی غیریکنواخت نیز برقرار است. توجه کنید که در این رابطه علامت  $q$  باید در نظر گرفته شود. جدول ۱-۲ برخی از اختلاف پتانسیل‌ها (ولتاژهای) متداول را نشان می‌دهد.

در تشابه با انرژی پتانسیل گرانشی، در اینجا نیز می‌توانیم برای انرژی پتانسیل الکتریکی، مرجعی اختیار کنیم که در آن انرژی پتانسیل الکتریکی ذره و پتانسیل الکتریکی صفر باشد. بنابراین، پتانسیل الکتریکی در هر نقطه از میدان با رابطه زیر بیان می‌شود:

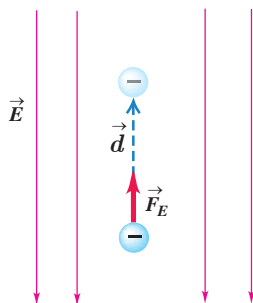
$$V = \frac{U_E}{q} \quad (۱۰-۱)$$

جدول ۱-۲ برخی از ولتاژهای متداول	
پتانسیل استراحت نرون	۶۰-۹۰ mV
باتری قلمی	۱/۵V
باتری اتومبیل	۱۲V
برق خانگی در برخی از کشورها	۱۱۰-۱۲۰V
برق خانگی در ایران و اغلب کشورها	۲۲۰-۲۴۰V
مولد نیروگاه برق	۲۴۰۰۰V
خطوط انتقال برق ولتاژ بالا	۱۰ <sup>۴</sup> -۱۰ <sup>۶</sup> V
آذرخش	۱۰ <sup>۸</sup> -۱۰ <sup>۹</sup> V



الساندرو ولتا (۱۸۲۷-۱۷۴۵م)

الساندرو ولتا در ایتالیا به دنیا آمد. نخست به شغل معلمی روی آورد و تا سن سی‌سالگی به این کار ادامه داد. سپس در دانشگاه پادوا به استادی فیزیک برگزیده شد. در آنجا وظیفه داشت علاوه بر تدریس، آزمایشگاهی نیز دایر کند. وقتی در دانشگاه تدریس می‌کرد دستگاهی به نام الکتروفور را اختراع کرد و شرح جزئیات دستگاه را برای جوزف پرستلی فرستاد. ولتا با استفاده از این دستگاه قوانین فیزیکی زیادی را کشف کرد، در سال ۱۷۹۱ لوئیجی گالوانی استاد زیست‌شناسی و فیزیولوژی دانشگاه بولونیا موقعی که سرگرم تشریح قورباغه‌ای در آزمایشگاهش بود، یک گیره برنجی را در نخاع جانور قرار داد و متوجه شد که پس از برخورد ماهیچه پای قورباغه با جاقوی جراحی، خصوصاً وقتی قسمت بالای جاقو با گیره تماس پیدا کند، ماهیچه به شدت منقبض می‌شود و علت انقباض ماهیچه پای قورباغه را الکتریسیته‌ای پنداشت که در بدن جانور به وجود می‌آید. اما ولتا برخلاف گالوانی عقیده داشت منشأ پیدایش این الکتریسیته از بدن جانور نیست و در نامه‌ای به تاریخ ۱۸۰۰ میلادی درباره پیل توضیح داد که امروزه پیل ولتا خوانده می‌شود. پیل ولتا از تعدادی صفحات نقره، مقوای آغشته به یک محلول الکترولیت و روی درست شده است که به ترتیب روی هم چیده شده‌اند. این پیل یک منبع الکتریسیته بود که امروزه به نام باتری خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. اختراع ولتا راه تازه‌ای را در پیشرفت علم گشود و با استفاده از پیل ولتا، دانشمندان توانستند در مدت زمان کوتاهی آب را به دو عنصر اکسیژن و هیدروژن تجزیه کنند.



در نتیجه برخورد پرتوهای کیهانی با مولکول‌های هوا، الکترون‌هایی از این مولکول‌ها کنده می‌شوند. در نزدیکی سطح زمین، میدان الکتریکی با بزرگی  $150 \text{ N/C}$  و جهت رو به پایین وجود دارد. الف) اگر یکی از این الکترون‌ها، تحت تأثیر این میدان  $500 \text{ m}$  رو به بالا جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟ ب) اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه‌ای که الکترون بین آنها جابه‌جا شده چقدر است؟

**پاسخ:** الف) با استفاده از رابطه ۸-۱ برای تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون داریم:

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|Ed \cos \theta = -(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(150 \text{ N/C})(500 \text{ m}) \cos 0^\circ$$

$$= -1.20 \times 10^{-14} \text{ J}$$

ب) با استفاده از رابطه ۹-۱ برای اختلاف پتانسیل داریم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = \frac{-1.20 \times 10^{-14} \text{ J}}{-1.60 \times 10^{-19} \text{ C}} = 7.50 \times 10^4 \text{ V} = 75.0 \text{ kV}$$

### تمرین ۹-۱

الف) نشان دهید در یک میدان الکتریکی یکنواخت، با حرکت در سوی خطوط میدان، بدون توجه به نوع بار، پتانسیل الکتریکی کاهش می‌یابد و بالعکس با حرکت در خلاف جهت خطوط میدان، بدون توجه به نوع بار، پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد.  
ب) نشان دهید در میدان الکتریکی یکنواخت، با حرکت در جهت عمود بر خطوط میدان، پتانسیل الکتریکی تغییر نمی‌کند.

شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا گوشی تلفن همراه از آنها استفاده می‌شود (شکل ۱-۲۵) و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها ولتاژهای متفاوتی دارند؛ مثلاً باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ ولتی یا بیشترند. هر باتری دو پایانه دارد که یکی با مثبت و دیگری با منفی نشان داده می‌شود. بنا به قرارداد، اختلاف پتانسیل الکتریکی دو سر باتری برابر با پتانسیل پایانه مثبت منهای پتانسیل پایانه منفی است. اگر پتانسیل پایانه منفی را با  $V_-$  و پتانسیل پایانه مثبت را با  $V_+$  نشان دهیم، داریم:

$$\Delta V = V_+ - V_-$$

بنابراین، وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی پتانسیل پایانه مثبت به اندازه ۱۲ ولت از پتانسیل پایانه منفی آن بیشتر است؛ مثلاً اگر پتانسیل پایانه منفی را برابر با  $-4\text{V}$  فرض کنیم، پتانسیل پایانه مثبت برابر  $+8\text{V}$  خواهد شد. می‌توان پایانه منفی را مرجع پتانسیل در نظر گرفت؛ در این صورت، پتانسیل پایانه مثبت برابر  $+12\text{V}$  می‌شود. معمولاً (به خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین یا نقطه‌ای از مدار را برابر صفر می‌گیرند و به آن نقطه، اصطلاحاً نقطه زمین می‌گویند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به آن می‌سنجند. نقطه زمین را در مدارهای الکتریکی با نماد  $\perp$  نشان می‌دهند.



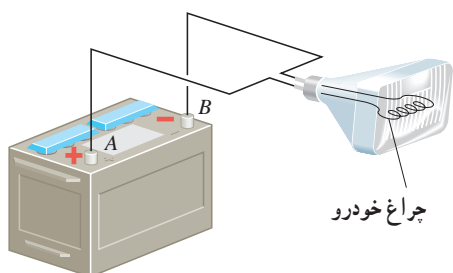
شکل ۱-۲۵ برخی از باتری‌های متداول



## تمرین ۱-۱۰

اگر پایانه مثبت یک باتری ۱۲ ولتی را مرجع پتانسیل در نظر بگیریم، پتانسیل پایانه منفی آن چند ولت خواهد شد؟

## مثال ۱-۱۱



اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر  $12/0\text{V}$  است. اگر بار الکتریکی  $50/0\text{C}$  - کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟

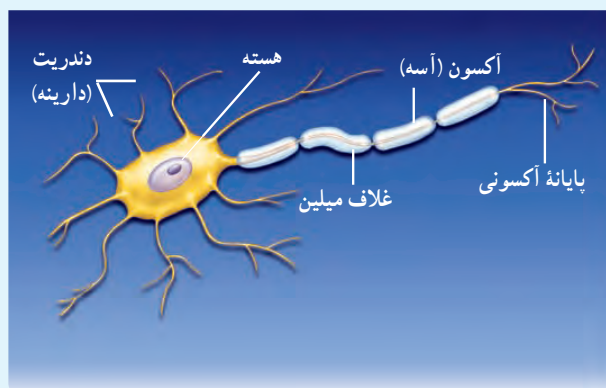
**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۹-۱ داریم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q}$$

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_+ - V_-) = (-50/0\text{C})(+12/0\text{V}) = -600\text{J}$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه  $600\text{J}$  کاهش یافته است.

## فعالیت ۱-۵



عمل مغز اساساً بر مبنای کنش‌ها و فعالیت‌های الکتریکی است. سیگنال‌های عصبی چیزی جز عبور جریان‌های الکتریکی نیست. مغز این سیگنال‌ها را دریافت می‌کند و اطلاعات به صورت سیگنال‌های الکتریکی در امتداد اعصاب گوناگون منتقل می‌شوند. هنگام انجام هر عمل خاصی، سیگنال‌های الکتریکی زیادی تولید می‌شوند. این سیگنال‌ها حاصل کنش الکتروشیمیایی در یاخته‌های عصبی موسوم به نورون هستند. درباره چگونگی کار نورون‌ها تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

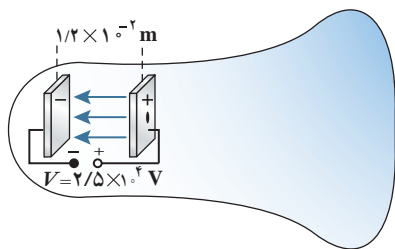
رابطه اختلاف پتانسیل دو نقطه و اندازه میدان الکتریکی یکنواخت: همان‌طور که پیش‌تر گفتیم اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه از میدان الکتریکی، مستقل از نوع و اندازه بار جابه‌جا شده بین دو نقطه است. برای اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  دو نقطه به فاصله  $d$  از یکدیگر، که خط واصل آنها هم‌راستا با میدان الکتریکی  $\vec{E}$  است، رابطه زیر برقرار است:

$$|\Delta V| = Ed \quad (11-1)$$

در این رابطه  $\Delta V$  بر حسب ولت،  $E$  بر حسب نیوتون بر کولن، و  $d$  بر حسب متر است. بنابراین می‌توان نوشت:  $1\text{N/C} = 1\text{V/m}$ .



لامپ‌های تصویر تلویزیون‌ها و نمایشگرهای قدیمی، لامپ پرتو-کاتدی (CRT) بودند. در این لامپ، الکترون‌ها در میدان الکتریکی یکنواخت بین دو صفحه باردار، مطابق شکل، شتاب می‌گیرند و با صفحه نمایشگر برخورد می‌کنند. اگر صفحه‌ها در فاصله  $1/2 \times 10^{-2} \text{ m}$  از یکدیگر باشند و اختلاف پتانسیل بین آنها  $2/5 \times 10^4 \text{ V}$  باشد، بزرگی میدان الکتریکی بین صفحه‌ها را تعیین کنید.

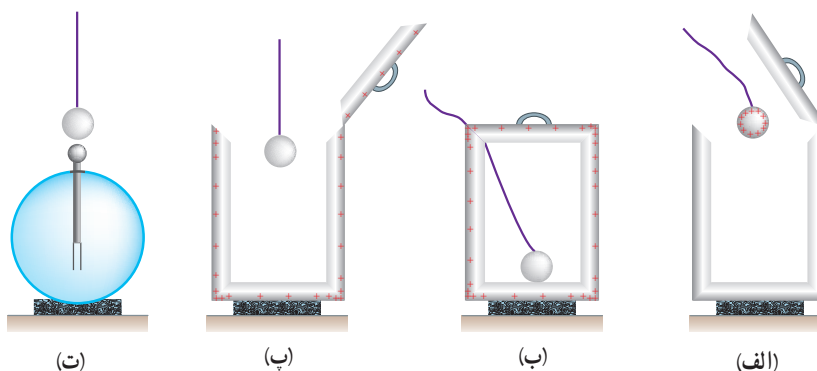


**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۱-۱۱ داریم:

$$E = \frac{|\Delta V|}{d} = \frac{2/5 \times 10^4 \text{ V}}{1/2 \times 10^{-2} \text{ m}} = 2/0.8 \times 10^6 \text{ V/m} \approx 2/1 \text{ MV/m}$$

### ۱-۹ توزیع بار الکتریکی در اجسام رسانا

جسم رسانایی را در نظر بگیرید. به نظر شما اگر باری اضافی به این جسم داده شود، چگونه در آن توزیع می‌شود؟ مایکل فاراده در سال ۱۸۳۶ میلادی با انجام آزمایشی به این سؤال پاسخ داد. آزمایش فاراده: ظرف رسانایی با درپوش فلزی را در نظر بگیرید که روی پایه نارسانایی قرار دارد و روی درپوش آن دسته‌ای عایق نصب شده است. ابتدا ظرف بدون بار است. یک گوی فلزی را که از نخ عایقی آویزان است بردار و سپس وارد ظرف می‌کنیم (شکل ۱-۲۶ الف). اکنون گوی را با کف ظرف تماس می‌دهیم و سپس درپوش فلزی را می‌بندیم (شکل ۱-۲۶ ب). آن‌گاه درپوش فلزی را با دسته عایقش برمی‌داریم (شکل ۱-۲۶ پ). پس از خارج کردن گوی فلزی از ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود عقربه الکتروسکوپ تکان نمی‌خورد (شکل ۱-۲۶ ت). همچنین اگر ظرف را به الکتروسکوپ نزدیک کنیم، مشاهده می‌شود که عقربه‌های الکتروسکوپ از هم فاصله می‌گیرند. از این آزمایش نتیجه می‌گیریم که بار اضافی داده شده به یک رسانا روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود.



شکل ۱-۲۶ شرحی تصویری از آزمایش فاراده

خوب است بدانید بار در سطح خارجی رسانا به گونه‌ای توزیع می‌شود که میدان الکتریکی در داخل رسانا صفر شود. پدیده‌ی القا که در علوم هشتم با آن آشنا شدید ناشی از همین واقعیت است. مثلاً در شکل ۱-۲۷ جسم رسانای خنثایی در میدان الکتریکی خارجی میله‌ی بارداری قرار گرفته است. وقتی یک رسانای خنثی را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، بار طوری روی سطح خارجی توزیع می‌شود (القا می‌شود) که میدان الکتریکی ناشی از آن اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی کند و بدین ترتیب میدان الکتریکی خالص درون رسانا صفر شود.



**شکل ۱-۲۷** نزدیک کردن میله‌ی باردار منفی به گوی فلزی خنثایی که روی پایه‌ی عایقی قرار گرفته است، موجب ایجاد بارهای القایی مثبت و منفی در دو طرف گوی فلزی می‌شود.

## فعالیت ۱-۶

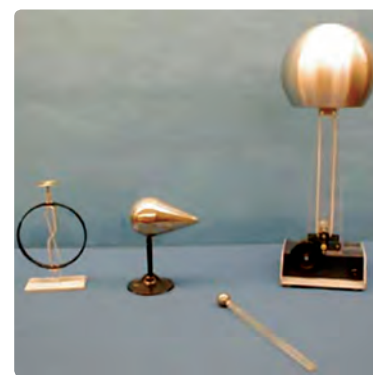


(الف) در شکل شخصی را داخل یک قفس توری فلزی می‌بینید که نوعی از قفس فاراده است. در مورد قفس فاراده و کاربردهایش تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

(ب) تحقیق کنید چرا معمولاً شخصی که در داخل اتومبیل یا هواپیماست از خطر آذرخش در امان می‌ماند.

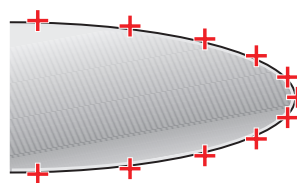
(پ) با اعضای گروه خود آزمایش‌های دیگری را طراحی و اجرا کنید که نشان دهد بار اضافی داده شده به رسانا، روی سطح خارجی آن قرار می‌گیرد.

دیدیم که بار الکتریکی روی سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود. برای اینکه دریابید بار الکتریکی داده شده به یک رسانا چگونه روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود آزمایش زیر را در نظر بگیرید که اسباب آن در شکل ۱-۲۸ نشان داده شده است. یک جسم رسانای دوکی شکل را روی پایه‌ی عایق قرار دهید و آن را با تماس با کلاهک مولد وان دوگراف باردار کنید. گلوله‌ای فلزی را که به دسته‌ای عایق متصل است با بخش پهن دوک تماس داده و سپس گلوله را به سر الکتروسکوپ تماس دهید. همین آزمایش را پس از خنثی کردن الکتروسکوپ و گوی فلزی با تماس با دستتان، با نوک تیز دوک انجام دهید. خواهید دید، انحراف صفحه‌های الکتروسکوپ با نوک تیز دوک بیشتر از انحراف صفحه‌ها با بخش پهن



**شکل ۱-۲۸** اسباب آزمایش چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی یک جسم رسانای باردار

آن است. آزمایش‌هایی از این دست نشان می‌دهد تراکم بار در نقاط تیز سطح جسم رسانای باردار از نقاط دیگر آن بیشتر است (شکل ۱-۲۹).



شکل ۱-۲۹ تراکم بار در نقاط تیزتر سطح یک جسم رسانای باردار بیشتر است.

### فعالیت ۱-۷



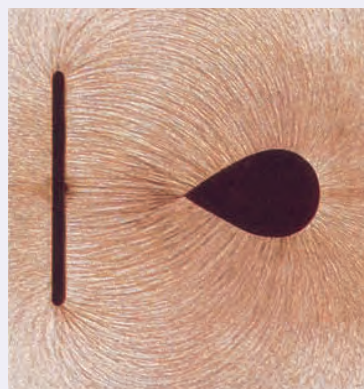
در مورد برق‌گیرهای ساختمان تحقیق کنید و بررسی کنید آنها چگونه ساختمان‌ها را از گزند آذرخش در امان نگه می‌دارند.

### خوب است بدانید: تخلیه هاله‌ای<sup>۱</sup>

همان‌طور که دیدیم در قسمت‌های نوک تیز اجسام رسانای باردار، تراکم بار الکتریکی بیشتر است. با اسباب آزمایش فعالیت ۱-۲ می‌توان نشان داد که خطوط میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز تراکم‌تر و در نتیجه میدان الکتریکی قوی‌تر است (شکل الف). اگر بزرگی این میدان از یک مقدار حدی فراتر برود، این میدان شدید می‌تواند الکترون‌ها را از مولکول‌های هوا بکند و به آنها شتاب دهد. برخورد این الکترون‌ها با مولکول‌های دیگر موجب برانگیختگی این مولکول‌ها می‌شود و در نتیجه نوری تولید می‌شود که قابل مشاهده است (شکل ب). هنگام وقوع این پدیده، جنبش مولکولی، دما، و فشار هوا در محل وقوع این پدیده زیاد می‌شود که این معمولاً همراه با صدای جِلِز وِلِز و هیس ماندنی است که در حین تخلیه‌های جرقه‌ای شنیده می‌شود. به این جرقه‌های الکتریکی که در نوک تیز اجسام رسانای بلند و نازک ایجاد می‌شود، *تخلیه هاله‌ای* یا *آتش سنت الموه*<sup>۲</sup> گفته می‌شود.



ب) تخلیه هاله‌ای



الف) اسباب آزمایش فعالیت ۱-۲ به طوری که در آن الکترودها با یک صفحه تخت رسانا و یک رسانای دوکی شکل جایگزین شده‌اند. میدان الکتریکی در نقاط تیزتر جسم دوکی شکل قوی‌تر است.

۱- Corona discharge

۲- St. Elmo fire

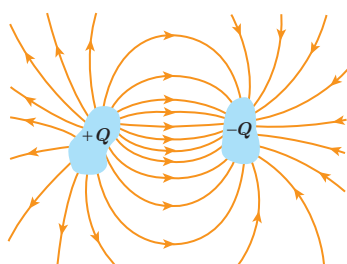
## ۱-۱۰ خازن

خازن وسیله‌ای الکتریکی است که می‌تواند بار و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند؛ مثلاً باتری‌های یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در خازن فلاش دوربین ذخیره می‌کنند (شکل ۱-۳۰). باتری‌ها معمولاً می‌توانند انرژی را فقط با آهنگ نسبتاً کمی به مدار بدهند که این آهنگ برای گسیل نور از فلاش دوربین بسیار کم است، اما وقتی خازن باردار می‌شود، می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار زیادی برای فلاش زدن آماده کند.



شکل ۱-۳۰ انرژی فلاش دوربین در یک خازن ذخیره شده است.

شکل ۱-۳۱ چند خازن را در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۱-۳۲ اجزای اصلی یک خازن معمولی را نشان می‌دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. این رساناها را صفحه‌های خازن می‌نامیم.

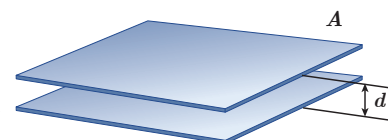


شکل ۱-۳۲ اجزای اصلی یک خازن باردار



شکل ۱-۳۱ تصویری از چند خازن مختلف

شکل ۱-۳۳ آرایش خازنی موسوم به خازن تخت<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد که شامل دو صفحه رسانای موازی با مساحت  $A$  است که به فاصله  $d$  (که در برابر ابعاد صفحه‌ها ناچیز است) از هم قرار گرفته‌اند. گرچه نمادی که برای نشان دادن یک خازن به کار می‌بریم  $\left(\begin{array}{c} | | \\ \text{---} \\ | | \end{array}\right)$  مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن‌ها با هر شکلی استفاده می‌شود. خازن‌ها به‌طور گسترده‌ای در مدارهای الکترونیکی و ساینی مانند رادیو، تلویزیون، رایانه، گوشی همراه و... به کار می‌روند؛ مثلاً شکل ۱-۳۴ مدار یک تقویت‌کننده (آمپلی‌فایر) را نشان می‌دهد که در آن چندین خازن به کار رفته است. برخی از این خازن‌ها با پیکان‌هایی مشخص شده‌اند.



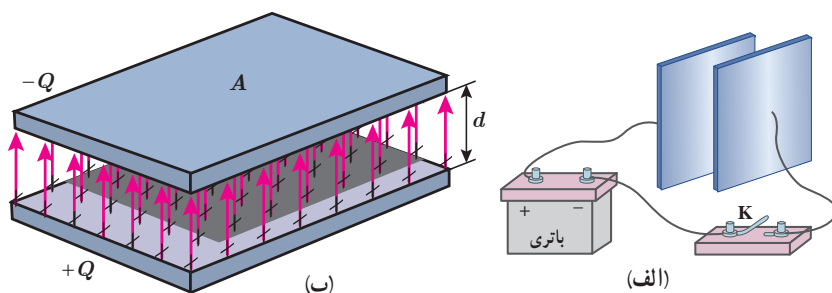
شکل ۱-۳۳ یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت  $A$  ساخته شده است که به فاصله  $d$  از هم قرار گرفته‌اند.

باردار (شارژ) کردن خازن: روش ساده و مرسوم برای باردار کردن خازن قرار دادن آن در مدار الکتریکی ساده‌ای است که یک باتری دارد (شکل ۱-۳۵ الف). وقتی کلید  $K$  بسته (وصل) شود بار از طریق سیم‌های رسانا جریان می‌یابد. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحه خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانه باتری یکسان شود. وقتی یک خازن باردار می‌شود، صفحه‌های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی با علامت مخالف می‌شود:  $+Q$  و  $-Q$ . با این حال، بار یک خازن را به صورت  $Q$  نشان می‌دهند که همان بار صفحه مثبت است. بین دو صفحه خازن باردار یک میدان الکتریکی ایجاد می‌شود که خطوط این میدان از صفحه مثبت به منفی است (شکل ۱-۳۵ ب).



شکل ۱-۳۴ مدار یک تقویت‌کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن‌ها با پیکان مشخص شده‌اند.

<sup>۱</sup> parallel - plate capacitor



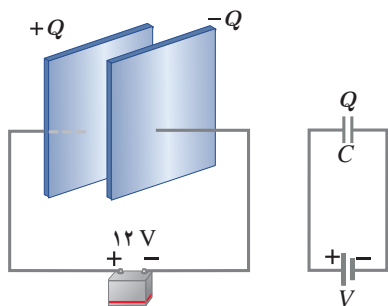
شکل ۱-۳۵ الف) یک روش برای باردار کردن خازن، اتصال صفحه‌های آن به یک باتری است. ب) صفحه‌های این خازن بارهایی هم اندازه و با علامت مخالف پیدا می‌کنند. میدان الکتریکی از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است.

ظرفیت خازن: اگر اختلاف پتانسیل بین صفحه‌های خازن ( $\Delta V$ ) را زیاد کنیم، بار خازن ( $Q$ ) نیز به همان نسبت زیاد می‌شود. به عبارتی نسبت  $\frac{Q}{\Delta V}$  همواره مقداری ثابت است که به این نسبت ثابت، ظرفیت خازن می‌گویند و آن را با  $C$  نشان می‌دهند. ظرفیت خازن به اندازه بار خازن و نیز اختلاف پتانسیل دو صفحه آن بستگی ندارد. عبارت ظرفیت الکتریکی را نخستین بار ولتا در تشابه با ظرفیت گرمایی به کار برد. بنابه دلایل تاریخی، قدرمطلق اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  بین دو صفحه خازن را با  $V$  نمایش می‌دهند. بنابراین:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (۱۲-۱)$$

در رابطه ۱۲-۱ یکای بار الکتریکی، کولن ( $C$ )، یکای اختلاف پتانسیل، ولت ( $V$ ) و بنابراین یکای ظرفیت، کولن بر ولت ( $C/V$ ) می‌شود که به پاس خدمات مایکل فاراده، فاراد ( $F$ ) نامیده شده است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و عملاً ظرفیت اکثر خازن‌های متداول در محدوده میکوفاراد ( $10^{-12} F$ ) تا میلی‌فاراد ( $10^{-6} F$ ) است. گرچه امروزه فناوری ساخت خازن‌ها، دستیابی به ظرفیت‌هایی بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

### مثال ۱-۱۳



صفحه‌های خازنی را مطابق شکل به پایانه‌های یک باتری با اختلاف پتانسیل ۱۲V وصل می‌کنیم. اگر بار خازن  $24 \mu C$  شود، الف) ظرفیت خازن را محاسبه کنید. ب) اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل ۳۶V وصل کنیم، بار الکتریکی آن چقدر می‌شود؟

پاسخ:

الف) با استفاده از رابطه ۱۲-۱ داریم:

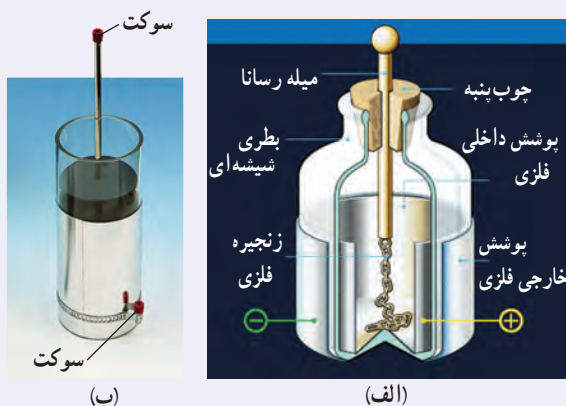
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{24 \times 10^{-6} C}{12 V} = 2 \times 10^{-6} F = 2 \mu F$$

ب) با توجه به اینکه ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است از ظرفیت به دست آمده در قسمت الف استفاده می‌کنیم. آنگاه با

$$Q = CV = (2 \times 10^{-6} F)(36 V) = 72 \times 10^{-6} C = 72 \mu C$$

استفاده از رابطه ۱۲-۱ می‌توان نوشت:

## خوب است بدانید: بطری لیدن<sup>۱</sup>



بطری لیدن، قدیمی‌ترین نوع خازن است که در میانه سده هجدهم در شهر لیدن که امروزه در هلند واقع شده است، ساخته شد. در یک نوع ابتدایی، این خازن از یک بطری شیشه‌ای ساخته شده است که سطح درونی و بیرونی آن با ورقه نازک قلع پوشیده شده است. ورقه درونی توسط سیم یا زنجیری فلزی به میله فلزی ثابت داخل بطری اتصال دارد (شکل الف). امروزه برای باردار کردن بطری لیدن، روی بدنه فلزی و سر میله فلزی سوکت (جای فیش)‌هایی نصب شده است (شکل ب) که از طریق آنها، خازن توسط قطب‌های یک مولد ولتاژ بالا مانند مولد وان دوگراف یا مولد ویم‌چرست<sup>۲</sup> باردار می‌شود. ظرفیت یک بطری لیدن با اندازه متوسط از مرتبه ۱ nF است. آزمایش با بطری لیدن خطرناک است و باید تحت نظارت مربی یا دبیر محترم انجام شود.

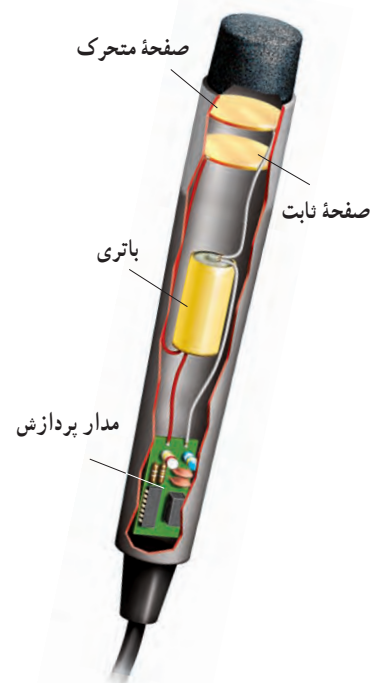
ظرفیت خازن تخت : آزمایش و محاسبه نشان می‌دهد که ظرفیت یک خازن تخت با مساحت

صفحه‌های  $A$  و فاصله جدایی صفحه‌های  $d$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید :

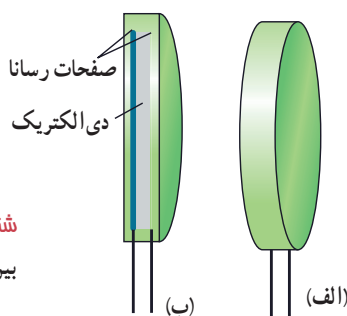
$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (۱۳-۱)$$

که در آن  $\epsilon_0$  همان ضریب گذردهی الکتریکی خلأ ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ) است. مثالی کاربردی از این رابطه، میکروفون خازنی است که بر اثر تغییر ظرفیت یک خازن تخت سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کند (شکل ۱-۳۶).

حال اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با ماده‌ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن دی‌الکتریک گفته می‌شود پر کنیم (شکل ۱-۳۷) برای ظرفیت خازن چه پیش می‌آید؟ مایکل فاراده نخستین بار در سال ۱۸۳۷ میلادی، با استفاده از وسایل ساده‌ای دریافت که ظرفیت خازن با ضریبی موسوم به ثابت دی‌الکتریک ماده عایق (که آن را با  $k$  نشان می‌دهند) افزایش می‌یابد؛ یعنی اگر ظرفیت



**شکل ۱-۳۶** در یک میکروفون خازنی، با ارتعاش صفحه متحرک (دیافراگم) خازن بر اثر صدا، فاصله صفحه‌های خازن تغییر می‌کند. بنابراین ظرفیت خازن تخت تغییر می‌کند که به ایجاد یک سیگنال الکتریکی می‌انجامد.



**شکل ۱-۳۷** الف) بیرون و ب) درون یک خازن که بین صفحه‌های فلزی آن لایه عایقی قرار گرفته است.

۱- Leyden jar

۲- Wimshurst Machine

۳- از حروف الفبای یونانی که کاها خوانده می‌شود.

جدول ۱-۳- ثابت دی الکتریک برخی عایق‌ها در دمای  $20^{\circ}\text{C}$

ماده دی الکتریک	ثابت دی الکتریک
هوای 1 atm	1/0006
تفلون	2/1
پارافین	2/2
پلی استیرن	2/6
میلار	3/1
پی وی سی	3/4
کاغذ	3/5
کوارتز	4/3
شیشه پیرکس	5
میکا	7
آب خالص	80
تیتانید استرانسیوم	310

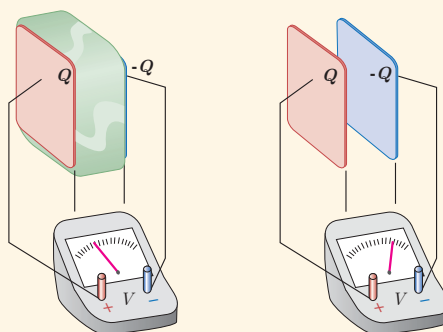
خازن بدون دی الکتریک را با  $C_0$  نمایش دهیم، آن‌گاه ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر است با

$$C = \kappa C_0 \quad (1-14)$$

جدول ۱-۳ ثابت دی الکتریک چند ماده عایق را نشان می‌دهد.

### پرسش ۱-۸

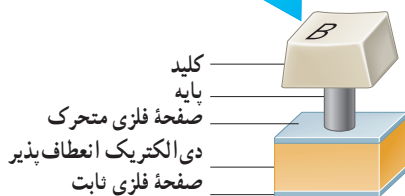
در شکل زیر صفحه‌های باردار یک خازن تخت را که بین آنها هواست، به ولت‌سنج وصل می‌کنیم. با وارد کردن دی الکتریک در بین صفحه‌ها، اختلاف پتانسیل دو صفحه کاهش می‌یابد. علت آن را توضیح دهید (توجه کنید که این آزمایش با بیشتر ولت‌سنج‌های معمولی و رایج ممکن نیست).



### مثال ۱-۱۴



(الف)



(ب)

برخی از صفحه کلیدهای رایانه (شکل الف) بر مبنای تغییر ظرفیت خازن عمل می‌کنند. هر کلید این صفحه به یک سر پایه‌ای نصب شده است که سر دیگر آن به یک صفحه فلزی متحرک متصل است. این صفحه فلزی خود توسط یک دی الکتریک انعطاف پذیر از صفحه فلزی ثابتی جدا شده است و در واقع این دو صفحه یک خازن تخت را تشکیل می‌دهند (شکل ب). با فشار دادن کلید، صفحه متحرک به صفحه ثابت نزدیک می‌شود و ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. این تغییر ظرفیت به صورت سیگنالی الکتریکی توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود و بدین ترتیب، مشخص می‌شود که کدام کلید فشار داده شده است.

فاصله بین صفحه‌ها عموماً  $5/00 \times 10^{-2}\text{m}$  است که این فاصله با فشار دادن کلید به  $10^{-3}\text{m} \times 150^{\circ}$  می‌رسد. مساحت صفحه‌ها  $9/50 \times 10^{-5}\text{m}^2$  است و خازن از ماده‌ای با ثابت دی الکتریک  $3/50^{\circ}$  پر شده است. تغییر ظرفیتی که با فشار دادن کلید، توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود چقدر است؟

**پاسخ:** با استفاده از رابطه‌های ۱۳-۱ و ۱۴-۱ ظرفیت خازن پیش از فشار دادن کلید برابر است با

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} = \frac{3}{5} \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \left( \frac{9/50 \times 10^{-5} \text{ m}^2}{5/100 \times 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$= 0.589 \times 10^{-12} \text{ F} = 0.589 \text{ pF}$$

پس از فشردن شدن کلید، فاصله بین صفحه‌ها به  $10^{-3} \text{ m} \times 150$  می‌رسد و با محاسبه‌ای مشابه به  $C = 19/6 \times 10^{-12} \text{ F} = 19/6 \text{ pF}$  می‌رسیم. بنابراین، تغییر ظرفیت خازن که به صورت سیگنالی آشکار می‌شود از تفاضل دو مقدار بالا به دست می‌آید:

$$\Delta C = 19/6 \text{ pF} - 0.589 \text{ pF} = 19/0 \text{ pF}$$

## فعالیت ۱-۸



در حسگر کیسه هوای برخی از خودروها از یک خازن استفاده می‌شود. درباره چگونگی عملکرد این حسگرها تحقیق کنید و نتیجه آن را به کلاس گزارش دهید.

**فروریزش الکتریکی:** اثر دیگر حضور دی الکتریک‌ها در خازن، افزایش حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن است. اگر اختلاف پتانسیل دو صفحه یک خازن را به اندازه کافی زیاد کنیم، تعدادی از الکترون‌های اتم‌های ماده دی الکتریک، توسط میدان الکتریکی ایجاد شده بین دو صفحه، کنده می‌شوند و مسیرهایی رسانا درون دی الکتریک<sup>۱</sup> ایجاد می‌شود (شکل ۳۸-۱) که سبب تخلیه خازن می‌گردد. به این پدیده **فروریزش الکتریکی**<sup>۲</sup> ماده دی الکتریک می‌گویند. فروریزش الکتریکی در عایق بین دو صفحه خازن‌ها معمولاً، با ایجاد یک جرقه همراه است و در بیشتر مواقع خازن را می‌سوزاند. خازن‌ها معمولاً با مقدار ظرفیت آنها و اختلاف پتانسیل بیشینه‌ای که می‌توانند تحمل کنند مشخص می‌شوند (شکل ۳۹-۱).



**شکل ۳۸-۱** نقش‌های لیچنبرگ. فروریزش الکتریکی باعث تشکیل مسیرهایی رسانشی سرخس شکلی در دی الکتریک شده است.

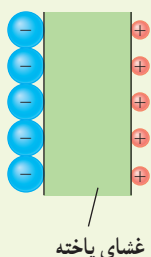
**شکل ۳۹-۱** تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل بیشینه قابل تحمل نوشته شده است.



۱- موسوم به نقش‌های لیچنبرگ (Lichtenberg)



## تمرین ۱۱-۱

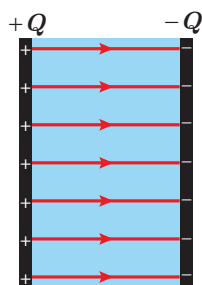


یک یاختهٔ عصبی (نورون) را می‌توان با یک خازن تخت مدل‌سازی کرد، به طوری که غشای سلول به عنوان دی الکتریک و یون‌های باردار با علامت مخالف که در دو طرف غشا هستند به عنوان بارهای روی صفحه‌های خازن عمل کنند (شکل روبه‌رو). ظرفیت یک سلول عصبی و تعداد یون‌های لازم (بافرض آنکه هر یون یک بار یونیده باشد)، برای آنکه یک اختلاف پتانسیل  $85\text{mV}$  ایجاد شود چقدر است؟ فرض کنید غشا دارای ثابت دی الکتریک  $\kappa = 3$ ، ضخامت  $1\text{ nm}$  و مساحت سطح  $1\text{ m}^2 \times 10^{-10}$  است.

## فعالیت ۹-۱

خازن‌ها انواع متعددی دارند؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند. دربارهٔ خازن‌های مختلف مانند خازن‌های ورقه‌ای، میکا، سرامیکی، الکتrolیتی، خازن‌های متغیر، اَبَرخازن‌ها و ظرفیت آنها تحقیق کنید. هر گروه می‌تواند روی یک نوع خازن تحقیق کند.

## ۱۱-۱ انرژی خازن



وقتی صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شوند در خازن انرژی ذخیره می‌شود. برای اینکه انرژی ذخیره‌شده در خازن را مشاهده کنیم، کافی است دو سر یک خازن پر شده را به دو سر یک لامپ کوچک وصل کنیم. به شرط آنکه ظرفیت و اختلاف پتانسیل خازن به اندازهٔ کافی زیاد باشد، لامپ برای مدتی روشن و سپس خاموش می‌شود.

این انرژی به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی فضای بین صفحه‌های خازن ذخیره می‌شود (شکل ۱-۴). می‌توان نشان داد انرژی پتانسیل ذخیره شده در خازن برابر است با

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (15-1)$$

شکل ۱-۴ انرژی در میدان الکتریکی بین صفحات خازن ذخیره می‌شود.

که در آن انرژی پتانسیل الکتریکی خازن ( $U_{\text{خازن}}$ ) برحسب ژول (J)، بار خازن ( $Q$ ) برحسب کولن (C)، اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ خازن ( $V$ ) برحسب ولت (V) و ظرفیت خازن ( $C$ ) برحسب فاراد (F) است.

## مثال ۱۵-۱



مدار یک فلاش عکاسی، انرژی را با ولتاژ  $330\text{ V}$ ، در یک خازن  $660\text{ }\mu\text{F}$ ، ذخیره می‌کند. الف) چه مقدار انرژی الکتریکی در این خازن ذخیره می‌شود؟ ب) اگر تقریباً همهٔ این انرژی در مدت  $1\text{ ms}$  آزاد شود، توان متوسط خروجی فلاش چقدر است؟

**پاسخ:** با توجه به رابطه ۱-۱۵ داریم

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (660 \times 10^{-6} \text{F}) (330 \text{V})^2 = 35/9 \text{ J}$$

با توجه به تعریف توان داریم:

$$P = \frac{U}{t} = \frac{35/9 \text{ J}}{1/0 \times 10^{-3} \text{ s}} = 3/6 \times 10^4 \text{ J/s} = 36 \text{ kW}$$

که این در تأیید گفته‌ای است که در ابتدای بخش ۱-۱۰ در مورد خازن بیان کردیم و گفتیم یک خازن باردار می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار بیشتری از یک باتری برای فلاش دوربین مهیا کند.

### مثال ۱-۱۶: دستگاه رفع لرزش نامنظم قلب (دیفیبریلاتور)



توانایی خازن برای ذخیره انرژی پتانسیل الکتریکی، اساس کار دستگاه‌های رفع لرزشی است که برای توقف لرزش بطنی افراد دچار حمله قلبی به کار می‌رود. در این بیماری، انقباض و انقباض ناهماهنگ قلب باعث می‌شود خون به درستی به مغز فرستاده نشود. در این دستگاه یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود ۶kV باردار می‌کند. صفحه‌های رابط (کفشک‌ها) روی قفسه سینه بیمار قرار داده می‌شوند و خازن بخشی از انرژی ذخیره شده خود را از طریق کفشک‌ها به بدن بیمار منتقل می‌کند. هدف از این کار این است که قلب به طور موقت از کار بیفتد و پس از آن با آهنگ منظم و طبیعی خود به کار افتد.

اگر ظرفیت خازن این دستگاه  $11/0 \mu\text{F}$  باشد و با ولتاژ  $6/0 \text{ kV}$  شارژ شود و سپس تمام انرژی آن از طریق کفشک‌ها به درون بدن بیمار تخلیه شود،

الف) چقدر انرژی در بدن بیمار تخلیه شده است؟ ب) چه مقدار بار الکتریکی از بدن بیمار عبور کرده است؟ پ) اگر تخلیه انرژی تقریباً در مدت  $2/0 \text{ ms}$  صورت پذیرفته باشد این انرژی با چه توان متوسطی در بدن بیمار تخلیه شده است؟

**پاسخ:** الف) انرژی ذخیره شده در خازن با استفاده از رابطه ۱-۱۵ به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (11/0 \times 10^{-6} \text{F}) (6/00 \times 10^3 \text{V})^2 = 198 \text{ J}$$

که با توجه به فرض مسئله این همان انرژی تخلیه شده در بدن بیمار است.

ب) بار اولیه روی صفحات خازن برابر است با

$$Q = CV \Rightarrow Q = (11/0 \times 10^{-6} \text{F}) (6/00 \times 10^3 \text{V}) = 6/60 \times 10^{-2} \text{ C}$$

با توجه به فرض مسئله، این همان باری است که از بدن بیمار عبور کرده است.

پ) توان متوسط انرژی تخلیه شده در بدن بیمار برابر است با

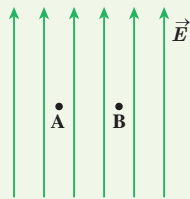
$$P = \frac{U}{t} = \frac{198 \text{ J}}{2/00 \times 10^{-3} \text{ s}} = 99/0 \text{ kW}$$

۶ در شکل روبه‌رو، دو گوی مشابه به جرم  $2/5g$  و بار یکسان مثبت  $q$  در فاصله  $1/0\text{ cm}$  از هم قرار دارند، به طوری که گوی بالایی به حالت معلق مانده است. الف) اندازه بار  $q$  را به دست آورید. ب) تعداد الکترون‌های کنده شده از هر گوی چقدر است؟



### ۴-۱، ۵-۱ و ۶-۱ میدان الکتریکی، میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار و خطوط میدان الکتریکی

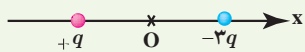
۷ یک ذره باردار را یک بار در نقطه  $A$  و بار دیگر در نقطه  $B$  قرار می‌دهیم. نیرویی که از طرف میدان الکتریکی بر این ذره باردار در این دو نقطه وارد می‌شود را مقایسه کنید.



۸ هسته اتم آهن شعاعی در حدود  $10^{-15}\text{ m}$  دارد و تعداد پروتون‌های آن ۲۶ عدد است. الف) بزرگی نیروی دافعه بین دو پروتون این هسته که به فاصله  $10^{-15}\text{ m}$  از هم قرار دارند چقدر است؟ ب) اندازه میدان الکتریکی ناشی از هسته در فاصله  $10^{-10}\text{ m}$  از مرکز هسته چقدر است؟

۹ شکل زیر، دو ذره باردار را نشان می‌دهد که در جای خود روی محور  $x$  ثابت شده‌اند. بارها در فاصله یکسان  $a$  از مبدأ مختصات (نقطه  $O$ ) قرار دارند.

الف) در کجای این محور (غیر از بی نهایت) نقطه‌ای وجود دارد که در آنجا میدان الکتریکی برابری با صفر است؟ ب) بزرگی و جهت میدان الکتریکی برابری در مبدأ مختصات را بیابید.



۱۰ در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی  $5/0 \times 10^5\text{ N/C}$  که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره بارداری به جرم  $2/0\text{ g}$  معلق و به حال سکون قرار دارد. اگر  $g = 10\text{ N/kg}$  باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.

### ۱-۱ و ۲-۱ بار الکتریکی، پایستگی و کوانتیده بودن بار

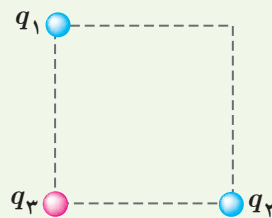
۱ یک میله پلاستیکی را با پارچه پشمی مالش می‌دهیم. پس از مالش، بار الکتریکی میله پلاستیکی  $12/8\text{ nC}$  می‌شود. الف) بار الکتریکی ایجاد شده در پارچه پشمی چقدر است؟ ب) تعداد الکترون‌های منتقل شده از پارچه پشمی به میله پلاستیکی را محاسبه کنید.

۲ الف) بار الکتریکی اتم و هسته اتم کربن ( $^{12}\text{C}$ ) چند کولن است؟ ب) بار الکتریکی اتم کربن یک بار یونیده ( $\text{C}^+$ ) چقدر است؟

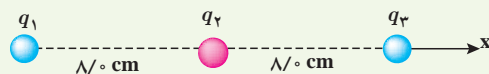
### ۳-۱ قانون کولن

۳ دو گوی رسانا، کوچک و یکسان به بارهای  $q_1 = 4/0\text{ nC}$  و  $q_2 = -6/0\text{ nC}$  را با هم تماس می‌دهیم و سپس تا فاصله  $r = 3/0\text{ cm}$  از هم دور می‌کنیم. نیروی برهم کنش الکتریکی بین دو گوی را محاسبه کنید. این نیرو رانشی است یا ربایشی؟

۴ سه ذره باردار  $q_1$ ،  $q_2$  و  $q_3$  مطابق شکل در سه رأس مربعی به ضلع  $3\text{ m}$  ثابت شده‌اند. اگر  $q_1 = q_2 = -5\text{ }\mu\text{C}$  و  $q_3 = +2\text{ }\mu\text{C}$  باشد، نیروی خالص الکتریکی وارد بر بار  $q_3$  را برحسب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  تعیین کنید.



۵ بارهای الکتریکی نقطه‌ای  $q_1 = -4/0\text{ nC}$ ،  $q_2 = +5/0\text{ nC}$  و  $q_3 = -4/0\text{ nC}$  مطابق شکل، در جای خود ثابت شده‌اند. نیروی خالص الکتریکی وارد بر هر یک از بارهای  $q_1$  و  $q_2$  را محاسبه کنید.



۱۴ بادکنک باردار شکل زیر را به آب نزدیک کرده‌ایم. توضیح دهید چرا آب به جای اینکه به طور قائم فرو ریزد، خمیده می‌شود؟

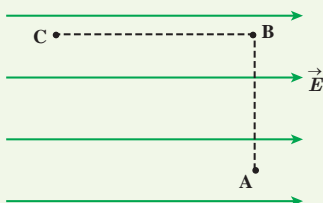


### ۷-۱ و ۸-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی و پتانسیل الکتریکی

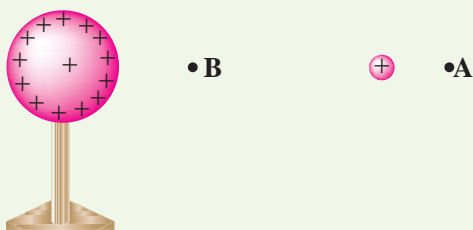
۱۵ مطابق شکل زیر، بار  $q = +5 \text{ nC}$  را در میدان الکتریکی یکنواخت  $10^5 \text{ N/C}$  نخست از نقطه A تا نقطه B و سپس تا نقطه C جابه‌جا می‌کنیم. اگر  $AB = 0.2 \text{ m}$  و  $BC = 0.4 \text{ m}$  باشد، مطلوب است:

(الف) نیروی الکتریکی وارد بر بار  $q$ ،

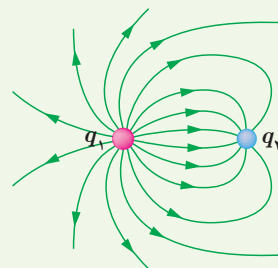
(ب) کاری که نیروی الکتریکی در این جابه‌جایی انجام می‌دهد،  
(پ) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$  در این جابه‌جایی.



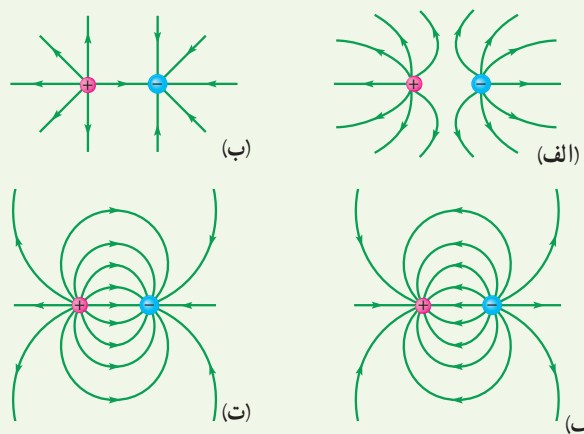
۱۶ در شکل زیر ذره باردار مثبت و کوچکی را از نقطه A به سمت کره باردار که روی پایه عایقی قرار دارد، نزدیک می‌کنیم و در نقطه B قرار می‌دهیم. (الف) در این جابه‌جایی، کار نیروی الکتریکی مثبت است یا منفی؟ (ب) انرژی پتانسیل ذره باردار در این جابه‌جایی چگونه تغییر می‌کند؟ (پ) پتانسیل نقطه‌های A و B را با هم مقایسه کنید.



۱۱ خطوط میدان الکتریکی برای دو کره رسانای باردار کوچک در شکل زیر نشان داده شده است. نوع بار هر کره را تعیین کرده و اندازه آنها را مقایسه کنید.



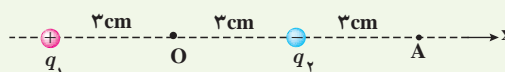
۱۲ در شکل‌های زیر، اندازه دو بار، یکسان ولی علامت آنها مخالف هم است. کدام آرایش‌های خطوط میدان نادرست است؟ دلیل آن را توضیح دهید.



۱۳ دو بار الکتریکی نقطه‌ای غیرهمنام  $q_1 = +1 \text{ nC}$  و  $q_2 = -1 \text{ nC}$  مطابق شکل زیر به فاصله  $6 \text{ cm}$  از یکدیگر قرار دارند.

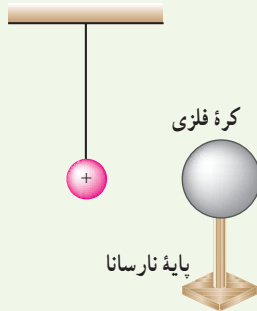
(الف) جهت و اندازه میدان الکتریکی را در نقطه‌های O و A به دست آورید.

(ب) آیا بر روی محور، نقطه‌ای وجود دارد که میدان خالص در آن صفر شود؟



### ۹-۱ توزیع بار الکتریکی در اجسام رسانا

۲۰ یک کره فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه نارسانایی قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می‌کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می‌افتد.



### ۱۰-۱ خازن

۲۱ اگر ساختمان یک خازن را تغییر ندهیم، در هریک از شرایط زیر ظرفیت خازن چگونه تغییر می‌کند؟  
الف) بار آن دو برابر شود.

ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌های آن سه برابر شود.

۲۲ اختلاف پتانسیل بین دو صفحه یک خازن را از ۲۸ ولت به ۴۰ ولت افزایش می‌دهیم. اگر با این کار ۱۵ میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

۲۳ ظرفیت یک خازن تخت با فاصله صفحات  $1/0 \text{ mm}$  که بین صفحه‌های آن هوا قرار دارد، برابر  $1/0 \text{ F}$  است. مساحت صفحه‌های این خازن چقدر است؟ از این مسئله چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

۲۴ یک خازن تخت به یک باتری بسته شده است تا باردار شود. پس از مدتی، درحالی که باتری همچنان به خازن متصل است، فاصله بین صفحه‌های خازن را دو برابر می‌کنیم. کدام یک از موارد زیر درست است؟

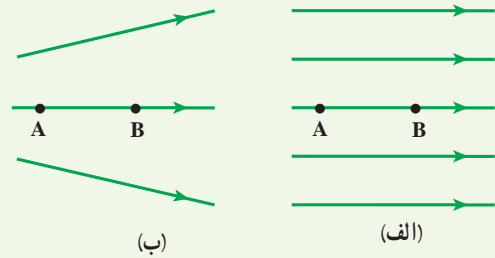
الف) میدان الکتریکی میان صفحه‌ها نصف می‌شود.

ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌ها نصف می‌شود.

پ) ظرفیت خازن دو برابر می‌شود.

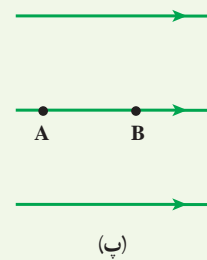
ت) بار روی صفحه‌ها تغییر نمی‌کند.

۱۷ شکل زیر سه آرایش خطوط میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. در هر آرایش، یک پروتون از حالت سکون در نقطه A رها می‌شود و سپس توسط میدان الکتریکی تا نقطه B شتاب می‌گیرد. نقطه‌های A و B در هر سه آرایش در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. در کدام شکل سرعت پروتون در نقطه B بیشتر است؟ توضیح دهید.



(ب)

(الف)



(ب)

۱۸ دو صفحه رسانا با فاصله  $2/0 \text{ cm}$  را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را به اختلاف پتانسیل  $100 \text{ V}$  وصل می‌کنیم. در نتیجه، یکی از صفحه‌ها به طور منفی و دیگری به طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی به وجود می‌آید. اندازه این میدان الکتریکی را حساب کنید و با توجه به جهت خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه توضیح دهید که کدام یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیشتری دارند.

۱۹ بار الکتریکی  $q = -4.0 \text{ nC}$  از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی  $V_1 = -4.0 \text{ V}$  تا نقطه‌ای با پتانسیل  $V_2 = -1.0 \text{ V}$  آزادانه جابه‌جا می‌شود. الف) انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$  چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟ ب) با توجه به قانون پایستگی انرژی، در مورد چگونگی تبدیل انرژی بار  $q$  در این جابه‌جایی توضیح دهید.

دو صفحه را به هم وصل کنیم، آیا جرقه حاصل بزرگ‌تر از قبل می‌شود، یا کوچک‌تر و با تغییری نمی‌کند؟ توضیح دهید.

۲۷ ظرفیت خازن تختی  $2 \text{ nF}$  و بار الکتریکی آن  $18 \text{ nC}$  است.

الف) انرژی ذخیره‌شده در این خازن چقدر است؟  
 ب) بین صفحات خازن هواست. خازن را از باتری جدا و فاصله بین صفحه‌های آن را دو برابر می‌کنیم. انرژی ذخیره‌شده در خازن چقدر افزایش می‌یابد؟

۲۵ مساحت هریک از صفحه‌های خازن تختی،  $1/00 \text{ m}^2$  و فاصله دو صفحه از هم،  $500 \text{ mm}$  است. عایقی با ثابت دی‌الکتریک  $4/9$  بین دو صفحه قرار داده شده است. ظرفیت خازن را تعیین کنید.

### ۱۱-۱ انرژی خازن

۲۶ دو صفحه خازن تخت بارداری را به هم وصل می‌کنیم. در نتیجه جرقه‌ای زده می‌شود. حال اگر دوباره صفحات را به همان اندازه باردار کنیم ولی فاصله آنها را دو برابر کنیم و سپس

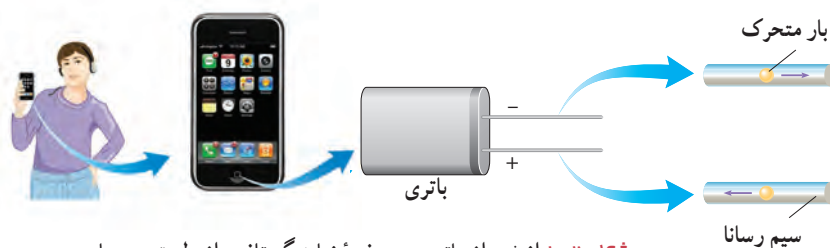
# جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



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

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

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

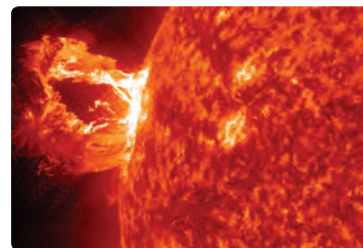


شکل ۲-۱ انرژی از باتری به صفحه نمایشگر تلفن، از طریق سیم‌های رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند، منتقل می‌شود.

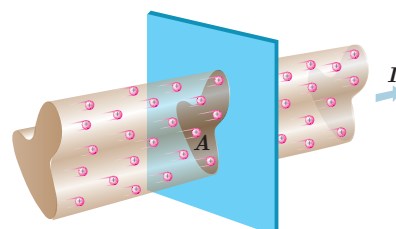
اکنون با این پرسش شروع می‌کنیم که چرا هر مجموعه‌ای از بارهای متحرک لزوماً جریان الکتریکی ایجاد نمی‌کنند؟ در واقع برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم، باید یک انتقال خالص بار از یک سطح مقطع معین رخ دهد (شکل ۲-۳) که به این منظور نیاز به ابزاری مانند باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را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

## ۲-۱ جریان الکتریکی

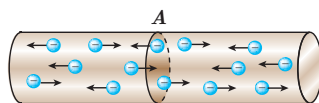
جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همه بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. برای داشتن جریان الکتریکی باید یک شارش خالص بار از یک سطح مقطع معین داشته باشیم. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. الکترون‌های آزاد در طول این سیم با تندی‌هایی از مرتبه  $10^6 \text{ m/s}$  در حرکت‌اند، ولی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



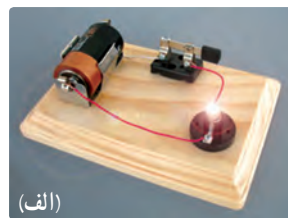
شکل ۲-۲ فوران عظیمی از الکترون‌ها و یون‌ها که از سطح خورشید پرتاب می‌شوند.



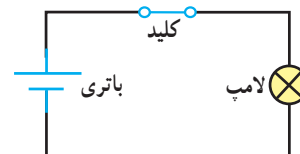
شکل ۲-۳ باریکه‌ای از بارهای مثبت از سطح مقطع  $A$  می‌گذرند و جریان  $I$  را ایجاد می‌کنند.



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



(الف)

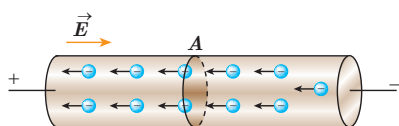


(ب)

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

۱- drift velocity





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

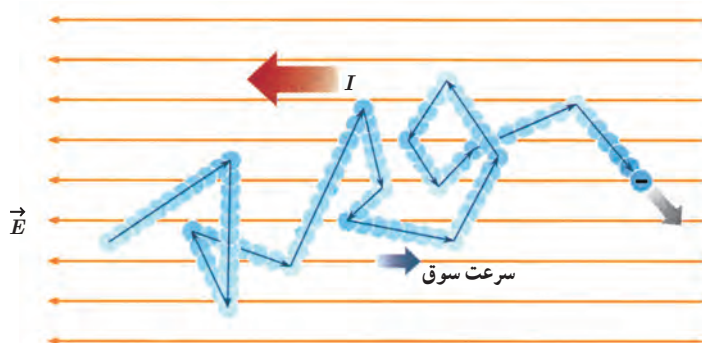


آندره ماری آمپر (۱۸۳۶-۱۷۷۵م)

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

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

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



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

## فعالیت ۲-۱

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

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

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1-2)$$

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

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

۱- در واقع، هر بخش این مسیر زیگزاگ اندکی خمیده است که در شکل برای سادگی نشان داده نشده است.  
۲- به‌خاطر سپردن این مقادیر ضرورتی ندارد.

## مثال ۲-۱



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

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

$$\Delta q = I(\Delta t) = (0.017 \times 10^{-3} A)(3/6 \times 10^3 s) = 0.61 C$$

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

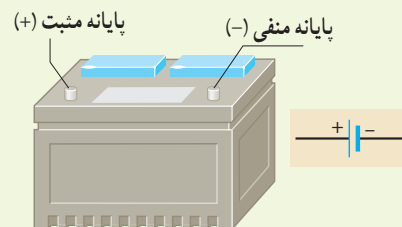
$$\Delta U = q \Delta V = (0.61 C)(3/0 V) = 1.8 J$$

## تمرین ۲-۱

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

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

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



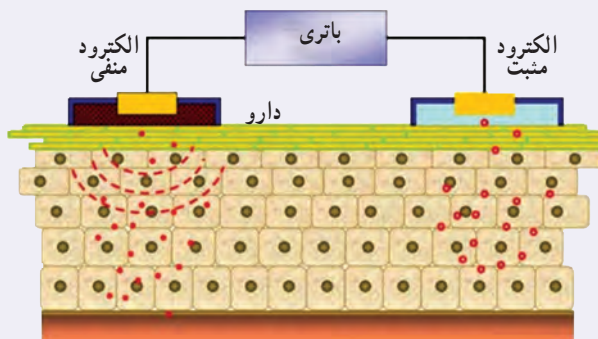
## خوب است بدانید: یون‌رانی

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

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



(ب)



(الف)

## ۲-۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم

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

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

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

در این رابطه مقاومت الکتریکی ( $R$ ) بر حسب ولت بر آمپر ( $V/A$ ) می‌شود که به پاس خدمات علمی **جرج سیمون اهم** به نام **اهم** نام‌گذاری شده است و با نماد  $\Omega$  نشان داده می‌شود. رسانایی را که دارای مقاومت الکتریکی است، اصطلاحاً **مقاومت**<sup>۲</sup> می‌نامند و آن را در مدارهای الکتریکی با نماد  $\text{---}\text{---}$  نمایش می‌دهند.



### جورج سیمون اهم (۱۸۵۴-۱۷۸۷م)

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

۱- Resistance

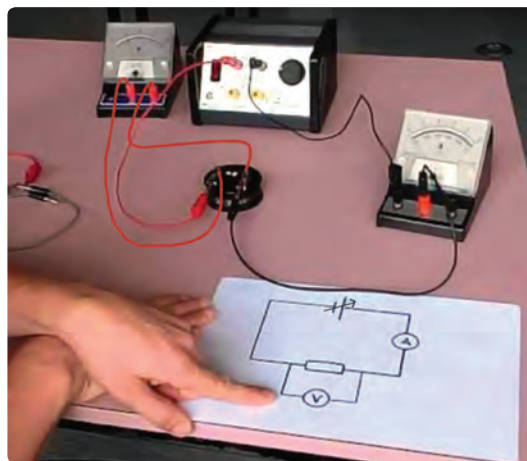
۲- Resistor

۲- از حروف الفبای یونانی که امگا خوانده می‌شود.

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

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

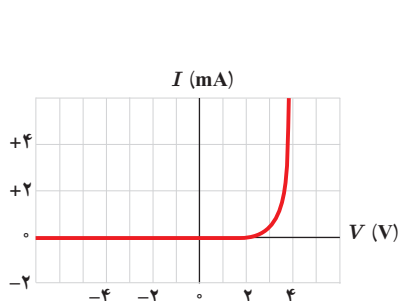
با این حال وسیله‌های زیادی نیز یافت می‌شود که از این قانون پیروی نمی‌کنند. یکی از این وسیله‌های غیراهمی، دیود نورگسیل (LED) است که با آن بعداً آشنا می‌شویم. نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل چنین دیودی تقریباً شبیه شکل ۲-۱۰ است.



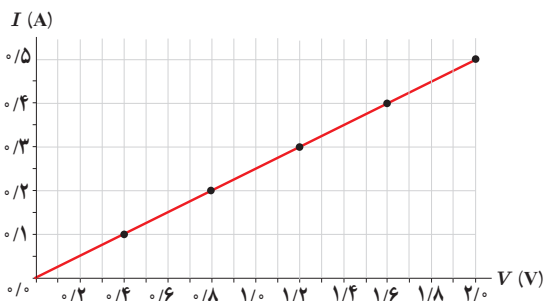
**شکل ۲-۸** اسباب تحقیق قانون اهم. توجه کنید که آمپرسنج در مدار به‌صورت متوالی و ولت‌سنج به‌صورت موازی بسته شده است.

**جدول ۲-۱** مقادیری نوعی برای یک رسانای اهمی

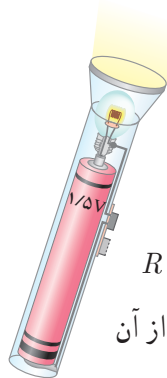
$R (\Omega)$ مقاومت	$I (A)$ جریان	$V (V)$ اختلاف پتانسیل
۴	۰/۱	۰/۴
۴	۰/۲	۰/۸
۴	۰/۳	۱/۲
۴	۰/۴	۱/۶
۴	۰/۵	۲/۰



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



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



یک لامپ چراغ قوه کوچک از یک باتری ۱/۵V، جریانی برابر  $30\text{mA}$  می‌کشد. با فرض آنکه رشته لامپ، یک رسانای اهمی باشد، الف) مقاومت آن چقدر است؟ ب) اگر باتری ضعیف شود و ولتاژ به ۱/۲V افت کند، جریان چقدر می‌شود؟

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

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1/5\text{V}}{0/30\text{A}} = 5/0\Omega$$

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

چنین می‌شود:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1/2\text{V}}{5/0\Omega} = 0/24\text{A}$$

### ۳-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

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

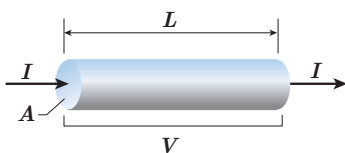
آزمایش و محاسبات نظری نشان می‌دهد اگر سطح مقطع جسم در تمام طول آن یکسان باشد (شکل ۱۱-۲)، مقاومت آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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

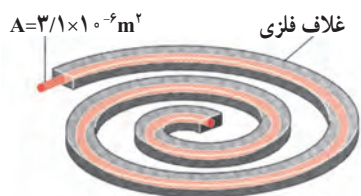
مقاومت ویژه یک ماده به ساختار اتمی و دمای آن بستگی دارد. رساناهای الکتریکی خوب مقاومت ویژه بسیار کم و عایق‌های خوب مقاومت ویژه بسیار زیادی دارند. جدول ۲-۲ مقاومت ویژه برخی مواد را در دمای  $20^\circ\text{C}$  نشان می‌دهد. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد دسته‌ای از مواد مانند ژرمانیم و سیلیسیم نیز وجود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

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



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

## مثال ۲-۲



یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

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

پاسخ:

با استفاده از رابطه ۲-۲ مقاومت سیم در دمای  $32^\circ\text{C}$  برابر است با<sup>۱</sup>

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

و در دمای  $42^\circ\text{C}$  برابر است با

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

## تمرین ۲-۲

سیم کشی خانه‌ها معمولاً با سیم‌های مسی‌ای صورت می‌گیرد که قطری برابر با  $2/0.32\text{mm}$  دارد. مقاومت  $10\text{m}$  از این سیم‌ها در دمای اتاق چقدر است؟

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

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

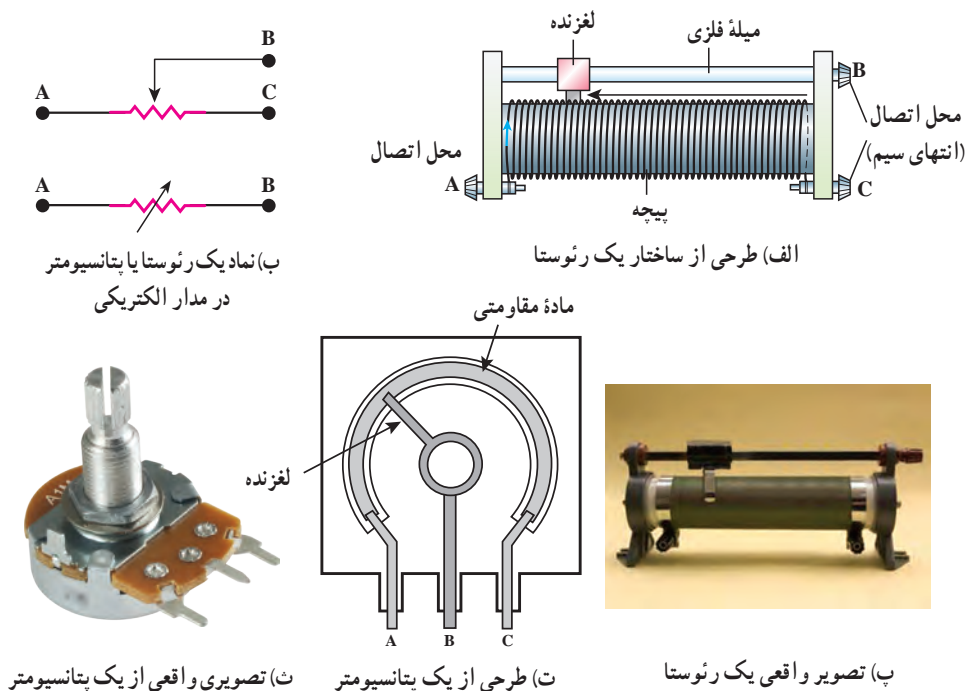
ماده	مقاومت ویژه $\rho$ ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
رسانای فلزی	
نقره	$1/6 \times 10^{-8}$
مس	$1/7 \times 10^{-8}$
طلا	$2/4 \times 10^{-8}$
آلومینیم	$2/8 \times 10^{-8}$
تنگستن	$5/5 \times 10^{-8}$
آهن	$9/7 \times 10^{-8}$
پلاتین	$10 \times 10^{-8}$
سرب	$22 \times 10^{-8}$
کُنستانان <sup>۱</sup>	$44 \times 10^{-8}$
نیکروم <sup>۲</sup>	$100 \times 10^{-8}$
نیم‌رسانا	
گرافیت	$3/5 \times 10^{-5}$
ژرمانیم	$0/46$
سیلیسیم خالص	$2/5 \times 10^2$
عایق	
انواع شیشه	$10^{12} - 10^{14}$
لاستیک سخت	$10^{13}$
کوارتز (ذوب شده)	$10^{16}$

۱-  $60^\circ$  درصد مس،  $40^\circ$  درصد نیکل،  $59-2^\circ$  درصد نیکل،  $23^\circ$  درصد مس،  $16^\circ$  درصد کرم و ...

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

۲- Rheostat

۳- Potentiometer



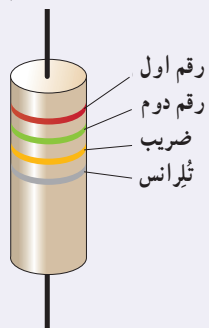
شکل ۲-۱۲

### خوب است بدانید

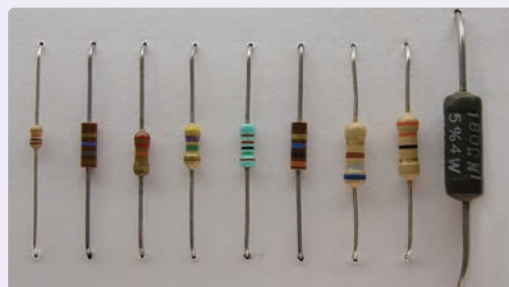
#### مقاومت‌های ترکیبی

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

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



(ب) مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل  $25k\Omega$  با تولرانس  $10^\circ$  درصد است.



(الف) تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی

<sup>۱</sup> composition resistors

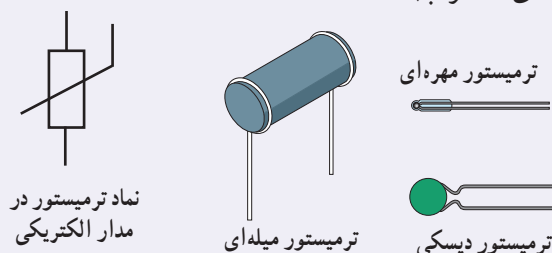
است به صورت  $10^n$  که در ستون سوم جدول مشخص شده است. حلقه چهارم یک حلقه طلایی یا نقره‌ای رنگ است که **تولرانس**<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت را برحسب درصد مشخص می‌کند (شکل ب). نبود نوار چهارم به معنای آن است که تولرانس  $20^\circ$  درصد است. برای خواندن حلقه‌های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

### مقاومت‌های خاص و دیوده‌ها

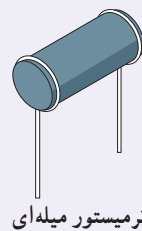
۱- **ترمیستور**<sup>۲</sup>: ترمیستور نوعی از مقاومت است که بستگی مقاومت الکتریکی آن به دما با مقاومت‌های الکتریکی معمولی تفاوت دارد. اغلب از ترمیستورها به عنوان حسگر دما در مدارهای حساس به دما مانند زنگ خطر آتش و دماپاها و نیز در دماسنج‌ها استفاده می‌شود. ترمیستورها در ابعاد کوچکی ساخته می‌شوند و شکل‌های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



(ب) تصویری از چند ترمیستور دیسکی واقعی



نماد ترمیستور در مدار الکتریکی



ترمیستور میله‌ای

ترمیستور مهره‌ای



ترمیستور دیسکی

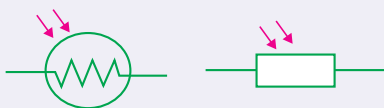
(الف) طرحی از چند ترمیستور و نماد آن در مدارهای الکتریکی

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

نور آفتاب روشنایی روز تاریکی



(پ) مقاومت بر حسب روشنایی برای یک LDR نوعی



(ث) نماد LDR در دو استاندارد متفاوت



(ت) تصویری از چند LDR

۱- Tolerance

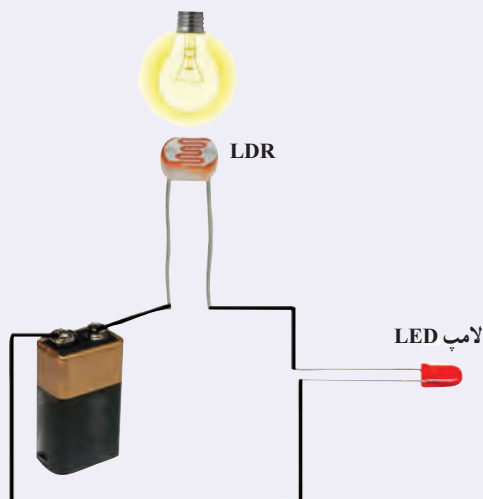
۲- Thermistor، برگرفته از عبارت Thermal Sensitive Resistor به معنای مقاومت حساس به دما.

۳- Photoresistor

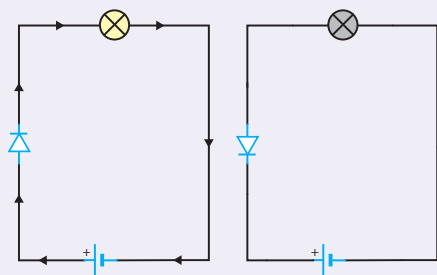
۴- Light Dependent Resistor

۵- Illumination





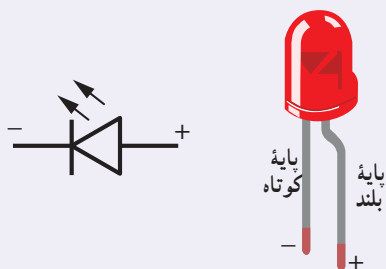
۲) یک مدار ساده متشکل از یک LDR، یک باتری، و یک لامپ LED. با روشن شدن چراغ روشنایی لامپ LED روشن می‌شود.



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



۴) تصویری از چند دیود نورگسیل



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

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

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

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

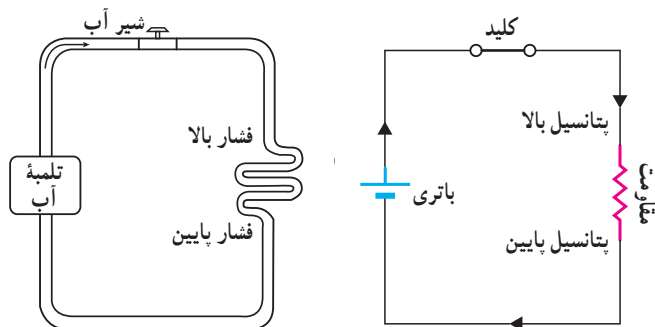
دیودها انواع متفاوتی دارند که یکی از معروف‌ترین آنها دیودهای نورگسیل یا LED<sup>۲</sup> است (شکل ح). شکل خ تصویری واضح از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد. در این دیودها از نیم‌رساناهایی استفاده می‌شود که با عبور جریان از آنها LED از خود نورگسیل می‌کند و بنابراین، مقداری از انرژی الکتریکی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

## ۲-۴ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

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



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



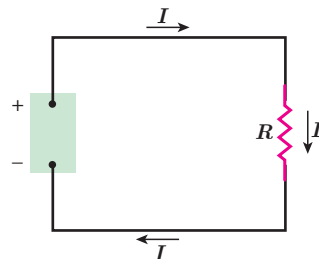
شکل ۲-۱۴ همان‌طور که تلمبه آب انرژی لازم برای شارش آب را فراهم می‌کند، باتری نیز انرژی لازم برای برقراری یک جریان را مهیا می‌سازد.

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

مدار ساده الکتریکی شکل ۲-۱۵ را در نظر بگیرید. منبع نیروی محرکه هنگام عبور بار  $\Delta q$  از منبع کاری به اندازه  $\Delta W$  روی آن انجام می‌دهد تا آن را در مدار به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی محرکه الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا آن را از پایانه با پتانسیل کمتر به پایانه با پتانسیل بیشتر ببرد، اصطلاحاً نیروی محرکه الکتریکی  $\mathcal{E}$  (emf) نامیده و با رابطه زیر تعریف می‌شود<sup>۲</sup>:

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

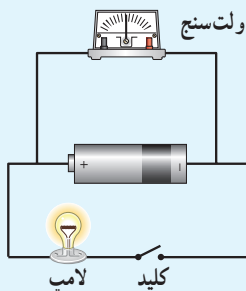
یکای کمیت نیروی محرکه الکتریکی همان یکای اختلاف پتانسیل الکتریکی، یعنی ولت (V) است ( $1V = 1J/1C$ ). پس اگر نیروی محرکه یک باتری مثلاً  $1/5V$  باشد، به این معناست که باتری روی هر کولن باری که از آن می‌گذرد  $1/5J$  کار انجام می‌دهد و به این ترتیب انرژی پتانسیل الکتریکی آن را  $1/5J$  افزایش می‌دهد.



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

<sup>۱</sup> - Electromotive Force

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



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

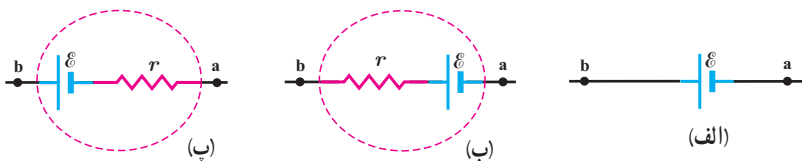
منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی، یا آرمانی هستند و یا واقعی. اختلاف پتانسیل پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع آرمانی برابر با نیروی محرکه الکتریکی  $\mathcal{E}$  آن است:

$$\Delta V = \mathcal{E} \quad (5-2)$$

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

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

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



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

$$V = \mathcal{E} - Ir \quad (6-2)$$

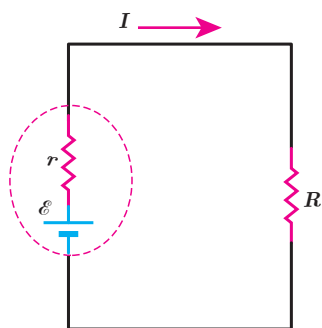
که در آن  $I$  جریان گذرنده از منبع است.

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

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

و بنابراین:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad (7-2)$$



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

### خوب است بدانید: ماهی الکتریکی



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

### خوب است بدانید: آثار تخریبی الکتریسیته بر بدن انسان

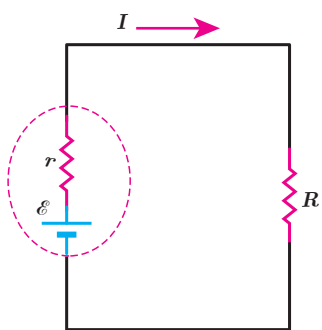
اثر جریان‌های الکتریکی بر بدن	
جریان	اثر
کمتر از ۰/۰۰۰۱A	جریان حس نمی‌شود.
۰/۰۰۰۱A	احساس سوزش یا گرما
۰/۰۰۱A تا ۰/۰۱A	انقباض غیرعادی عضله‌ها، احساس درد
۰/۰۱۵A	از دست رفتن کنترل عضله‌ها
۰/۰۷A	اگر از قلب بگذرد، سبب اختلال جدی می‌شود.
۰/۱۰A تا ۰/۵۰A	پرش عضله بطنی قلب
۰/۵۰A تا چند آمپر	ایست قلبی، اگر جریان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

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

دستگاه مرکزی اعصاب انسان در مقابل شوک‌های الکتریکی

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

مثال ۲-۴



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

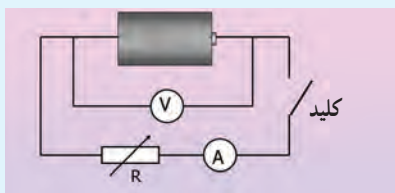
پاسخ: الف) بنا به رابطه ۲-۷ داریم:

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

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

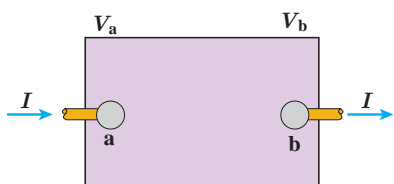
$$V = \mathcal{E} - Ir = 12V - (2/A)(2/\Omega) = 8V$$

فعالیت ۲-۳ (کار در کلاس)



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

۵-۲ توان در مدارهای الکتریکی



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

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

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

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

بنابراین داریم:

$$P = IV$$

(۲-۸)

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

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

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

در نتیجه:

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

### مثال ۲-۵

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

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

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

ب) انرژی مصرفی بخاری برابر  $Pt$  می‌شود که بر حسب یکاهای SI،  $P$  بر حسب وات ( $W$ )،  $t$  بر حسب ثانیه ( $s$ ) است و انرژی مصرفی بر حسب ژول ( $J$ ) می‌شود. اما برای محاسبه مصرف برق،  $P$  را بر حسب کیلووات ( $kW$ ) و  $t$  را بر حسب ساعت ( $h$ ) می‌گیرند. بنابراین، انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت ( $kWh$ ) می‌شود ( $1\text{ kWh} = 1000\text{ J} / 3600\text{ s} = 3/6 \times 10^6\text{ J}$ ). پس انرژی مصرفی بخاری در یک ماه، برابر است با

$$U = Pt = (2.2\text{ kW})(30 \times 24\text{ h}) = 198\text{ kWh}$$

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

$$\text{تومان} = (198\text{ kWh})(50\text{ تومان/kWh}) = 9900\text{ تومان}$$

### فعالیت ۲-۴



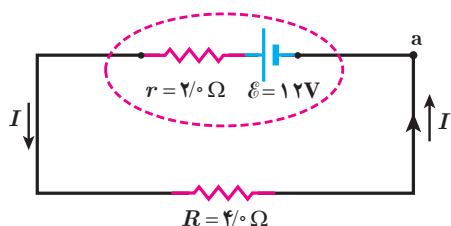
قانون ژول بیان می‌دارد گرمای تولید شده توسط جریان  $I$  عبوری از یک مقاومت  $R$  در مدت زمان  $t$  برابر با  $RI^2t$  است. این قانون را می‌توان به روش گرماسنجی با یک گرماسنج که در فیزیک دهم با آن آشنا شدید تحقیق کرد. اسباب این آزمایش در شکل نشان داده شده است. درباره چگونگی این آزمایش تحقیق کنید.

## فعالیت ۲-۵



همانند شکل با یک اهم متر، مقاومت رشته سیم داخل لامپ  $100\ \Omega$  را اندازه گیری کنید. سپس با استفاده از رابطه  $P_{\text{مصرفی}} = V^2/R$ ، و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. چرا مقدار اندازه گیری شده با مقدار محاسبه شده متفاوت است؟ نتیجه را پس از گفت و گوی گروهی، گزارش دهید.

## مثال ۲-۶



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

**پاسخ:** الف) نخست، جریان را با استفاده از رابطه  $2-7$  به دست می آوریم:

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

اکنون توان مصرفی مقاومت  $R$  چنین می شود:

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (4/0\Omega)(2/0\text{A})^2 = 16\text{W}$$

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

$$V_{\text{باتری}} = \mathcal{E} - Ir = 12/0\text{V} - (2/0\text{A})(2/0\Omega) = 8/0\text{V}$$

$$P_{\text{خروجی باتری}} = IV_{\text{باتری}} = (2/0\text{A})(8/0\text{V}) = 16\text{W}$$

## ۲-۶ ترکیب مقاومت ها

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

جایگزین کنیم. در این بخش به این موضوع می‌پردازیم و اینکه چگونه می‌توان مقاومت معادل ترکیبی از مقاومت‌ها را تعیین کرد.

به هم بستن متوالی مقاومت‌ها: شکل ۱۹-۲ سه مقاومت را نشان می‌دهد که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکه الکتریکی  $\mathcal{E}$  بسته شده‌اند. توجه کنید واژه «متوالی» ربط چندانی به چگونگی رسم مقاومت‌ها ندارد. «متوالی» به معنای بسته شدن مقاومت‌ها یکی پس از دیگری است، به طوری که هیچ انشعابی بین آنها وجود نداشته باشد و اختلاف پتانسیل  $V$  به دوسر این مجموعه از مقاومت‌ها اعمال شده باشد. در بستن متوالی مقاومت‌ها از همه مقاومت‌ها جریان یکسان  $I$  عبور می‌کند. به عبارتی اگر آمپرسنج‌هایی را در نقطه‌های مختلفی از این مدار قرار دهیم، همگی جریان یکسانی را نشان می‌دهند. مقاومت‌هایی را که به‌طور متوالی بسته شده‌اند می‌توان با یک مقاومت معادل  $R_{eq}$  جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دو سر مجموعه مقاومت‌ها و همان جریان  $I$  است.

اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دو سر مجموعه مقاومت‌ها، برابر با جمع اختلاف پتانسیل‌های دو سر مقاومت‌هاست:  $V = \mathcal{E} = V_1 + V_2 + V_3$ . اکنون به سراغ محاسبه جریان  $I$  می‌رویم. به کارگیری تعریف مقاومت الکتریکی ( $R = V/I$ ) برای هر یک از مقاومت‌ها و با توجه به برابر بودن

جریان آنها داریم:

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

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

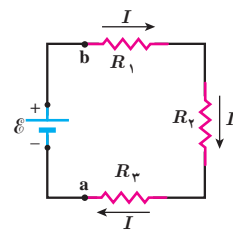
$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

با تعریف مقاومت معادل، به صورت

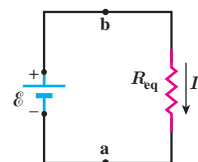
مدار شکل ۱۹-۲ را می‌توان با مدار معادل شکل ۲۰-۲ جایگزین کرد. بدیهی است که اگر به جای سه مقاومت،  $n$  مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آنها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (۱۰-۲)$$

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



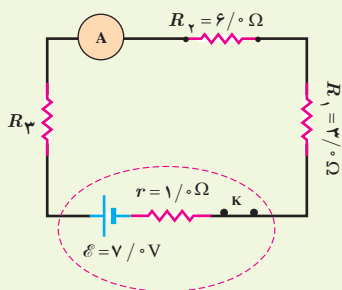
شکل ۱۹-۲ سه مقاومت که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده‌اند.



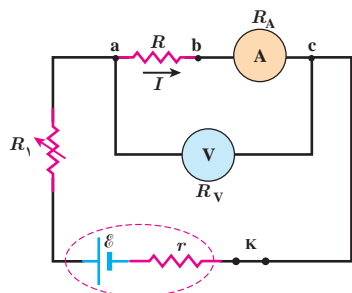
شکل ۲۰-۲ مدار معادل شکل ۱۹-۲ که در آن سه مقاومت با مقاومت  $R_{eq}$  جایگزین شده است.

### تمرین ۲-۳

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





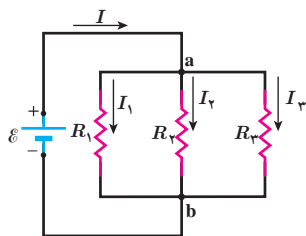


شکل روبه‌رو مداری را برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول  $R$  نشان می‌دهد. فرض کنید در این مدار ولت‌سنج  $24/0\text{ V}$  و آمپرسنج  $20/0\text{ A}$  را نشان دهد. مقاومت ولت‌سنج  $R_V = 1/00 \times 10^4 \Omega$  و مقاومت آمپرسنج  $R_A = 1/00 \Omega$  است. مقاومت  $R$  را به دست آورید. **پاسخ:** مقاومت‌های  $R$  و  $R_A$  به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند و اختلاف پتانسیل دوسر آنها برابر با  $24/0\text{ V}$  است. با توجه به اینکه آمپرسنج جریان  $20/0\text{ A}$  را نشان می‌دهد و به‌طور متوالی به مقاومت  $R$  بسته شده است، جریان عبوری از این دو مقاومت نیز برابر  $20/0\text{ A}$  است:

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

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

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



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

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

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

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

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

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

با قرار دادن این جریان‌ها در معادله قبلی خواهیم داشت:

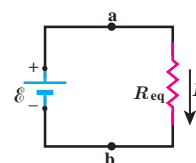
$$I = V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

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

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

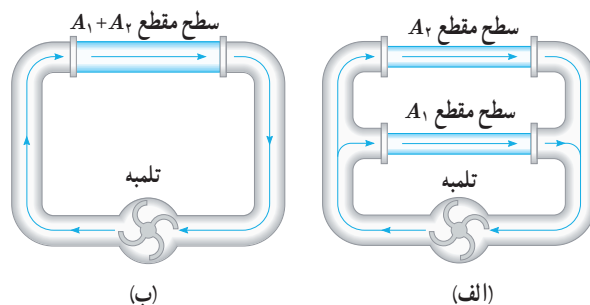
در حالت کلی برای  $n$  مقاومت موازی به رابطه زیر می‌رسیم:

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



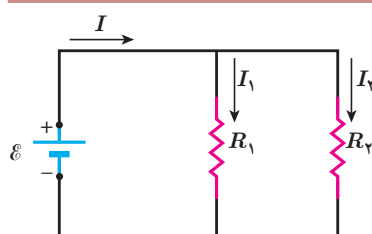
شکل ۲-۲۲ مدار معادل شکل ۲-۲۱ که در آن مقاومت معادل،  $R_{eq}$  جایگزین مقاومت‌های  $R_1, R_2, R_3$  شده است.

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



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

## مثال ۲-۸



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

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

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

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

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

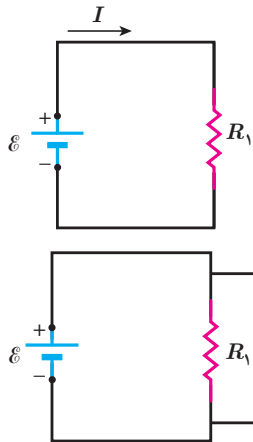
ب) و برای جریان عبوری از باتری داریم:

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

## فعالیت ۲-۶

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

مثال ۹-۲



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

الف) جریان عبوری از منبع را به دست آورید.

ب) اگر مقاومت  $R_2 = 10\text{M}\Omega$  به طور موازی به دو سر مقاومت  $R_1$  متصل شود، مقاومت معادل

مدار چقدر می‌شود و چه جریانی از منبع می‌گذرد؟

پاسخ: الف) با استفاده از تعریف مقاومت داریم:

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

ب) با استفاده از رابطه ۱۱-۲ داریم:

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

در نتیجه

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(100 \times 10^3 \Omega)(10 \times 10^6 \Omega)}{100 \times 10^3 \Omega + 10 \times 10^6 \Omega} = 99.0 \text{k}\Omega$$

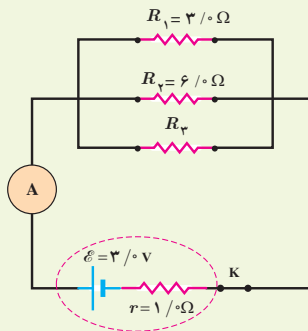
و بنابراین، جریان عبوری از منبع برابر است با

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{eq}}} = \frac{150\text{V}}{99.0 \times 10^3 \Omega} = 1.52 \times 10^{-3} \text{A} = 1.52 \text{mA}$$

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

تقریباً برابر با مقاومت کوچک‌تر ( $R_1$ ) است.

تمرین ۴-۲



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

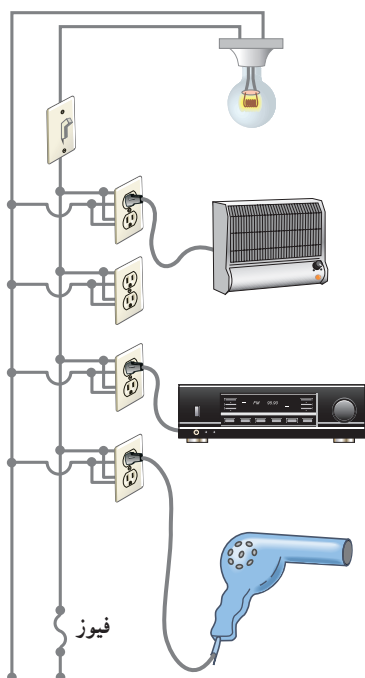
مثال ۱۰-۲

یک لامپ رشته‌ای  $100\text{W}$ ، یک بخاری برقی  $2000\text{W}$ ، یک دستگاه پخش صوت  $200\text{W}$ ، و یک سشوار (موخشک‌کن)

$2200\text{W}$  مطابق شکل به پریزهای یک مدار سیم‌کشی خانگی  $220\text{V}$  وصل شده است.

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

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



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

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

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

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

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

بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر است با

$$I_{\text{فیوز}} = I_{\text{کل}} = I_{\text{لامپ}} + I_{\text{بخاری}} + I_{\text{پخش}} + I_{\text{سشوار}}$$

$$= 0.455 \text{ A} + 9.09 \text{ A} + 0.909 \text{ A} + 10.0 \text{ A} = 20.5 \text{ A}$$

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

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

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

$$R_{\text{بخاری}} = \frac{V^2}{P_{\text{بخاری}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{2000 \text{ W}} = 24/2 \Omega$$

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

$$R_{\text{سشوار}} = \frac{V^2}{P_{\text{سشوار}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{2200 \text{ W}} = 22/0 \Omega$$

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

پس مقاومت معادل چنین محاسبه می شود:

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

$$= \frac{1}{484 \Omega} + \frac{1}{24/2 \Omega} + \frac{1}{242 \Omega} + \frac{1}{22/0 \Omega} = 0.930 \Omega^{-1}$$

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

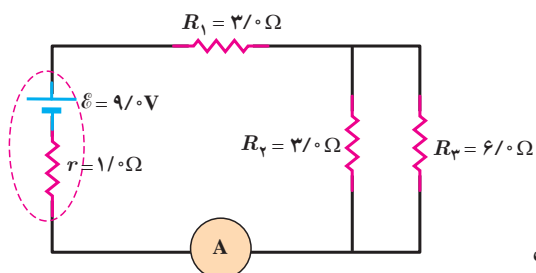
$$P_{R_{\text{eq}}} = \frac{V^2}{R_{\text{eq}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{10/75 \Omega} = 4/50 \text{ kW}$$

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

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

که همان توان مصرفی مقاومت معادل است.

### مثال ۲-۱۱



در مدار شکل روبه‌رو

(الف) مقاومت معادل،

(ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد، و

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

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

معادل آنها را  $R_{23}$  می‌نامیم.

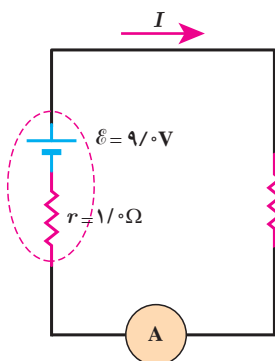
$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(3\Omega)(6\Omega)}{3\Omega + 6\Omega} = 2\Omega$$

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

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

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

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



جریان گذرنده از باتری، مقاومت معادل  $R_{\text{eq}}$  و آمپرسنج یکسان است. بنابراین آمپرسنج جریان  $1.5\text{A}$  را نشان می‌دهد.

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

است. پس،

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

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

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

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

در نتیجه برای جریان  $I_2$  داریم:

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

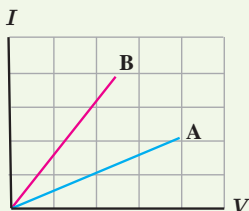
با استفاده از این اطلاعات الف) مقدار بار کل منتقل شده بین ابر و زمین، ب) جریان متوسط در یک یورش آذرخش و پ) توان الکتریکی آزادشده در  $0.2\text{ s}$  را به دست آورید.

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

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

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

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



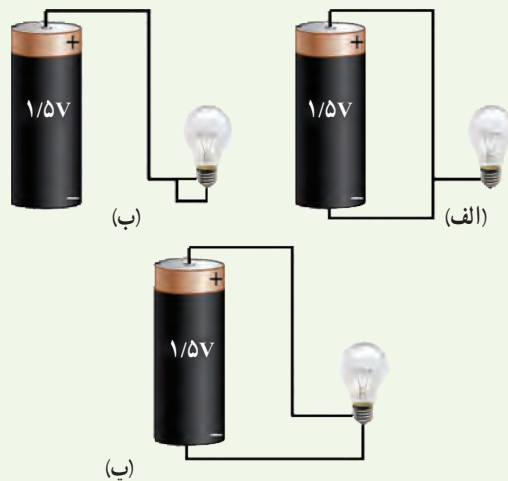
### ۲-۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

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

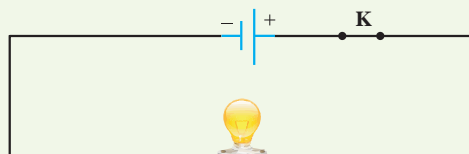
۸ در ماشین‌های چمن‌زنی برقی برای مسافت‌های حداکثر تا  $35\text{ m}$  از سیم‌های مسی نمره ۲۰ (قطر  $0.8\text{ cm}$ ) و برای مسافت‌های طولانی‌تر از سیم‌های ضخیم‌تر نمره ۱۶ (قطر  $1.3\text{ cm}$ ) استفاده می‌کنند تا بدین ترتیب مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. الف) مقاومت یک

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

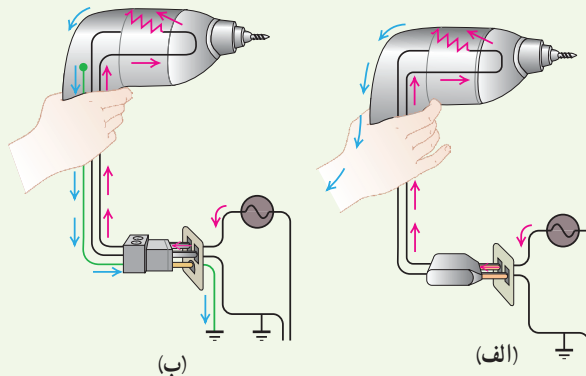
۱ در کدام یک از شکل‌های زیر، لامپ روشن می‌شود؟



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



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



۴ آذرخش مثالی جالب از جریان الکتریکی در پدیده‌های طبیعی است. در یک آذرخش نوعی  $1 \times 10^9\text{ J}$  انرژی تحت اختلاف پتانسیل  $10^7\text{ V}$  در بازه زمانی  $0.2\text{ s}$  آزاد می‌شود.

## ۲-۵ توان در مدارهای الکتریکی

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

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

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

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



کتری برقی، ۲۴۰۰W، ۲۲۰V

اتوی برقی، ۸۵۰W، ۲۲۰V

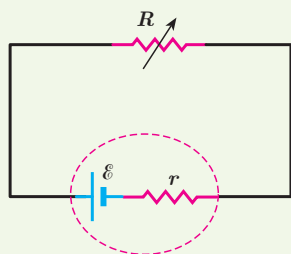
۱۴ تلویزیون و یکی از لامپ‌های خانه خود را در نظر بگیرید و فرض کنید که هرکدام روزی ۸ ساعت با اختلاف پتانسیل ۲۲۰ ولت روشن باشد.

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

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

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

۱۵ در شکل زیر، نیروی محرکه الکتریکی و مقاومت

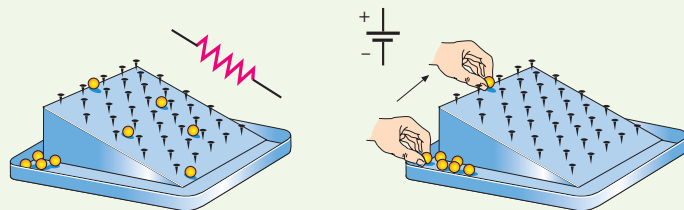


سیم ۳۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ (ب) مقاومت یک سیم ۷۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ (دمای سیم‌ها را  $20^{\circ}\text{C}$  در نظر بگیرید.)



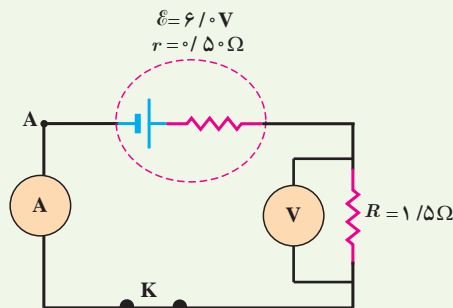
## ۲-۴ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

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



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

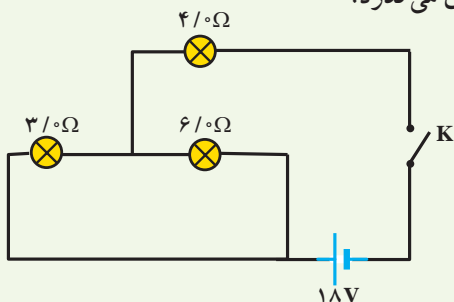
۱۱ در شکل زیر آمپرسنج و ولت‌سنج چه عددی را نشان می‌دهند؟



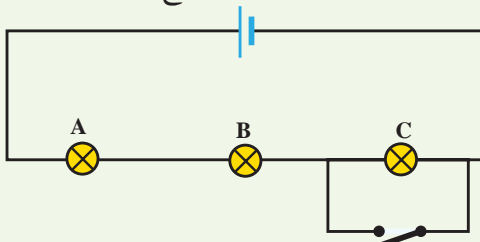
۲۱ سه مقاومت مشابه  $12 \text{ اهمی}$  را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل  $12 \text{ ولت}$  وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۲۲ دو مقاومت موازی  $6/0 \text{ اهمی}$  و  $12 \text{ اهمی}$  به طور متوالی به یک مقاومت  $2/0 \text{ اهمی}$  وصل شده است. اکنون، مجموعه مقاومت‌ها را به دو سر یک باتری آرمانی  $36 \text{ ولتی}$  می‌بندیم. توان مصرفی در مقاومت  $6/0 \text{ اهمی}$  را محاسبه کنید.

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



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



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

(ب) اختلاف پتانسیل دو سر C به اندازه  $50\%$  کاهش می‌یابد.

(پ) هر یک از اختلاف پتانسیل‌های دو سر A و B به اندازه  $50\%$  افزایش می‌یابد.

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

۲۵ درسیم کشی منازل، همه مصرف‌کننده‌ها به طور موازی متصل می‌شوند. یک اتوی  $1100 \text{ W}$ ، یک نان برشته‌کن (توستر)  $1800 \text{ W}$ ، پنج لامپ رشته‌ای  $100 \text{ W}$  و یک بخاری  $1100 \text{ W}$  به پریزهای یک مدار سیم‌کشی خانگی  $220 \text{ V}$  که حداکثر می‌تواند جریان  $15 \text{ A}$  را تحمل کند وصل شده‌اند. آیا این ترکیب مصرف‌کننده‌ها باعث پریدن فیوز می‌شود یا خیر؟

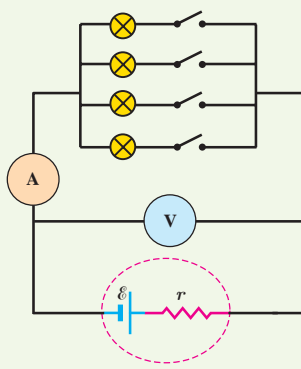
داخلی منبع را که توان خروجی آن به ازای  $I_1 = 5/0 \text{ A}$  برابر  $9/5 \text{ W}$  و به ازای  $I_2 = 7/0 \text{ A}$  برابر  $12/6 \text{ W}$  است، محاسبه کنید.

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

## ۲-۶ ترکیب مقاومت‌ها

۱۶ لامپ‌های یک درخت زینتی، به طور متوالی متصل شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتفاقی می‌افتد؟ به نظر شما چرا همه چراغ‌های خودرو (چراغ‌های جلو، عقب و ...) به طور موازی بسته می‌شوند؟

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



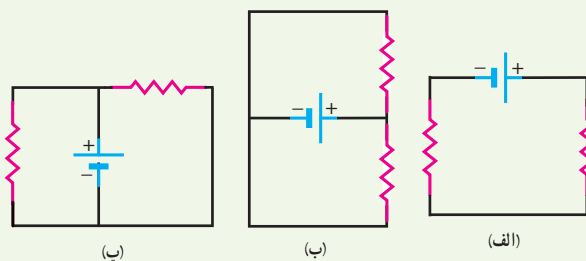
۱۸ در شکل مقابل، تعدادی

لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده‌اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، عددی که آمپرسنج و ولت‌سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟

۱۹ دو لامپ با مقاومت مساوی  $R$  را یک بار به طور متوالی و

بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و آنها را هر بار به ولتاژ  $V$  وصل می‌کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متوالی چقدر است؟

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





# مغناطیسی و القای الکترومغناطیسی



وقتی کارت بانکی درون دستگاه کارت خوان «کشیده» می‌شود، اطلاعات رمزیننه شده در نوار مغناطیسی پشت کارت، به مرکز اطلاعات بانک ارسال می‌شود. چرا به جای ثابت نگه داشتن کارت در شکاف دستگاه کارت خوان، لازم است آن را بکشیم؟ پاسخ در همین فصل.

کاربرد مغناطیس و آهنربا در جنبه‌های مختلف زندگی بشر، رشدی روزافزون دارد. فراتر از یک قرن، ضبط صدا و تصویر روی محیط‌هایی انجام می‌گرفت که مغناطیس در آنها نقش اصلی داشت. اگرچه فناوری دیجیتال به میزان زیادی جایگزین ضبط مغناطیسی به شیوه‌های سنتی شده‌است، با وجود این، ذخیره اطلاعات به صورت صفر و یک، هنوز هم در بیشتر روش‌ها به محیط‌های مغناطیسی وابسته است. مغناطیس و آهنرباها همچنین در بلندگوها، گوشی‌های تلفن همراه، رایانه‌ها، کارت‌های بانکی، موتورهای الکتریکی، یخچال‌ها، و اغلب سامانه‌های هشدار و ایمنی کاربرد دارد. پزشکی امروز نیز در تشخیص بیماری‌ها به کمک دستگاه‌هایی از قبیل ام‌آرآی (MRI)، بهره فراوانی از مغناطیس و آثار آن می‌برد.



**شکل ۳-۱** سنگ آهنربای طبیعی. تالس که اغلب از او به عنوان پدر علم یونان یاد می‌شود، ماده کانی مگنتیت  $Fe_3O_4$  را که ویژگی آهنربایی دارد می‌شناخت.

### ۳-۱ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی

آثار مغناطیسی دست کم ۲۵۰۰ سال پیش در تکه‌هایی از سنگ آهن مغناطیسی شده در نزدیکی شهر باستانی مگنسیا (که نام امروزی آن مانیسا و در غرب ترکیه واقع است) مشاهده شد. این تکه‌ها نمونه‌هایی هستند از چیزی که امروزه آهنربای دائمی خوانده می‌شود (شکل ۳-۱). چینی‌های باستان نیز با ویژگی‌های مغناطیسی برخی از سنگ‌های آهنربایی آشنایی داشتند و از آنها در ساخت قطب‌نما برای جهت‌یابی استفاده می‌کردند (شکل ۳-۲).



**شکل ۳-۲** از گذشته‌های دور، برای جهت‌یابی در دریانوردی از قطب‌نما استفاده می‌شده است.

در علوم هشتم دیدید که هرگاه آهنربایی را درون ظرف محتوی براده آهن فرو ببریم، براده‌های آهن به مقدار زیادی جذب ناحیه‌های خاصی از آهنربا می‌شوند. این ناحیه‌ها را قطب‌های مغناطیسی یا قطب‌های آهنربا می‌نامند (شکل ۳-۳).

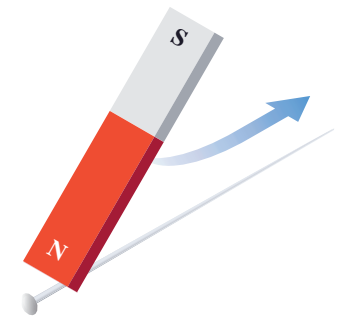


**شکل ۳-۳** در آهنربا، دو ناحیه وجود دارد که خاصیت مغناطیسی در آنجا بسیار بیشتر از قسمت‌های دیگر است.

### پرسش ۳-۱

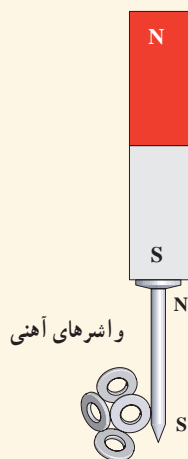
فرض کنید دو میله کاملاً مشابه، یکی از جنس آهن و دیگری آهنربا در اختیار دارید. باگفت‌وگو در گروه خود، روشی را پیشنهاد کنید که با استفاده از آن و بدون استفاده از هیچ وسیله دیگر، بتوان میله‌ای را که از جنس آهنرباست مشخص کرد.

هنگامی که یک آهنربای دائمی برای چندین بار و در یک جهت به یک سوزن خیاطی یا سوزن ته‌گرد کشیده شود، سوزن نیز برای مدتی آهنربا می‌شود (شکل ۳-۴). اگر این سوزن را به آرامی روی سطح آب درون ظرفی شناور کنیم، یا آن را توسط ریسمانی از وسط آن بیاویزیم که بتواند آزادانه بچرخد، یک سر آن تقریباً به سوی شمال جغرافیایی قرار می‌گیرد. این سر را قطب شمال یا قطب N و سر دیگر را قطب جنوب یا قطب S می‌نامند.



**شکل ۳-۴** وقتی یکی از قطب‌های یک آهنربای دائمی را چندین بار و در یک جهت به یک سوزن ته‌گرد بکشید، سوزن برای مدتی دارای خاصیت مغناطیسی می‌شود.

ممکن است مفهوم قطب‌های مغناطیسی به نظر، مشابه مفهوم بارهای الکتریکی باشد و قطب‌های شمال و جنوب، مشابه بارهای مثبت و منفی به نظر بیاید؛ ولی این مشابهت می‌تواند گمراه کننده باشد. بارهای مثبت و منفی مجزا وجود دارند، در حالی که هیچ گواه تجربی بر وجود تک قطبی مغناطیسی وجود ندارد؛ قطب‌های مغناطیسی همواره به صورت زوج ظاهر می‌شوند.

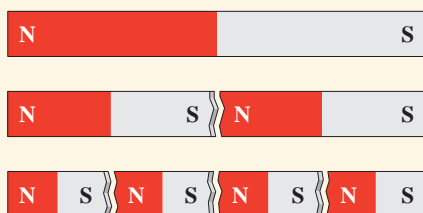


شکل (ب)

۱- دریافت خود را از شکل الف بیان کنید.

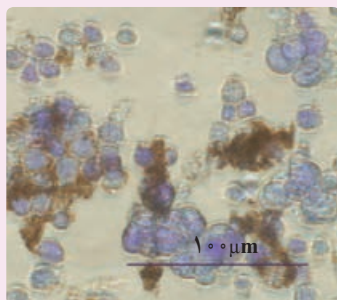
۲- در علوم هشتم با پدیده القای مغناطیسی آشنا شدید. با توجه به شکل ب این پدیده را توضیح

دهید و بیان کنید چرا در پدیده القای مغناطیسی همواره جذب وجود دارد؟



شکل (الف)

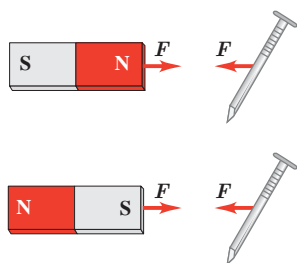
### فناوری و کاربرد: نانو ذره‌های مغناطیسی برای درمان



لکه‌های تیره در تصویر میکروسکوپی روبه‌رو، یاخته‌های سرطانی‌اند که از توموری جدا شده‌اند و خطر پخش آنها در سرتاسر بدن بیمار وجود دارد. در یک روش تجربی برای مبارزه با این یاخته‌ها از ذره‌های یک ماده مغناطیسی استفاده می‌شود که به بدن تزریق می‌شوند. این ذره‌ها با ماده شیمیایی خاصی پوشیده شده‌اند که به‌طور هدفمند به یاخته‌های سرطانی متصل می‌شوند. سپس با استفاده از یک آهنربا در بیرون از بدن بیمار، این ذره‌ها (که در شکل به رنگ قهوه‌ای نشان داده شده است) بیرون «رانده» می‌شوند و یاخته‌های سرطانی را با خود می‌برند.

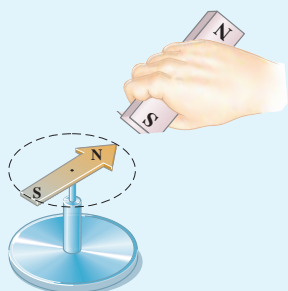
### ۲-۳ میدان مغناطیسی

هرگاه آهنربایی را به یک میخ آهنی نزدیک کنید می‌بینید که میخ به طرف آهنربا حرکت می‌کند و به سمت آن جذب می‌شود (شکل ۳-۵). مشابه آنچه درباره اجسام باردار دیدید، برای توجیه این پدیده می‌گوییم در فضای اطراف آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد که سبب جذب میخ شده است. میدان مغناطیسی نیز مانند میدان الکتریکی که در فصل ۱ با آن آشنا شدید، کمیتی برداری است و آن را با نماد  $\vec{B}$  نمایش می‌دهیم.



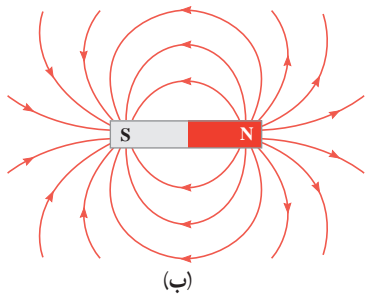
شکل ۳-۵ در فضای اطراف آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد به طوری که هر جسم آهنی مانند میخ را به سوی خود جذب می‌کند.

### ۱-۳ فعالیت

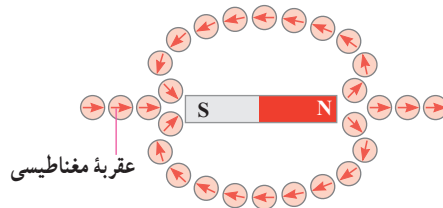


یکی از قطب‌های یک آهنربای میله‌ای را به یک عقربه مغناطیسی نزدیک کنید (شکل روبه‌رو). آنچه را می‌بینید توضیح دهید. با دور کردن آهنربا از قطب‌نما چه اتفاقی می‌افتد؟ دلیل آن را شرح دهید. در صورتی که قطب‌نما در اختیار ندارید، یک سوزن ته‌گرد مغناطیسی شده را روی سطح آب، درون ظرفی شناور سازید. به این ترتیب، سوزن ته‌گرد مانند عقربه مغناطیسی یک قطب‌نما رفتار می‌کند.

به کمک عقربه مغناطیسی می توان جهت میدان مغناطیسی را در هر نقطه از فضای اطراف یک آهنربا تعیین کرد (شکل ۳-۶ الف). بنا به تعریف، بردار میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای پیرامون یک آهنربا در جهتی است که وقتی عقربه مغناطیسی در آن نقطه قرار می گیرد، قطب N عقربه، آن جهت را نشان می دهد. با تعیین جهت میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای اطراف آهنربا، می توان همان گونه که برای میدان الکتریکی انجام دادیم، خط های میدان مغناطیسی را رسم کنیم. شکل ۳-۶ ب خط های میدان مغناطیسی را در اطراف یک آهنربای میله ای نشان می دهد. این خط ها از آهنربا می گذرند و هریک از آنها یک حلقه بسته را تشکیل می دهند. افزون بر اینها، خط های میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب ها به یکدیگر نزدیک ترند.



(ب)

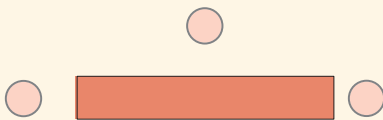


(الف)

**شکل ۳-۶ الف** تعیین جهت میدان مغناطیسی به کمک عقربه مغناطیسی. (ب) خط های میدان مغناطیسی در هر نقطه در جهت عقربه مغناطیسی اند و از قطب N خارج و به قطب S وارد می شوند. (در این شکل، خط های درون آهنربا نشان داده نشده است.)

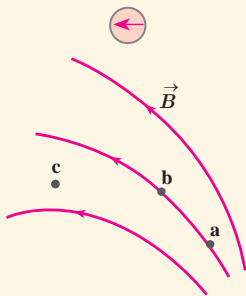
### پرسش ۳-۳

۱- شکل روبه رو، یک آهنربای میله ای و تعدادی عقربه مغناطیسی را نشان می دهد.



(الف) کدام سر آهنربا قطب N و کدام سر قطب S است؟

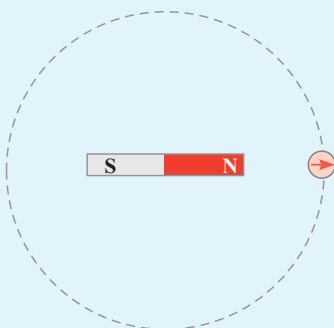
(ب) جهت گیری عقربه های مغناطیسی را در دیگر مکان های روی شکل تعیین کنید.



۲- شکل روبه رو، خط های میدان مغناطیسی در ناحیه ای از فضا را نشان می دهد. بردار میدان مغناطیسی را در هر یک از نقطه های روی شکل رسم کنید. به اندازه و جهت بردار میدان در هر نقطه توجه کنید.

### فعالیت ۳-۲

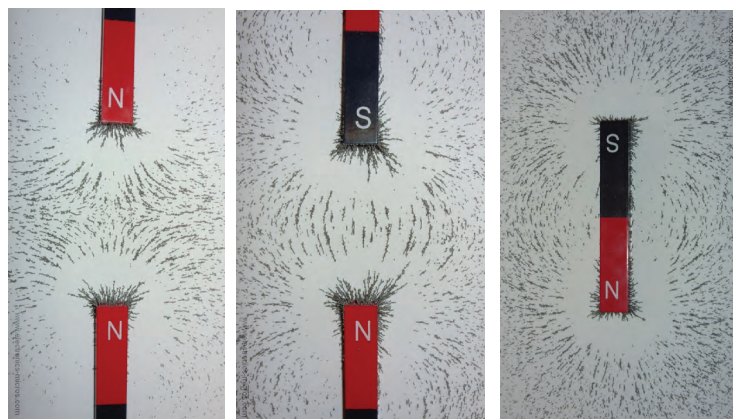
یک آهنربای میله ای را روی سطح افقی میزی قرار دهید. یک قطب نما یا عقربه مغناطیسی را مقابل یکی از قطب های آهنربا قرار دهید. روی مسیری دایره ای شکل دور آهنربا، عقربه را به آرامی حرکت دهید (شکل روبه رو). بررسی کنید پس از یک دور حرکت، عقربه چند درجه می چرخد.



## هدف: مشاهدهٔ طرح فضا‌های میدان مغناطیسی با استفاده از برادهٔ آهن

وسایله‌های مورد نیاز: آهنربای میله‌ای (دو عدد)، برادهٔ آهن، یک ورقهٔ شیشه‌ای یا مقوایی، نمک پاش (یا وسیلهٔ دیگری برای پاشیدن برادهٔ آهن) و دوربین برای عکس گرفتن از نتیجهٔ آزمایش (اختیاری)  
شرح آزمایش:

- یکی از آهنرباهای میله‌ای را روی میز قرار دهید و صفحهٔ شیشه‌ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.
- به کمک نمک پاش، کمی برادهٔ آهن را به طور یکنواخت روی شیشه (مقوا) بپاشید.



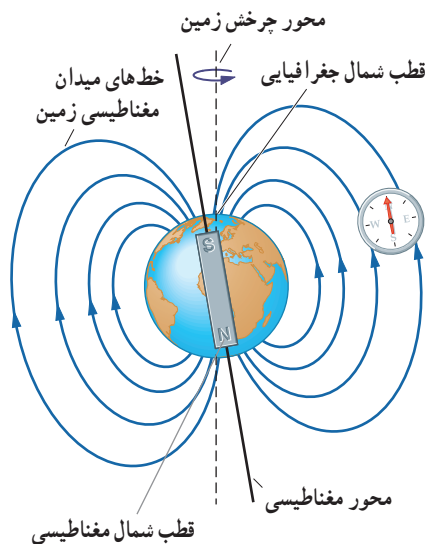
(ب)

(ب)

(الف)

• چند ضربهٔ آرام به صفحهٔ شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرحی که روی صفحهٔ شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است (شکل الف).

• مراحل بالا را برای دو آهنربای میله‌ای که به ترتیب: قطب‌های ناهمنام و قطب‌های همنام آنها به یکدیگر نزدیک‌اند انجام دهید (شکل‌های ب و پ).



شکل ۳-۷ طرح ساده‌ای از میدان مغناطیسی زمین. عقربهٔ مغناطیسی قطب‌نما در هر نقطه در امتداد خط‌های این میدان قرار می‌گیرد.

میدان مغناطیسی زمین: زمین مانند یک آهنربای بسیار بزرگ رفتار می‌کند و طرح خط‌های میدان مغناطیسی آن مانند طرح خط‌های آهنربای میله‌ای بزرگی است که در نزدیکی مرکز زمین قرار دارد و قطب شمال آن در نزدیکی قطب جنوب جغرافیایی زمین است (شکل ۳-۷). نشان دادن خط‌های میدان مغناطیسی زمین به صورت خط‌های میدان یک آهنربای میله‌ای، تنها یک مدل ساده از ساختار پیچیده و ناشناختهٔ عوامل ایجاد میدان مغناطیسی زمین است. شواهد زمین‌شناختی نشان می‌دهند که جهت این میدان در بازه‌های زمانی نامنظم از ده هزار تا یک میلیون سال به طور کامل وارون می‌شود. قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. در واقع، قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین فاصلهٔ نسبتاً زیادی از یکدیگر دارند؛ مثلاً قطب جنوب مغناطیسی تقریباً در فاصلهٔ ۱۸۰۰ کیلومتری قطب شمال جغرافیایی قرار دارد. این بدان معناست که عقربهٔ مغناطیسی قطب‌نما در جهت شمال واقعی جغرافیایی قرار نمی‌گیرد و تا حدودی از شمال جغرافیایی انحراف دارد.

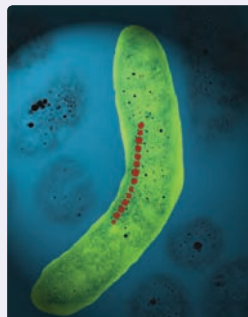
## فعالیت ۳-۳

وقتی یک سوزن مغناطیسی شده یا یک عقربه مغناطیسی را از وسط آن آویزان می‌کنیم در بیشتر نقاط زمین، به طور افقی قرار نمی‌گیرد و امتداد آن با سطح افقی زمین زاویه می‌سازد. به این زاویه، **شیب مغناطیسی** گفته می‌شود. برای یافتن شیب مغناطیسی محلی که در آن زندگی می‌کنید درست به وسط یک سوزن مغناطیسی شده یا عقربه مغناطیسی بزرگ، نخ را ببندید و آن را آویزان کنید. پس از تعادل، به کمک نقاله، زاویه‌ای را اندازه بگیرید که امتداد سوزن یا عقربه مغناطیسی با راستای افق می‌سازد. عدد به دست آمده، شیب مغناطیسی محل زندگی شماست<sup>۱</sup>. چنانچه در آزمایشگاه مدرسه شیب‌سنج مغناطیسی موجود باشد می‌توانید از آن نیز استفاده کنید.

## خوب است بدانید: جهت یابی مغناطیسی در جانداران

بسیاری از موجودات زنده از میدان مغناطیسی زمین برای جهت‌یابی استفاده می‌کنند. خرچنگ خاردار کارائیب در برابر میدان‌های مغناطیسی بسیار حساس است (شکل الف). این جاندار یک قطب‌نمای مغناطیسی درونی دارد که تشخیص شمال، جنوب، شرق و غرب را برایش امکان‌پذیر می‌کند. این خرچنگ همچنین می‌تواند تفاوت اندک در میدان مغناطیسی زمین از مکانی به مکان دیگر را حس کند و از این تفاوت، در یافتن مسیر خود بهره بگیرد.

در سال ۱۹۷۵ میلادی، دانشمندان مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT) هنگام بررسی باکتری‌های موجود در لجن ته باتلاق‌ها، متوجه شدند که این باکتری‌ها دارای قسمت‌هایی کوچک در بدن خود هستند که خاصیت مغناطیسی دارند. این قسمت‌ها به صورت زنجیری در یک خط قرار دارند؛ در نتیجه یک عقربه مغناطیسی کوچک را تشکیل می‌دهند (شکل ب). باکتری‌ها به کمک این مغناطیس داخلی می‌توانند از میدان مغناطیسی زمین بهره بگیرند و به طرف مواد غذایی در ته آبگیر هدایت شوند. جالب اینکه باکتری‌های مربوط به نیمکره جنوبی زمین، برای رسیدن به ته آبگیر در خلاف جهت خط‌های میدان مغناطیسی زمین قرار می‌گیرند.

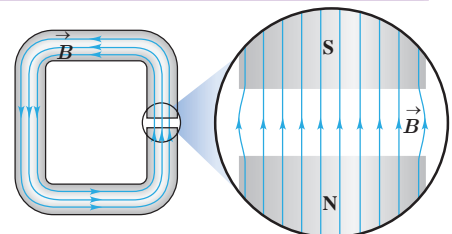


(ب)



(الف)

**میدان مغناطیسی یکنواخت:** هرگاه در نقاط مختلف ناحیه‌ای از فضا جهت و اندازه میدان مغناطیسی یکسان باشد، در این صورت میدان مغناطیسی را در آن ناحیه یکنواخت می‌گویند. ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت در ناحیه بزرگی از فضا بسیار دشوار و در عمل امکان‌ناپذیر است. با این وجود، می‌توان در ناحیه کوچکی از فضا، مانند ناحیه بین قطب‌های یک آهنربای C شکل<sup>۲</sup>، میدان مغناطیسی یکنواخت ایجاد کرد (شکل ۳-۸).



**شکل ۳-۸** میدان مغناطیسی در فضای بین قطب‌های یک آهنربای C شکل با تقریب خوبی یکنواخت است.

۱- می‌توانید به سایت [www.magnetic-declination.com](http://www.magnetic-declination.com) بروید و درستی شیب مغناطیسی (magnetic inclination) به دست آمده در فعالیت ۳-۳ را بررسی کنید. یا با نصب برنامه inclination meter روی گوشی تلفن همراه خود، شیب مغناطیسی را در محل زندگی خود اندازه بگیرید. شیب مغناطیسی در ایران از حدود  $4^{\circ}$  تا حدود  $6^{\circ}$  از مناطق جنوبی تا مناطق شمال غربی متغیر است.



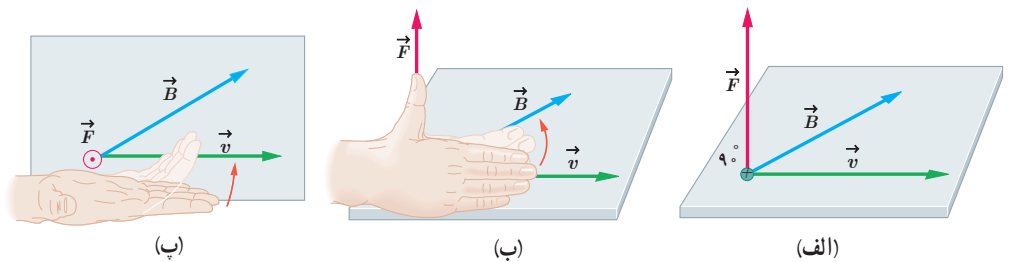
نیکولا تسلا (۱۸۵۶-۱۹۴۳)

تسلا در کرواسی به دنیا آمد. او بعدها به امریکا مهاجرت و مدتی با ادیسون همکاری کرد. ادیسون همواره با جریان مستقیم (dc) کار می کرد، با این وجود، وی کار کردن با جریان متناوب (ac) با ولتاژهای بسیار بالا را عملی ساخت. تسلا از اینکه جریان متناوب برای اولین بار در ساندلی الکتریکی به منظور اعدام مورد استفاده قرار گرفت شدیداً ناراحت بود. وی همچنین طراح تولید برق در آبشار نیاگارا بود. به پاس خدمات وی، یکای SI میدان مغناطیسی را با تسلا نشان می دهند.

- ⊙ نماد بردار عمود بر صفحه به طرف بیرون (برون سو)
- ⊗ نماد بردار عمود بر صفحه به طرف درون (درون سو)

### ۳-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی

آزمایش نشان می دهد که اگر ذره باردار  $q$  با سرعت  $\vec{v}$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  حرکت کند (به شرط آنکه جهت حرکت آن با میدان مغناطیسی موازی نباشد) بر آن نیروی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۳-۹ الف بر راستای سرعت و میدان مغناطیسی عمود است. این نیرو را نیروی مغناطیسی می نامند و جهت آن، مطابق شکل ۳-۹ ب و پ به کمک قاعده دست راست تعیین می شود. اگر دست راست خود را طوری نگه داریم که انگشتان باز شده ما در جهت  $\vec{v}$  باشد - به گونه ای که وقتی آنها را روی زاویه کوچک تری که  $\vec{v}$  با  $\vec{B}$  می سازد، و در جهت چرخش طبیعی انگشتان خم کنیم در جهت  $\vec{B}$  قرار گیرد - انگشت شست ما در جهت نیروی وارد بر ذره باردار مثبت خواهد بود. توجه کنید که نیروی وارد بر بار منفی، در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت است.



شکل ۳-۹ الف) بر ذره باردار  $q$  که با سرعت  $\vec{v}$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  حرکت می کند، نیروی مغناطیسی  $\vec{F}$  وارد می شود. (ب) و (پ) جهت این نیرو به کمک قاعده دست راست تعیین می شود.

اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی در حال حرکت از رابطه زیر به دست می آید:

$$F = |q|vB\sin\theta \quad (۱-۳)$$

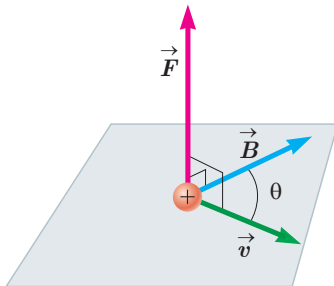
در این رابطه  $|q|$  بزرگی بار الکتریکی،  $v$  تندی (اندازه سرعت) بار الکتریکی،  $B$  اندازه میدان مغناطیسی و  $\theta$  زاویه بین جهت حرکت بار الکتریکی (بردار  $\vec{v}$ ) با جهت میدان مغناطیسی (بردار  $\vec{B}$ ) است (شکل ۳-۱۰).

رابطه ۳-۱ نشان می دهد وقتی بار الکتریکی  $q$  عمود بر راستای میدان مغناطیسی حرکت کند ( $\sin\theta = \sin 90^\circ = 1$ )، اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی، بیشینه می شود ( $F = F_{\max}$ ). بنا به رابطه ۳-۱، یکای SI میدان مغناطیسی معادل است با:

$$\text{یکای SI میدان مغناطیسی} \equiv \frac{\text{N}}{\text{C.m/s}} = \frac{\text{N}}{\text{A.m}}$$

این یکا به احترام نیکولا تسلا دانشمند و مخترع نامی، تسلا نامیده می شود و به اختصار با نماد T نشان داده می شود. به این ترتیب می توان نوشت:

$$1\text{T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C.m/s}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A.m}} \quad (۲-۳)$$



شکل ۳-۱۰ نیروی  $\vec{F}$  بر هر دو بردار  $\vec{v}$  و  $\vec{B}$  عمود است. به عبارت دیگر، نیروی مغناطیسی بر صفحه ای که توسط سرعت و میدان مغناطیسی تشکیل می شود عمود است.

تسلا یکای بزرگی است و در برخی موارد از یکای قدیمی (غیر SI) و کوچک‌تری به نام گاوس (با نماد G) استفاده می‌کنند به طوری که داریم  $1\text{T} = 10^4\text{G}$ . اندازه میدان مغناطیسی زمین در نزدیکی سطح زمین در قطب‌ها بیشترین ( $65^\circ/\text{G}$ ) و در استوا کمترین ( $25^\circ/\text{G}$ ) است. بزرگی میدان مغناطیسی در نزدیکی آهنرباهای میله‌ای کوچک حدود  $10^\circ/1$  تا  $10^\circ/1$  تسلا است. همچنین بزرگ‌ترین میدان مغناطیسی مداوم<sup>۱</sup> که امروزه در آزمایشگاه تولید شده، حدود ۴۵ تسلا است.



کارل فریدریش گاوس (۱۸۵۵-۱۷۷۷)

گاوس، ریاضی‌دان، فیزیک‌دان و ستاره‌شناس آلمانی است که مدتی مدیر رصدخانه گوتینگن بوده است. گاوس یکی از ریاضی‌دان‌های بزرگ و برجسته‌ترین کارش در نظریه اعداد است. او به انجام محاسبه‌های بی‌اندازه بفرنج علاقه‌مند بود. وی همچنین روش‌های تازه‌ای برای محاسبه در مکانیک سماوی به دست آورد. گاوس روی پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی نیز فعالیت زیادی کرد و قانونی به نام وی در مبحث الکتریسته وجود دارد.

### مثال ۳-۱

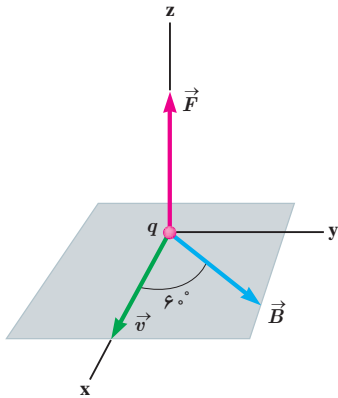
ذره‌ای با بار  $q = -4 \times 10^{-9}\text{C}$  و با تندی  $v = 2 \times 10^6\text{m/s}$  در جهتی حرکت می‌کند که با میدان مغناطیسی یکنواخت  $B = 12 \times 10^{-4}\text{T}$  زاویه  $\theta = 6^\circ$  می‌سازد (شکل روبه‌رو). اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر این ذره را حساب کنید.

**پاسخ:** با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

$$|q| = +4 \times 10^{-9}\text{C}, \quad v = 2 \times 10^6\text{m/s},$$

$$B = 12 \times 10^{-4}\text{T} \quad \text{و} \quad \theta = 6^\circ$$

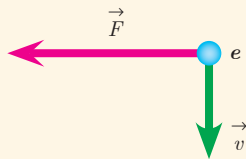
با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۳-۱ داریم:



$$F = |q|vB \sin\theta$$

$$= (4 \times 10^{-9}\text{C})(2 \times 10^6\text{m/s})(12 \times 10^{-4}\text{T}) \sin 6^\circ \approx 8/3 \times 10^{-6}\text{N}$$

### پرسش ۳-۴

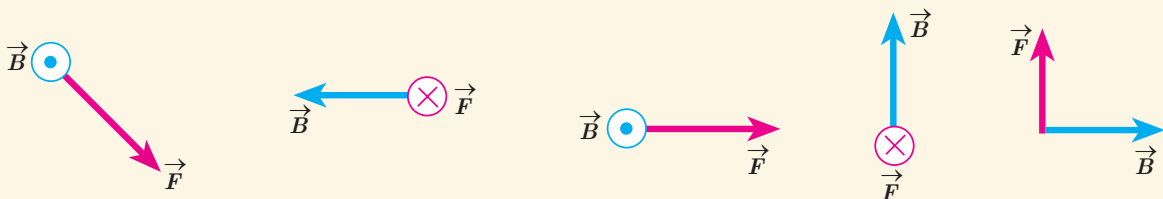


۱- الکترونی عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. با توجه به شکل،

جهت میدان  $\vec{B}$  کدام است؟

بالا  راست  درون‌سو  برون‌سو

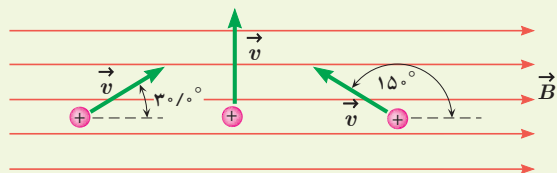
۲- نیروی مغناطیسی  $\vec{F}$  وارد بر الکترونی که در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  در حرکت است، در شکل زیر، نشان داده شده است. فرض کنید راستای حرکت الکترون بر میدان مغناطیسی عمود است؛ در هر یک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید.



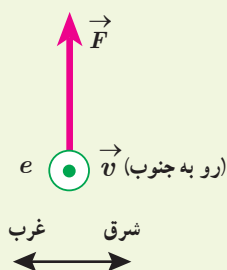
<sup>۱</sup> Strongest Continuous Magnetic Field



۱- بر پروتونی که با زاویه  $\theta = 3^\circ$  نسبت به میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه  $B = 32^\circ \text{G}$  در حرکت است نیرویی به اندازه  $F = 5/12 \times 10^{-14} \text{N}$  وارد می‌شود. تندی پروتون چند کیلومتر بر ثانیه است؟



۲- سه ذره، هر کدام با بار  $q = 6/15 \mu\text{C}$  و تندی  $v = 46 \text{ m/s}$  در میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه  $B = 0/165 \text{ T}$  در حرکت اند (شکل روبه‌رو). اندازه نیروی وارد بر هر ذره را حساب کنید.



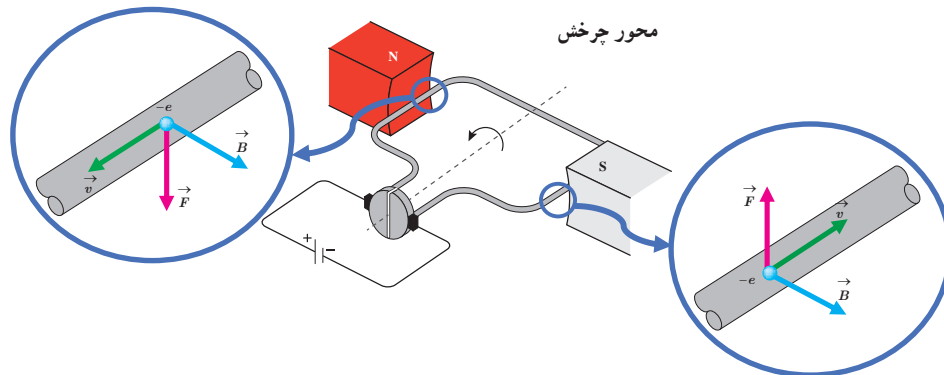
۳- الکترونی با تندی  $2/4 \times 10^5 \text{ m/s}$  درون میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. اندازه نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند.

الف) اگر جهت این نیروی بیشینه، روبه بالا و اندازه آن برابر  $6/8 \times 10^{-14} \text{ N}$  باشد، اندازه و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

ب) اندازه میدان الکتریکی چقدر باشد تا همین نیرو را ایجاد کند؟

### ۳-۴ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان

موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند و اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها نظیر جاروی برقی، مت‌برقی، آسیاب برقی، ماشین لباسشویی، پنکه و... را تشکیل می‌دهند. شکل ۳-۱۱ طرحی ساده از اجزای اصلی یک موتور الکتریکی را نشان می‌دهد که در علوم سال هشتم با نحوه ساختن آن آشنا شدید. چه چیز باعث می‌شود یک موتور الکتریکی کار کند؟ در هر موتور الکتریکی، سیم‌هایی وجود دارند که حامل جریان‌اند (یعنی بارهای الکتریکی در آنها در حرکت‌اند) و آهنرباهایی نیز وجود دارند که بر بارهای متحرک نیرو وارد می‌کنند. از این رو، بر هر سیم حامل جریان، نیروی مغناطیسی وارد می‌شود و این نیروها حلقه را می‌چرخاند.



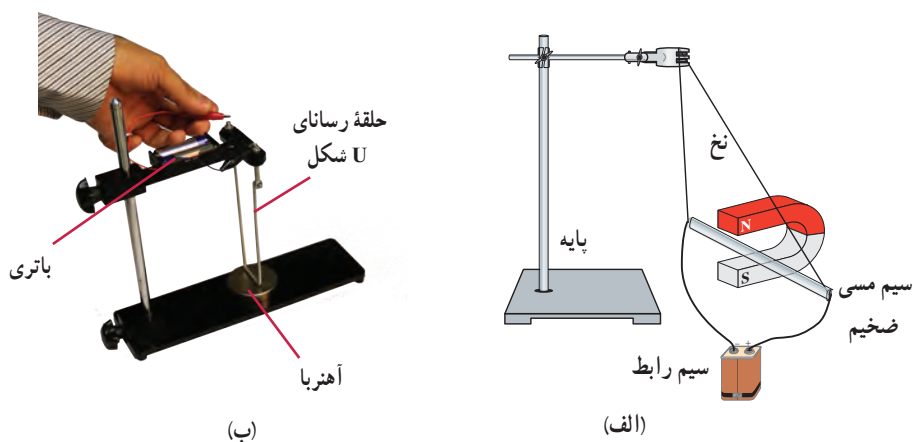
شکل ۳-۱۱ طرحی ساده از یک موتور الکتریکی. نیروی مغناطیسی  $F$  وارد بر الکترون‌هایی که با سرعت  $v$  درون رسانا حرکت می‌کنند حلقه را می‌چرخاند.

## آزمایش ۲-۳

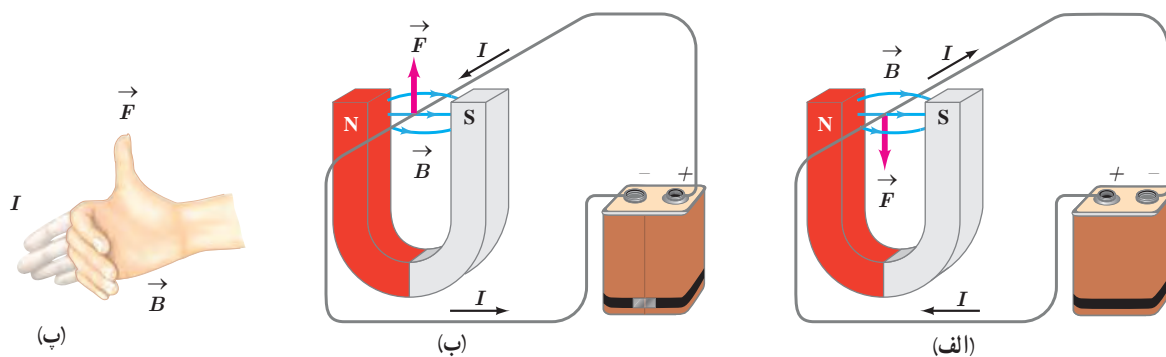
## هدف: بررسی نیروی وارد بر سیم حامل جریان

وسایله‌های مورد نیاز: آهنربای نعلی شکل، سیم مسی ضخیم، سیم رابط، پایه، نخ و باتری  
شرح آزمایش:

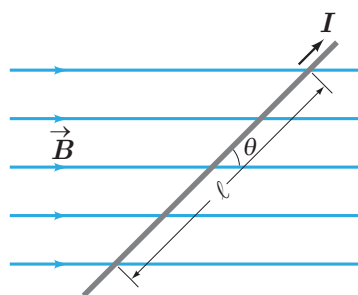
- مداری مطابق شکل الف بیندید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، در گروه خود به بحث بگذارید.
- در صورتی که وسیله‌ای مشابه شکل ب را در آزمایشگاه مدرسه در اختیار دارید می‌توانید از آن استفاده کنید.
- مدار را قطع کنید و جهت جریان را تغییر داده و مراحل بالا را دوباره انجام دهید.
- نتیجه آزمایش را به کلاس گزارش دهید.



اورستد (فیزیک‌دان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی شبیه آزمایش ۲-۳ و اندازه‌گیری نیرویی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد:  
نیرویی که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، بر راستای سیم و نیز بر راستای میدان مغناطیسی عمود است. جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی را می‌توان با استفاده از قاعده دست راست تعیین کرد (شکل ۳-۱۲).



**شکل ۳-۱۲** (الف) نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی؛ (ب) نیروی مغناطیسی وارد بر سیم در حالی که جهت جریان وارونه شده است. (ب) قاعده دست راست برای تعیین جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی شکل (ب).



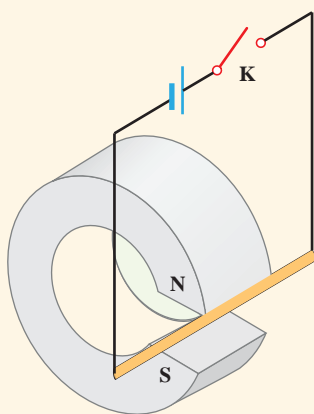
شکل ۳-۱۳ سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی. نیروی مغناطیسی وارد بر سیم درون سو (عمود بر صفحه کتاب و به طرف داخل) است.

عامل‌های مؤثر بر نیروی مغناطیسی وارد بر سیم راست رسانای حامل جریان: آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۲-۳ نشان می‌دهند که نیروی مغناطیسی وارد بر یک سیم رسانای حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواخت، به عامل‌های مختلفی بستگی دارد که این عامل‌ها در رابطه زیر بیان شده‌اند:

$$F = I\ell B \sin\theta \quad (3-3)$$

در این رابطه  $\ell$  طول بخشی از سیم رساناست که در میدان مغناطیسی یکنواخت  $B$  قرار دارد. زاویه‌ای را که امتداد سیم با خطوط میدان مغناطیسی می‌سازد با  $\theta$  نشان داده‌ایم (شکل ۳-۱۳).

### پرسش ۳-۵



۱- اگر در شکل ۳-۱۳ سیم حامل جریان در امتداد میدان مغناطیسی قرار گیرد، نیروی مغناطیسی وارد بر آن چقدر خواهد بود؟ در چه حالتی بزرگی این نیرو بیشینه می‌شود؟

۲- یک میله رسانا به پایانه‌های یک باتری وصل شده و مطابق شکل در فضای بین قطب‌های یک آهنربای C شکل آویزان شده است و می‌تواند آزادانه نوسان کند. با بستن کلید K، چه اتفاقی برای میله رسانا رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.

### مثال ۳-۲

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی  $G = 40^\circ$  در راستایی قرار دارد که با جهت میدان زاویه  $30^\circ$  می‌سازد. اگر جریان عبوری از سیم  $5^\circ A$  باشد، بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر  $1^\circ m$  از این سیم را حساب کنید.

**پاسخ:** با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

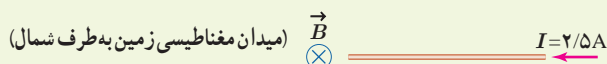
$$B = 40^\circ \times 10^{-4} T, \quad \theta = 30^\circ, \quad I = 5^\circ A \quad \text{و} \quad \ell = 1^\circ m$$

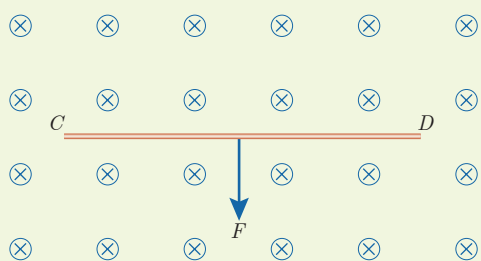
با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۳-۳ داریم:

$$F = I\ell B \sin\theta = (5^\circ A)(1^\circ m)(40^\circ \times 10^{-4} T) \sin 30^\circ = 0.1^\circ N$$

### تمرین ۳-۲

۱- سیم مستقیمی به طول  $2/4 m$  حامل جریان  $2/5 A$  از شرق به غرب است. اندازه میدان مغناطیسی زمین در محل این سیم  $45^\circ G$  و جهت آن از جنوب به شمال است. اندازه و جهت نیروی مغناطیسی وارد بر این سیم را تعیین کنید.





۲- سیم رسانای CD به طول ۲m مطابق شکل روبه‌رو عمود بر میدان مغناطیسی درون سو با اندازه  $0.5T$  قرار گرفته است؛ اگر اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر سیم برابر ۱N باشد، جهت و مقدار جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.

### فعالیت ۳-۴

آزمایشی را طراحی کنید که به کمک آن بتوان نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی درون میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری کرد. در صورت لزوم، برای اجرای این آزمایش می‌توانید از ترازوهای دیجیتال (رقمی) با دقت  $0.1g$  استفاده کنید.

### ۳-۵ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

تا اینجا بی‌بردییم که در فضای اطراف آهنرباهای دائمی میدان مغناطیسی وجود دارد. در ادامه این فصل با چشمه‌های دیگر ایجاد میدان مغناطیسی آشنا خواهیم شد. اورستد دانشمند دانمارکی، در سال ۱۸۲۰ میلادی ضمن انجام برخی آزمایش‌های الکتریسیته، مشاهده کرد که عقربه مغناطیسی در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می‌شود (شکل ۳-۱۴). او با انجام دادن آزمایش‌های بیشتر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم رسانا، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. این کشف اورستد گام مهمی در راه درک رابطه بین الکتریسیته و مغناطیس بود که به گسترش مبحث الکترومغناطیس انجامید. در این بخش، به بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم‌ها می‌پردازیم.



شکل ۳-۱۴ میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را می‌توان با قرار دادن تعدادی عقربه مغناطیسی پیرامون آن نشان داد.

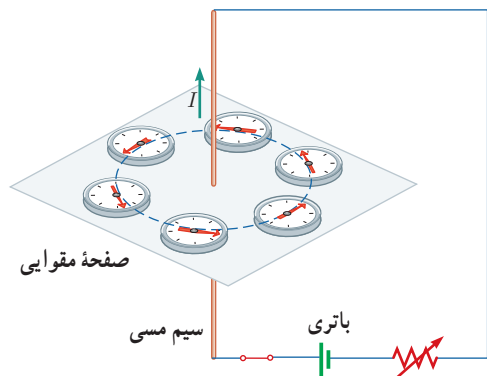


هانس کریستیان اورستد (۱۸۵۱-۱۷۷۷)

فیزیک‌دان و شیمی‌دان مشهور دانمارکی است که تأثیر بسیار بزرگی در تاریخ فیزیک گذاشته است. کشفیات وی در زمینه الکتریسیته و مغناطیس، اولین گام در شکل‌گیری نظریه الکترومغناطیس بود. اورستد که معمولاً در کلاس‌هایش به انجام آزمایش هم می‌پرداخت، در یکی از روزهای سال ۱۸۲۰ میلادی، در حالی که مشغول آموزش الکتریسیته و تولید جریان با پیل الکتریکی بود، متوجه انحراف جهت عقربه قطب‌نمایی شد که در کنار سیم حامل جریان قرار داشت. در ابتدا تصور کرد که ممکن است جریان هوای پیرامون سیم حامل جریان سبب انحراف عقربه شده است، اما با انجام آزمایش‌هایی دقیق‌تر، به ارتباط مستقیم الکتریسیته و مغناطیس پی برد. به دنبال این کشف مهم، دانشمندان دیگری همچون آمپر، فاراده، هانری، ماکسول و هرتز تحقیقات در الکترومغناطیس را ادامه دادند. اورستد در حوزه فلسفه هم مطالعاتی داشت و همچنین یکی از دوستان نزدیک داستان‌نویس مشهور کودکان، هانس کریستیان آندرسن بود.

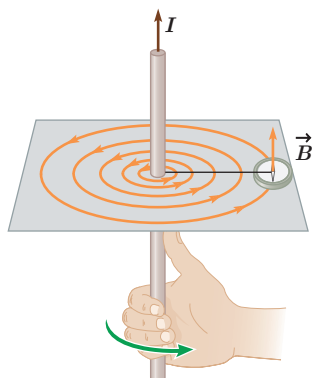
**هدف: بررسی آثار مغناطیسی جریان الکتریکی (آزمایش اورستد)**

وسایله‌های مورد نیاز: باتری، سیم مسی نسبتاً ضخیم، صفحه مقوایی، عقربه مغناطیسی (قطب‌نما)، رثوستا و سیم رابط  
شرح آزمایش:



- سیم مسی را از صفحه مقوایی بگذرانید و با آن مداری مطابق شکل روبه‌رو تشکیل دهید.
- قبل از برقراری جریان الکتریکی، عقربه مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرارگرفتن آن توجه کنید.
- با وصل کردن مدار، جریان الکتریکی را از سیم مسی عبور دهید و به جهت‌گیری عقربه مغناطیسی توجه کنید.
- عقربه مغناطیسی را در نقطه‌های مختلف روی مقوا قرار دهید و جهت آن را بررسی کنید.

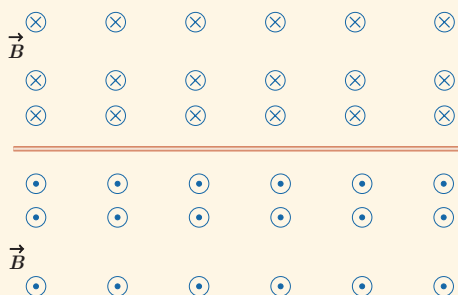
- با توجه به جهت‌گیری عقربه در نقاط مختلف صفحه مقوایی، چند خط میدان مغناطیسی را رسم کنید.
- این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.
- به کمک چند باتری دیگر یا تغییر مقاومت رثوستا، تحقیق کنید که افزایش یا کاهش جریان چه تأثیری در نتیجه آزمایش دارد؟
- نتیجه این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.



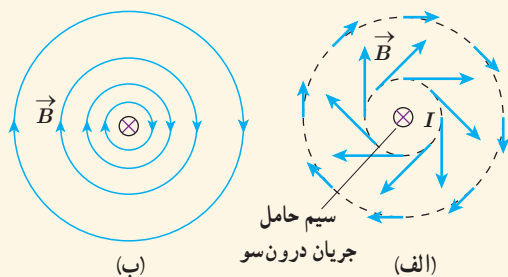
شکل ۳-۱۵ قاعده دست راست برای تعیین جهت  $\vec{B}$  اطراف سیم بلند مستقیم حامل جریان

با انجام این آزمایش می‌بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان، مطابق شکل ۳-۱۵ به صورت دایره‌های هم‌مرکز در اطراف سیم حامل جریان هستند. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم مستقیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقربه مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن، با استفاده از قاعده دست راست نیز می‌توان جهت را تعیین کرد؛ مطابق این قاعده، اگر سیم را در دست راست خود بگیرید به گونه‌ای که انگشت شست در جهت جریان الکتریکی باشد، جهت خم شدن چهار انگشت دست شما جهت خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف سیم نشان می‌دهد.

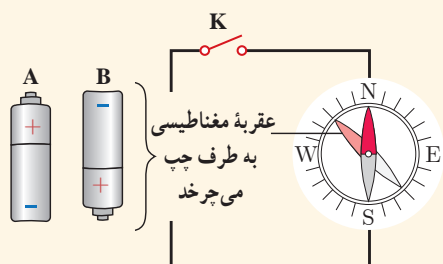
**پویشی ۳-۶**



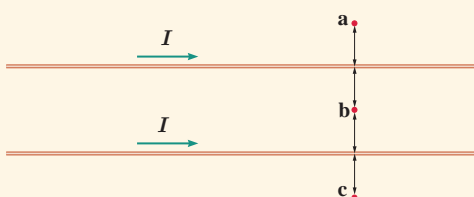
شکل روبه‌رو، جهت میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم افقی و مستقیم حامل جریان را نشان می‌دهد. در ناحیه بالای سیم، جهت میدان مغناطیسی درون‌سو و در ناحیه پایین آن برون‌سو است. جهت جریان را در سیم تعیین کنید.



۱- دریافت خود را از شکل‌های الف و ب بیان کنید. در بیان خود، به چگونگی تغییر جهت و اندازه میدان  $\vec{B}$  در اطراف سیم حامل جریان اشاره کنید.



۲- کدام باتری را در مدار شکل روبه‌رو قرار دهیم تا پس از بستن کلید K، عقربه قطب‌نما که روی سیم قرار دارد، در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت شروع به چرخش کند؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.



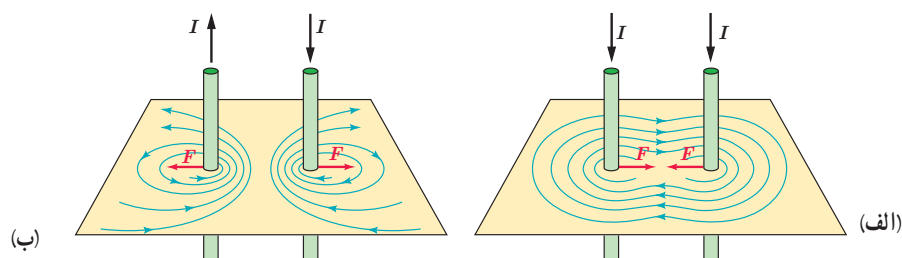
۳- جهت میدان مغناطیسی برآیند (خالص) ناشی از سیم‌های موازی و بلند حامل جریان را در هر یک از نقطه‌های a، b و c پیدا کنید. نقطه b در فاصله مساوی از دو سیم قرار دارد.

### فناوری و کاربرد: میدان‌های مغناطیسی بدن



تمام یاخته‌های زنده بدن انسان به‌طور الکتریکی فعال‌اند. جریان‌های الکتریکی ضعیف در بدن، میدان‌های مغناطیسی ضعیف ولی قابل اندازه‌گیری تولید می‌کنند. اندازه میدان‌های حاصل از عضله‌های اسکلتی کوچک‌تر از  $10^{-10} \text{ T}$ ، یعنی در حدود یک میلیونیم میدان مغناطیسی زمین است. میدان‌های مغناطیسی حاصل از مغز بسیار ضعیف‌تر و در حدود  $10^{-12} \text{ T}$  هستند و برای اندازه‌گیری آنها باید مغناطیس‌سنج‌های بسیار حساس به کار برد. در حال حاضر، چنین مغناطیس‌سنج‌هایی به نام اسکویید ساخته شده‌اند. شکل روبه‌رو یک دستگاه اسکویید را نشان می‌دهد که در حال اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تولید شده در مغز است.

نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان: در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی وجود دارد. همچنین در بخش ۳-۴ با نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان آشنا شدیم. حال فرض کنید برای تولید میدان مغناطیسی به جای آهنربا، از یک سیم حامل جریان استفاده کنیم. اگر سیم حامل جریان دیگری را در نزدیکی این سیم قرار دهیم، آیا نیرویی بر آن وارد می‌شود؟ آزمایش نشان می‌دهد که پاسخ این پرسش مثبت است. به طوری که اگر جریان‌ها در یک جهت از دو سیم موازی بگذرند، نیروی بین آنها راباشی است (شکل ۳-۱۶ الف). همچنین اگر جریان‌ها در دو جهت مخالف از دو سیم موازی بگذرند، نیروی بین آنها رانشی است (شکل ۳-۱۶ ب).



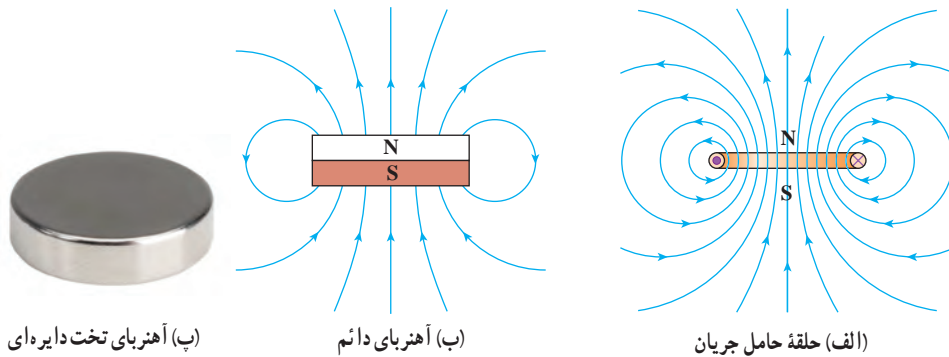
**شکل ۳-۱۶** نیروی بین دو سیم موازی حامل جریان و رسم خطوط میدان مغناطیسی برآیند آنها. الف) برای جریان‌های همسو، راباشی است و ب) برای جریان‌های ناهمسو، رانشی است.

میدان مغناطیسی ناشی از یک حلقه دایره‌ای حامل جریان: شکل ۳-۱۷ الف خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف یک حلقه رسانای دایره‌ای نشان می‌دهد که حامل جریان  $I$  است. همان‌طور که دیده می‌شود خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیه داخلی حلقه به یکدیگر نزدیک‌ترند؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است. افزون بر این، در نقطه‌های روی محور حلقه، میدان موازی محور است. جهت خط‌های میدان مغناطیسی حلقه را می‌توان با قاعده دست راست به روش نشان داده شده در شکل ۳-۱۷ ب تعیین کرد.



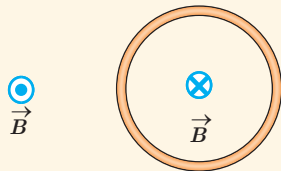
**شکل ۳-۱۷** الف) خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک حلقه حامل جریان. ب) طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقه حامل جریان با استفاده از برآه‌ده آهن. ب) استفاده از قاعده دست راست برای تعیین جهت  $\vec{B}$  یک حلقه حامل جریان.

بررسی و مقایسه میدان مغناطیسی یک حلقه حامل جریان و یک آهنربای تخت دایره‌ای شکل، نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی آنها درست مانند یکدیگر است (شکل ۳-۱۸). به همین دلیل، هر حلقه حامل جریان را به‌عنوان یک دو قطبی مغناطیسی در نظر می‌گیرند.



شکل ۳-۱۸ حلقه حامل جریان دو قطب دارد و میدان مغناطیسی آن مانند یک آهنربای دائم تخت دایره‌ای شکل است.

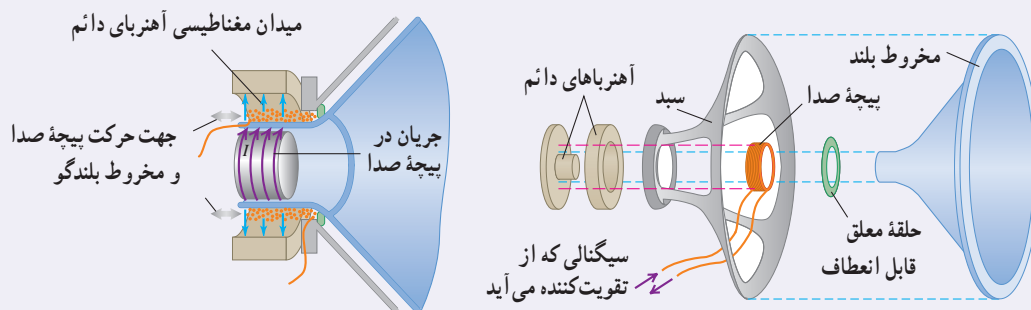
### پرسش ۳-۸



شکل روبه‌رو، یک حلقه حامل جریان را نشان می‌دهد که جهت خط‌های میدان مغناطیسی درون و بیرون آن نشان داده شده است. جهت جریان را در این حلقه تعیین کنید.

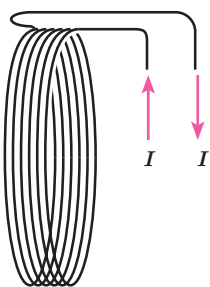
### خوب است بدانید: طرز کار بلندگو

یک کاربرد متداول نیروهای مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان در بلندگوها یافت می‌شود (شکل زیر). میدان مغناطیسی که توسط آهنربای دائمی تولید می‌شود نیرویی بر پیچه صدا وارد می‌کند که با جریانی که از پیچه می‌گذرد متناسب است؛ جهت این نیرو بسته به جهت جریان، به طرف راست یا به طرف چپ است. جریانی که از تقویت‌کننده می‌آید هم از نظر جهت و هم از نظر بزرگی نوسان می‌کند. پیچه و مخروط بلندگو که به آن متصل است با دامنه‌ای متناسب با دامنه جریان در پیچه، نوسان می‌کند. با افزایش جریان تقویت‌کننده، دامنه‌های نوسان و موج صوتی حاصل از حرکت مخروط افزایش می‌یابد.



اجزای یک بلندگو. آهنربای دائمی میدان مغناطیسی‌ای تولید می‌کند که نیروهایی بر جریان‌هایی که از پیچه صدا می‌گذرد وارد می‌کند؛ برای جریان  $I$  که در شکل نشان داده شده است نیرو به طرف راست است. اگر جریان الکتریکی در پیچه صدا نوسان کند، مخروط بلندگو که متصل به پیچه صداست با همان بسامد نوسان می‌کند.





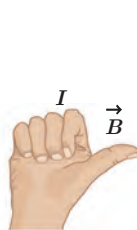
شکل ۳-۱۹ پیچ

استفاده از یک تک حلقه برای تولید میدانی با اندازه مطلوب ممکن است نیازمند آن چنان جریان بزرگی باشد که از پیشینه جریان مجاز سیم حلقه فراتر باشد. در چنین شرایطی به جای تک حلقه، از پیچه‌ها برای تولید میدان مغناطیسی استفاده می‌شود (شکل ۳-۱۹). از پیچه‌ها برای تولید میدان مغناطیسی در بسیاری از وسیله‌های برقی استفاده می‌شود.

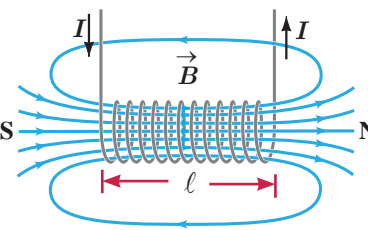
میدان مغناطیسی حاصل از سیملوله حامل جریان: سیملوله، سیم درازی است که به صورت مارپیچی بلند، پیچیده شده است. با عبور جریان الکتریکی از سیملوله، در فضای اطراف آن میدان مغناطیسی به وجود می‌آید. طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک سیملوله حامل جریان الکتریکی در شکل ۳-۲۰ الف و پ نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود، خط‌های میدان داخل سیملوله بسیار متراکم‌تر از خط‌های میدان در خارج آن است و این نشانگر بزرگ‌تر بودن میدان در داخل سیملوله است. افزون بر این، خط‌های میدان در داخل سیملوله، به ویژه در نقطه‌های نسبتاً دور از لبه‌های آن تقریباً موازی و هم فاصله‌اند و این، نشانگر یکنواخت بودن میدان مغناطیسی درون سیملوله است. جهت میدان مغناطیسی سیملوله، به کمک قاعده دست راست که در شکل نشان داده شده است تعیین می‌شود (شکل ۳-۲۰ ب).



(ب)



(ب)



(الف)

شکل ۳-۲۰ الف) میدان مغناطیسی یک سیملوله حامل جریان. ب) تعیین جهت میدان به کمک قاعده دست راست. پ) طرح خط‌های میدان مغناطیسی سیملوله با استفاده از براده آهن.

اگر قطر حلقه‌های سیملوله در مقایسه با طول آن، بسیار کوچک و حلقه‌های آن، خیلی به هم نزدیک باشند، به این سیملوله، **سیملوله آرمانی** گفته می‌شود. میدان مغناطیسی داخل یک سیملوله آرمانی در نقطه‌های دور از لبه‌ها یکنواخت است و اندازه آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{\ell} \quad (3-4) \quad (\text{سیملوله آرمانی})$$

در این رابطه،  $I$  جریان عبوری،  $\ell$  طول سیملوله،  $N$  تعداد دورهای سیملوله و  $\mu_0$  تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر  $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$  است.

### مثال ۳-۳

سیملوله‌ای آرمانی به طول ۱۵cm دارای ۶۰۰ حلقه سیم نزدیک به هم است. اگر جریان ۸۰۰mA از سیملوله بگذرد، بزرگی میدان مغناطیسی را در نقطه‌ای درون سیملوله و دور از لبه‌های آن پیدا کنید.

**پاسخ:** با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$\ell = 15\text{cm} = 0.15\text{m}, \quad N = 600, \quad I = 800\text{mA} = 800 \times 10^{-3}\text{A}, \quad B = ?$$

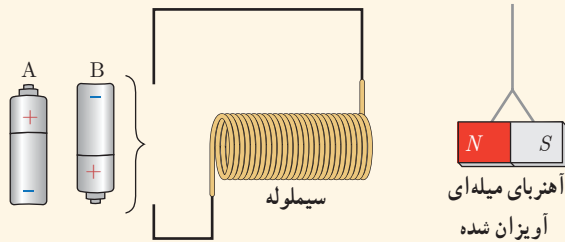
به این ترتیب داریم:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{\ell} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})(600)(800 \times 10^{-3} \text{ A})}{0.15\text{m}} \approx 4/0 \times 10^{-3} \text{ T} = 40\text{G}$$

## تمرین ۳-۲

سیملوله‌ای آرمانی به طول  $40\text{ cm}$  چنان طراحی شده است که جریان پیشینه‌ای به شدت  $1/2\text{ A}$  می‌تواند از آن بگذرد. با عبور این جریان از سیملوله، اندازه میدان مغناطیسی درون آن و دور از لبه‌ها  $27\text{ G}$  می‌شود. تعداد دورهای سیملوله چقدر باید باشد؟

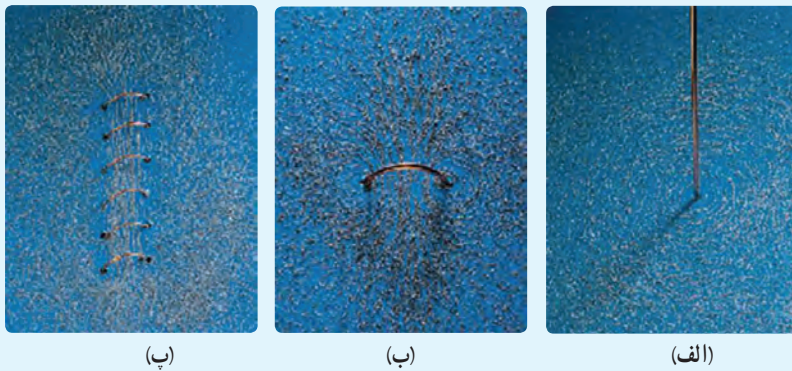
## پرسش ۳-۹



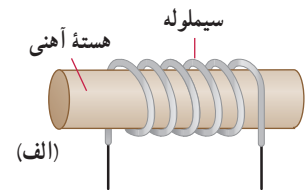
کدام باتری را در مدار شکل روبه‌رو قرار دهیم تا آهنربای میله‌ای آویزان شده به طرف سیملوله جذب شود؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.

## فعالیت ۳-۵

آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان با استفاده از براده آهن، طرح خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف یک سیم بلند (شکل الف)، یک حلقه دایره‌ای (شکل ب) و یک سیملوله حامل جریان (شکل پ) ایجاد کرد.

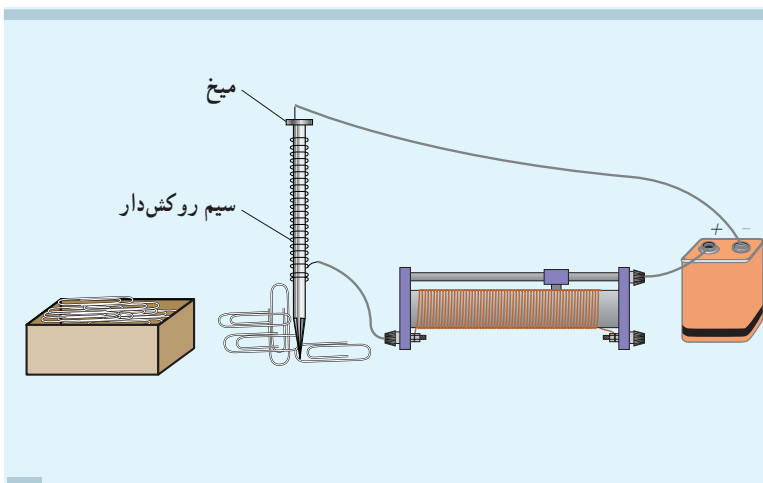


سیملوله با هسته آهنی — آهنربای الکتریکی : شکل ۳-۲۱ الف سیملوله‌ای با یک هسته آهنی را نشان می‌دهد. وقتی جریانی در سیملوله برقرار می‌شود، میدان مغناطیسی سیملوله، در هسته آهنی خاصیت مغناطیسی القا می‌کند و هسته آهنی، آهنربا می‌شود. این آهنربا را آهنربای الکتریکی می‌نامند. آهنربای الکتریکی صنعتی (شکل ۳-۲۱ ب) شامل پیچ‌های حامل جریان است که تعداد دور سیم زیادی دارد و میدان مغناطیسی حاصل از آن قادر است مقدار زیادی میله‌های فولادی و دیگر قراضه‌های آهن را بلند کند. هر چه تعداد دورهای سیملوله و جریانی که از آن می‌گذرد بیشتر باشد، آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود. وجود هسته آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیملوله می‌شود. میدان مغناطیسی سیملوله بدون هسته آهنی به قدری ضعیف است که در عمل کاربردهای کمی دارد.



شکل ۳-۲۱ الف) سیملوله با هسته آهنی  
ب) آهنربای الکتریکی صنعتی

## فعالیت ۳-۶

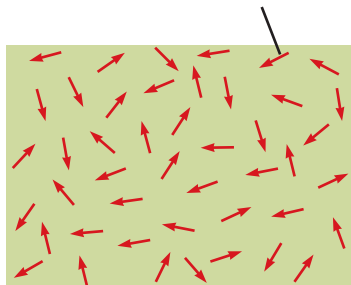


قسمتی از سیم نازک روکش داری را دور میخ آهنی نسبتاً بلندی ببچید و مدار مطابق شکل تشکیل دهید. با تغییر مقاومت رثوستا، جریان عبوری از مدار را تغییر دهید. بررسی کنید برای جریان‌های متفاوت، آهنربای الکتریکی چه تعداد گیره فلزی را می‌تواند بلند کند. (ب) اگر تعداد دورهای سیم دو برابر شود، نتیجه کار چه تفاوتی خواهد داشت؟

## ۳-۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

رفتار آهنرباهای دائمی، نوارهای مغناطیسی پشت کارت‌های بانکی و دیسک‌های رایانه‌ای به‌طور مستقیم به ویژگی‌های مغناطیسی مواد بستگی دارد.

هر ذره سازنده مواد پارامغناطیسی یک آهنربای میکروسکوپی است.

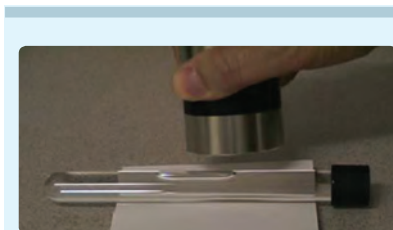


شکل ۳-۲۲ سمت‌گیری کاتوره‌ای دو قطبی‌های مغناطیسی در یک ماده پارامغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی

موادی را که اتم‌ها یا مولکول‌های سازنده آنها خاصیت مغناطیسی داشته باشند، مواد مغناطیسی می‌نامند. در واقع می‌توان گفت کوچک‌ترین ذره‌های تشکیل دهنده این مواد (اتم‌ها یا مولکول‌ها) مانند دو قطبی مغناطیسی رفتار می‌کنند. در این کتاب، دو قطبی‌های مغناطیسی را با یک پیکان کوچک نشان داده‌ایم که می‌توانند جهت‌گیری‌های متفاوتی داشته باشند و هر کدام از آنها وابسته به یک اتم یا مولکول اند. در ادامه به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می‌پردازیم.

**مواد پارامغناطیسی:** اتم‌های مواد پارامغناطیسی، خاصیت مغناطیسی دارند اما دو قطبی‌های مغناطیسی وابسته به آنها، به‌طور کاتوره‌ای سمت‌گیری کرده‌اند و میدان مغناطیسی خالصی ایجاد نمی‌کنند (شکل ۳-۲۲). با قرار دادن مواد پارامغناطیسی درون میدان مغناطیسی خارجی قوی (مثلاً نزدیک یک آهنربای قوی)، دو قطبی‌های مغناطیسی آنها، مانند عقربه قطب‌نما در نزدیکی آهنربا رفتار می‌کنند و به مقدار مختصری در راستای خط‌های میدان مغناطیسی منظم می‌شوند. با دور کردن آهنربا از این مواد، دو قطبی‌های مغناطیسی آنها، دوباره به‌طور کاتوره‌ای سمت‌گیری می‌کنند. به این ترتیب، می‌توان گفت مواد پارامغناطیسی در حضور میدان‌های مغناطیسی قوی، خاصیت مغناطیسی ضعیف و موقت پیدا می‌کنند. اورانیم، پلاتین، آلومینیم، سدیم، اکسیژن و اکسید نیتروژن از جمله مواد پارامغناطیسی اند.

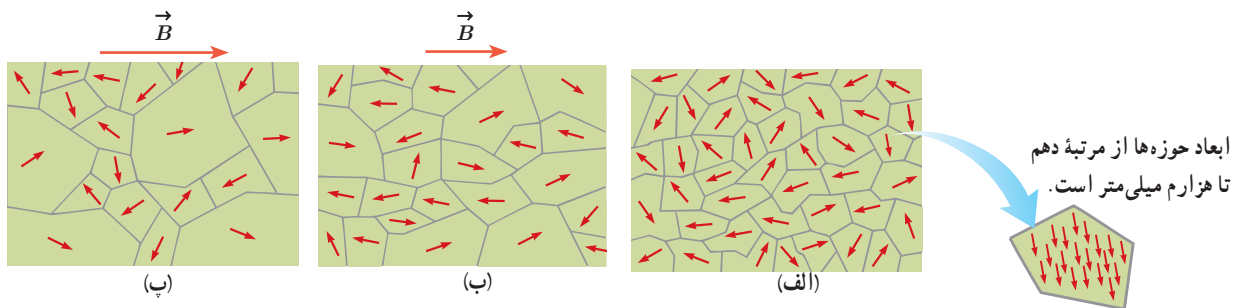
## فعالیت ۳-۷



یک لوله آزمایش را تا نزدیکی لبه آن از الکل طبی (اتانول ۹۶ درجه) پر کنید. در لوله را ببندید و آن را به‌طور افقی قرار دهید. مطابق شکل، یک آهنربای نتودیمیم را بالای حباب هوای درون لوله بگیرید و به آرامی آهنربا را حرکت دهید. دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به‌گفت‌وگو بگذارید.

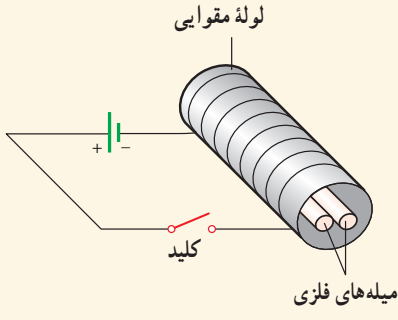
**مواد دیامغناطیسی:** اتم‌های مواد دیامغناطیسی، نظیر مس، نقره، سرب و بیسموت، به‌طور ذاتی فاقد خاصیت مغناطیسی‌اند. به عبارت دیگر، هیچ یک از اتم‌های این مواد، دارای دو قطبی مغناطیسی خالصی نیستند. با وجود این، حضور میدان مغناطیسی خارجی، می‌تواند سبب القای دو قطبی‌های مغناطیسی در خلاف سوی میدان خارجی، در مواد دیامغناطیسی شود.

**مواد فرومغناطیسی:** نوع دیگری از مواد به نام مواد فرومغناطیسی وجود دارد که اتم‌های آنها به‌طور ذاتی دارای دو قطبی مغناطیسی هستند. آهن، نیکل، کبالت و بسیاری از آلیاژهای دارای این عنصرها فرومغناطیسی‌اند. برهم‌کنش‌های قوی بین دو قطبی‌های مغناطیسی در این مواد موجب می‌شود که این دو قطبی‌ها، حتی در نبود میدان خارجی، در ناحیه‌هایی که حوزه‌های مغناطیسی نامیده می‌شود، همسو شوند. نمونه‌ای از ساختار حوزه‌ها در مواد فرومغناطیسی در شکل ۳-۲۳ الف نشان داده شده است. مواد فرومغناطیسی را می‌توان با قرار دادن در یک میدان مغناطیسی، آهنربا کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی بر حوزه‌های مغناطیسی باعث می‌شود که دو قطبی‌های مغناطیسی هر حوزه تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند و جهت آنها به جهت میدان خارجی متمایل شود. به این ترتیب، حوزه‌هایی که نسبت به میدان همسو هستند، رشد می‌کنند و حجمشان زیاد می‌شود. از سوی دیگر حجم حوزه‌هایی که سمت‌گیری آنها در راستای میدان نیست، کم می‌شود. در این فرایند، مرز بین بیشتر حوزه‌ها جابه‌جا می‌شود، و ماده خاصیت آهنربایی پیدا می‌کند. شکل ۳-۲۳ ب یک ماده فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی ضعیف و شکل ۳-۲۳ پ در یک میدان مغناطیسی خارجی قوی تر نشان می‌دهد.



**شکل ۳-۲۳** (الف) ماده فرومغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی خارجی. (ب) ماده فرومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی ضعیف. (پ) ماده فرومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی قوی.

حوزه‌های مغناطیسی برخی از مواد فرومغناطیسی، در حضور میدان مغناطیسی خارجی به سهولت تغییر می‌کند و ماده به‌سادگی آهنربا می‌شود و با حذف میدان خارجی نیز، خاصیت آهنربایی خود را به‌آسانی از دست می‌دهد. این مواد را مواد **فرومغناطیسی نرم** می‌نامند. از این مواد در ساخت هسته پیچ‌ها و سیملوله‌ها استفاده می‌شود. مواد فرومغناطیسی نرم برای ساختن آهنرباهای الکتریکی (آهنرباهای غیر دائم) نیز مناسب‌اند (چرا؟). برخی مواد دیگر مانند فولاد (آهن به اضافه ۲ درصد کربن)، آلیاژهای آهن، کبالت و نیکل به سختی آهنربا می‌شوند؛ یعنی در حضور میدان مغناطیسی خارجی، حجم حوزه‌ها در آنها به سختی تغییر می‌کند. این مواد را مواد **فرومغناطیسی سخت** می‌نامند. در این مواد، سمت‌گیری دو قطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها پس از حذف میدان خارجی، تا مدت زمان زیادی، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. به همین دلیل، این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب‌اند.



دو میله فلزی بلند مطابق شکل روبه‌رو درون سیملوله‌ای که دور یک لوله مقوایی پیچیده شده است قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از این سیملوله، مشاهده می‌شود که دو میله از یکدیگر دور می‌شوند. وقتی کلید باز و جریان در مدار قطع می‌شود، میله‌ها به محل اولیه بازمی‌گردند.

الف) چرا با عبور جریان از پیچه، میله‌ها از یکدیگر دور می‌شوند؟

ب) با دلیل توضیح دهید میله‌های فلزی از نظر مغناطیسی در کدام دسته قرار می‌گیرند.

### ۳-۷ پدیده القای الکترومغناطیسی

تا اینجا، با آثار مغناطیسی جریان الکتریکی آشنا شدید که در سال ۱۸۲۰ میلادی توسط اورستد کشف شد. در سال ۱۸۳۱ فاراده پس از آزمایش‌های فراوان، مشاهده کرد که عبور آهنربا از یک پیچه، سبب برقراری جریان الکتریکی در پیچه می‌شود. این اثر که امروزه به قانون القای الکترومغناطیسی فاراده شناخته می‌شود، اساس کار مولدها برای تولید جریان الکتریکی است. در این بخش، به بررسی القای نیروی محرکه الکتریکی در یک مدار بسته خواهیم پرداخت. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده بیشتر آشنا می‌شوید.

### آزمایش ۳-۴

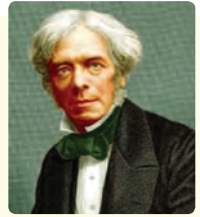
#### هدف: بررسی پدیده القای الکترومغناطیسی

وسایله‌های مورد نیاز: گالوانومتر، آهنربای میله‌ای، سیملوله یا پیچه و سیم رابط  
شرح آزمایش:

- دو سر سیملوله را به گالوانومتر ببندید.
- یکی از قطب‌های آهنربا را وارد سیملوله کنید (شکل روبه‌رو).
- مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، یادداشت کنید.
- اکنون آهنربا را از سیملوله خارج کنید. مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، دوباره یادداشت کنید.
- مراحل بالا را برای قطب دیگر آهنربا تکرار کنید.
- آزمایش را در حالی انجام دهید که آهنربا ثابت باشد و سیملوله به آن نزدیک یا از آن دور شود. آیا نتیجه آزمایش تغییری می‌کند؟ توضیح دهید.

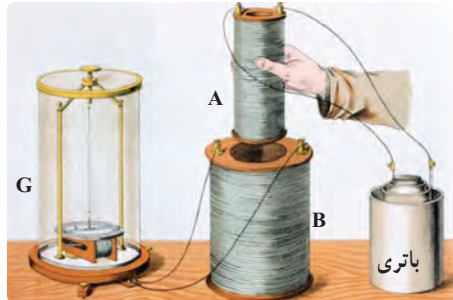


در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فاراده دانشمند انگلیسی و تقریباً هم‌زمان با او جوزف هانری دانشمند آمریکایی، با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۳-۴ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ درست مانند وقتی که در مدار، باتری وجود دارد (شکل ۳-۲۴). این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند.



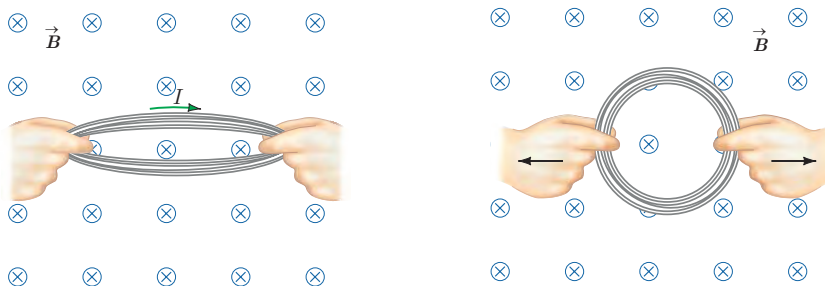
مایکل فاراده (۱۸۶۷-۱۷۹۱)

مایکل فاراده، پسر یک آهنگر انگلیسی بود. به گفته خود او: «تحصیلات من بسیار معمولی بود. خواندن را کمی بیشتر از حد مقدماتی و نوشتن و ریاضیات را در حد شاگرد یک مدرسه روزانه می‌دانستم. ساعت‌های خارج از مدرسه من در خانه و خیابان‌ها می‌گذشت.» وی در سن ۱۲ سالگی به عنوان شاگرد در یک کتاب‌فروشی مشغول به کار شد. فاراده ۱۹ ساله بود که به او اجازه داده شد تا در جلسه سخنرانی سرهمفری دیوی، شیمی‌دان مشهور (۱۸۲۹-۱۷۷۸)، که در مؤسسه سلطنتی لندن برگزار می‌شد، حضور یابد. مؤسسه سلطنتی یک مرکز مهم پژوهش و آموزش علوم بود. فاراده به شدت علاقه‌مند علوم شد و پیش خود به تحصیل علم شیمی پرداخت. در سال ۱۸۱۳ تقاضای شغلی در مؤسسه سلطنتی کرد و دیوی او را به عنوان یک همکار در امور پژوهشی استخدام کرد. فاراده به زودی نبوغ خود را به عنوان یک آزمایشگر نشان داد. وی مقاله‌های مهمی در شیمی، خواص مغناطیسی، الکتریسیته و نور نوشت و سرانجام به عنوان رئیس مؤسسه سلطنتی برگزیده شد. فاراده را به سبب کشف‌های بسیارش یکی از بزرگ‌ترین دانشمندان تجربی عصر خود می‌دانند.

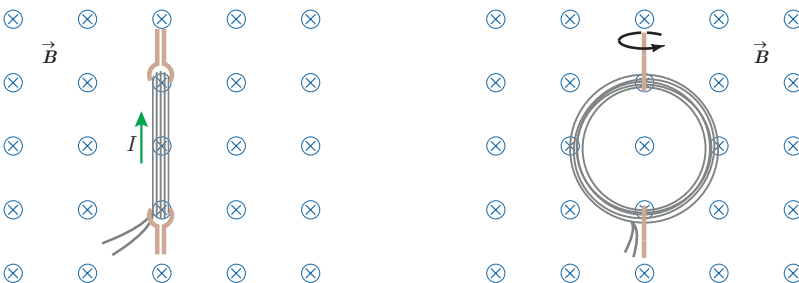


**شکل ۳-۲۴** فاراده برای پی بردن به پدیده القای الکترومغناطیسی، به جای آهنربای دائمی، از آهنربای الکتریکی (سیملوله A که به باتری وصل شده است) استفاده کرد. فاراده مشاهده کرد که با عبور آهنربا از درون سیملوله B و تغییر میدان مغناطیسی در محل این سیملوله، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود.

پیش از این دیدیم که با تغییر اندازه میدان در محل سیملوله، جریان در آن القا می‌شود. به جز این روش، به روش‌های دیگری نیز می‌توان در پیچه یا سیملوله، جریان الکتریکی القا کرد. اگر مساحت پیچه‌ای انعطاف پذیر را درون میدان مغناطیسی بکنواخت  $\vec{B}$  تغییر دهیم (شکل ۳-۲۵) یا پیچه‌ای را درون میدان مغناطیسی بکنواخت  $\vec{B}$  بچرخانیم (شکل ۳-۲۶)، مشاهده می‌شود که در هنگام انجام این کارها، جریانی در پیچه القا می‌شود.



**شکل ۳-۲۵** تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$ ، جریانی در پیچه القا می‌کند.



**شکل ۳-۲۶** با چرخاندن پیچه درون میدان مغناطیسی  $\vec{B}$ ، زاویه بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. این تغییر زاویه سبب القای جریان در پیچه می‌شود.

### ۳-۸ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

پیش از این دیدیم که به دلایلی مانند تغییر میدان مغناطیسی در محل یک پیچه، تغییر مساحت پیچه در حضور میدان مغناطیسی یا چرخش پیچه درون میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در آن القا می‌شود. عامل اساسی و مشترک در ایجاد جریان القایی در همه این آزمایش‌ها، **تغییر شار مغناطیسی** عبوری از پیچه است.

شار مغناطیسی، کمیتی زده‌ای است و برای میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  که از پیچه‌ای با مساحت معین  $A$  می‌گذرد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۵-۳)$$

همان‌طور که در شکل ۳-۲۷ دیده می‌شود:  $\theta$  زاویه بین بردار میدان مغناطیسی و نیم خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم خط را به طور خط چین روی شکل نشان داده‌ایم).

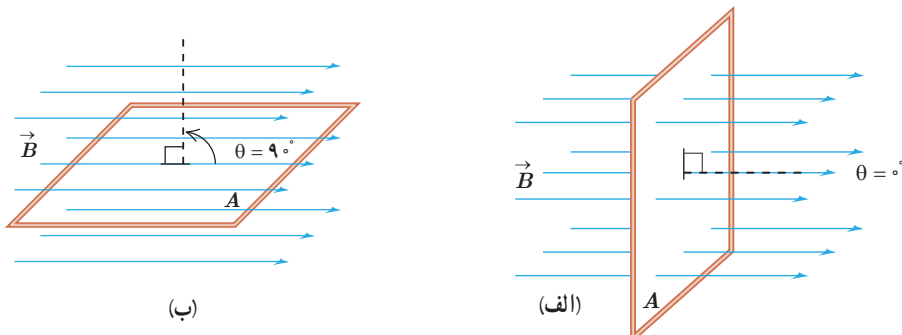
یکای SI شار مغناطیسی، وپر (Wb) است که با توجه به رابطه ۳-۵ داریم:  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$ . **توجه:** همواره دو جهت برای رسم نیم خط عمود بر یک سطح معین وجود دارد. علامت شار مغناطیسی عبوری از این سطح نیز به انتخاب این جهت بستگی دارد. برای مثال، در شکل ۳-۲۷، نیم خط عمود را در طرفی از سطح رسم کرده‌ایم که زاویه بین آن و جهت میدان  $\vec{B}$  کمتر از  $90^\circ$  است و در نتیجه شار عبوری از سطح مثبت می‌شود. اگر نیم خط عمود را در طرف دیگر سطح انتخاب کنیم، در این صورت، زاویه آن با جهت میدان  $\vec{B}$  بیشتر از  $90^\circ$  خواهد شد و شار عبوری از سطح منفی می‌شود. هر دو انتخاب به یک اندازه مفیدند، ولی در حل یک مسئله، همواره باید یکی را انتخاب کنیم و تا پایان آن را تغییر ندهیم.

### مثال ۳-۴

الف) مطابق شکل الف، سطح حلقهٔ رسانایی، به شکل مربع با ضلع  $2 \text{ cm}$ ، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی  $25^\circ \text{G}$  قرار دارد. شار عبوری از این حلقه را به دست آورید.

ب) اگر حلقه را بچرخانیم به طوری که سطح حلقه موازی با خط‌های میدان مغناطیسی شود، شار مغناطیسی عبوری از آن چقدر می‌شود؟

پ) تغییر شار مغناطیسی عبوری از حلقه را وقتی از موقعیت شکل الف به موقعیت شکل ب می‌چرخد به دست آورید. (ت) اگر این تغییر شار مغناطیسی در بازهٔ زمانی  $\Delta t = 0.1 \text{ s}$  رخ داده باشد، آهنگ تغییر شار  $(\Delta \Phi / \Delta t)$  را پیدا کنید.



**پاسخ:** الف) وقتی مطابق شکل الف، سطح حلقه عمود بر خط‌های میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، زاویه بین میدان  $\vec{B}$  و نیم‌خط عمود بر سطح حلقه برابر صفر می‌شود. به این ترتیب، شار عبوری از سطح حلقه برابر است با

$$A = 0.2\text{m} \times 0.2\text{m} = 0.04\text{m}^2, \quad B = 250\text{G} = 2/50 \times 10^{-2}\text{T}, \quad \theta = 0^\circ$$

$$\Phi = BA \cos \theta = (2/50 \times 10^{-2}\text{T})(0.04\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 1 \times 10^{-3}\text{Wb} = 1\text{mWb}$$

ب) وقتی مطابق شکل ب، حلقه می‌چرخد و سطح آن موازی با خط‌های میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، زاویه بین میدان  $\vec{B}$  و نیم‌خط عمود بر سطح حلقه برابر  $90^\circ$  می‌شود. از آنجا که  $\cos 90^\circ = 0$  است، در این شرایط، هیچ شاری از سطح حلقه عبور نمی‌کند.

پ) همان‌طور که دیدید شار عبوری از سطح حلقه در وضعیت شکل الف و وضعیت شکل ب، به ترتیب، برابر  $\Phi_1 = 1\text{mWb}$  و  $\Phi_2 = 0$  است. به این ترتیب، تغییر شار عبوری از سطح حلقه برابر  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -1\text{mWb}$  می‌شود. علامت منفی نشان می‌دهد در حین چرخش حلقه از وضعیت شکل الف به وضعیت شکل ب، شار مغناطیسی عبوری از سطح آن کاهش یافته است.

ت) با توجه به نتیجه قسمت پ، آهنگ تغییر شار  $(\Delta\Phi/\Delta t)$  برابر است با

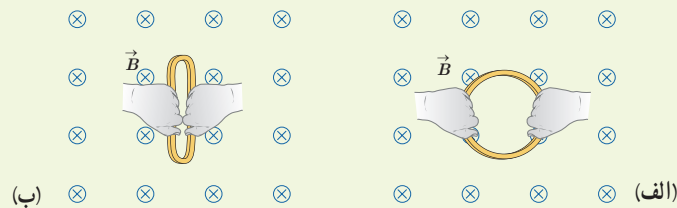
$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1 \times 10^{-3}\text{Wb}}{0.1\text{s}} = -0.01\text{Wb/s}$$

### تمرین ۳-۲

الف) حلقه‌ای به مساحت  $25\text{cm}^2$  درون میدان مغناطیسی یکنواخت درون سویی به اندازه  $3\text{T}$  قرار دارد (شکل الف). شار مغناطیسی عبوری از حلقه را به دست آورید.

ب) اگر مطابق شکل ب و بدون تغییر  $\vec{B}$ ، مساحت سطح حلقه را به  $1\text{cm}^2$  برسانیم، شار مغناطیسی عبوری از حلقه را در این وضعیت به دست آورید.

پ) اگر این تغییر شار در بازه زمانی  $\Delta t = 0.2\text{s}$  رخ داده باشد، آهنگ تغییر شار  $(\Delta\Phi/\Delta t)$  را پیدا کنید.



### پرسش ۳-۱۱

کدام یک از یکاهای زیر معادل یکای وبر بر ثانیه (Wb/s) است؟

  $\Omega$ 
 A

 V

 V/A

اکنون که با تعریف و مفهوم شار مغناطیسی آشنا شدید دوباره نگاهی می‌کنیم به پدیده القای الکترومغناطیسی که در بخش قبل بررسی کردیم. همان‌طور که گفتیم عامل مشترک در تمامی پدیده‌هایی که منجر به تولید جریان القایی در مدار می‌شود، تغییر شار مغناطیسی عبوری از پیچه یا سیملوله است. بنابر قانون فاراده، هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است؛ یعنی هرچه آهنگ تغییر



شار مغناطیسی بیشتر باشد، نیروی محرکه القایی و در نتیجه جریان القایی تولید شده در مدار بیشتر خواهد بود. مثلاً در آزمایش‌های بخش ۳-۷، هرچه حرکتی که سبب تغییر شار مغناطیسی می‌شود سریع‌تر انجام شود، عقربه گالوانومتر بیشتر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان القایی بزرگ‌تری به وجود آمده است.

قانون فاراده برای پیچه یا سیملوله‌ای که از  $N$  دور مشابه تشکیل شده باشد با رابطه زیر بیان می‌شود:

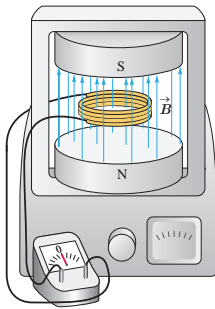
$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (۶-۳)$$

در این رابطه  $\bar{\mathcal{E}}$  نیروی محرکه القایی متوسط بر حسب ولت و  $\Delta\Phi/\Delta t$  آهنگ تغییر شار مغناطیسی بر حسب وبر بر ثانیه (Wb/s) است. اگر مقاومت پیچه یا سیملوله برابر  $R$  باشد، جریان القایی متوسط در آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{I} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} \quad (۷-۳)$$

همان‌طور که از رابطه ۳-۷ دیده می‌شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار مغناطیسی تغییر می‌کند، بیشتر باشد، جریان کوچک‌تری در آن القا می‌شود.

### مثال ۳-۵



پیچه‌ای شامل ۲۰۰ دور که مساحت هر حلقه آن  $۲۵\text{cm}^2$  است، مطابق شکل روبه‌رو بین قطب‌های یک آهنربای الکتریکی قرار گرفته است که میدان مغناطیسی یکنواخت تولید می‌کند. خط‌های میدان بر سطح پیچه عمودند. اگر اندازه میدان در بازه زمانی  $۲/۰\text{ms}$  از  $۰/۱۸\text{T}$  به  $۰/۲۲\text{T}$  افزایش یابد،

الف) نیروی محرکه القایی متوسط ایجاد شده در پیچه چقدر است؟

ب) اگر مقاومت پیچه  $۱\ \Omega$  باشد، جریان القایی متوسط که از پیچه می‌گذرد چقدر است؟

پاسخ: الف) نیم خط عمود بر سطح حلقه‌های پیچه را همسو با  $\vec{B}$  می‌گیریم. با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$N = 200 \quad \text{دور} \quad A = 25\text{cm}^2 \quad \theta = 0 \quad \Delta t = 2/0\text{ms}$$

$$B_1 = 0/18\text{T} \quad B_2 = 0/22\text{T} \quad \bar{\mathcal{E}} = ?$$

$$\Phi_1 = B_1 A \cos\theta = (0/18\text{T})(2/5 \times 10^{-2}\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 4/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

$$\Phi_2 = B_2 A \cos\theta = (0/22\text{T})(2/5 \times 10^{-2}\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 5/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

به این ترتیب، تغییر شار مغناطیسی برابر است با:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (5/5 \times 10^{-4}\text{Wb}) - (4/5 \times 10^{-4}\text{Wb}) = 1/0 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

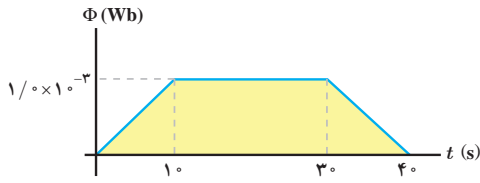
با قرار دادن این مقدار و داده‌های بالا در رابطه ۳-۶ داریم:

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(200) \frac{1/0 \times 10^{-4}\text{Wb}}{2/0 \times 10^{-3}\text{s}} = -10\text{V}$$

ب) با توجه به رابطه ۳-۷، جریان القایی متوسط در پیچه برابر است با:

$$\bar{I} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} = \frac{-10\text{V}}{1\ \Omega} = -10\text{A}$$

## مثال ۳-۶



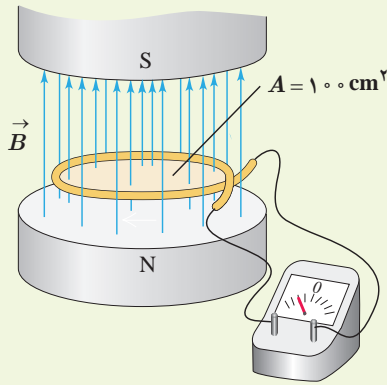
تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در نمودار شکل روبه‌رو نشان داده شده است. نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را در هریک از بازه‌های زمانی  $(0, 1\text{ s})$ ،  $(1\text{ s}, 3\text{ s})$  و  $(3\text{ s}, 4\text{ s})$  محاسبه کنید.

**پاسخ:** در بازه زمانی  $0$  تا  $1\text{ s}$ ، نیروی محرکه القایی متوسط برابر است با:

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(1) \frac{(1/0 \times 10^{-3} \text{ Wb} - 0)}{1\text{ s}} = -1/0 \times 10^{-4} \text{ V}$$

در بازه زمانی  $1\text{ s}$  تا  $3\text{ s}$  شار ثابت مانده است. در نتیجه نیروی محرکه القایی متوسط برابر صفر است. در بازه زمانی  $3\text{ s}$  تا  $4\text{ s}$  شبیه آنچه در مورد بازه زمانی صفر تا  $1\text{ s}$  گفتیم، نیروی محرکه القایی متوسط برابر  $1/0 \times 10^{-4} \text{ V}$  است.

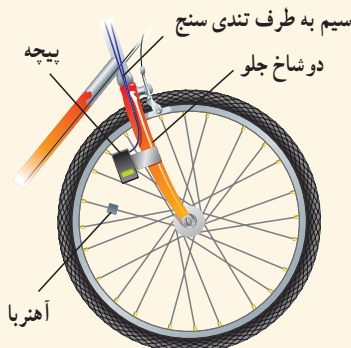
## تمرین ۳-۵



۱- میدان مغناطیسی بین قطب‌های آهنربای الکتریکی شکل روبه‌رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می‌کند و در مدت  $45\text{ s}$  از  $28\text{ T}$ ، رو به بالا، به  $17\text{ T}$ ، رو به پایین می‌رسد. در این مدت، الف) نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را به دست آورید. ب) اگر مقاومت حلقه  $1\ \Omega$  باشد، جریان القایی متوسط در حلقه را پیدا کنید.

۲- مساحت هر حلقه پیچ‌های  $3\text{ cm}^2$  و پیچ‌های متشکل از  $1000$  حلقه است. در ابتدا سطح حلقه‌ها بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت  $2\text{ s}$  پیچ‌ها بچرخد و سطح حلقه‌ها موازی میدان مغناطیسی زمین شود، نیروی محرکه القایی متوسط در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را  $50\text{ G}$  در نظر بگیرید.

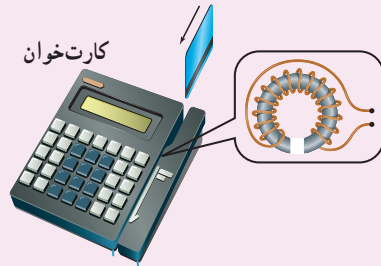
## پروژه ۳-۱۲



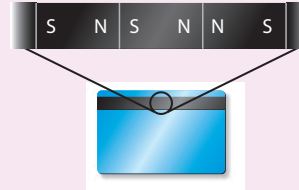
تندی سنج دوچرخه‌های مسابقه‌ای شامل یک آهنربای کوچک و یک پیچ است. آهنربا به یکی از پره‌های چرخ جلو و پیچ به دو شاخ فرمان متصل است (شکل روبه‌رو). دو سر پیچ با سیم‌های رسانا به نمایشگر تندی سنج (که در واقع نوعی رایانه کوچک است) وصل شده است. به نظر شما تندی سنج دوچرخه چگونه کار می‌کند؟ این موضوع را در گروه خود به گفت‌وگو بگذارید و نتیجه را به کلاس درس ارائه دهید.

## فناوری و کاربرد: کارت‌های اعتباری و دستگاه‌های کارت خوان

نوار مغناطیسی پشت کارت‌های اعتباری حاوی تعداد بسیار زیادی ذره فرومغناطیسی است که نوعی چسب خاص آنها را به هم متصل می‌کند. داده‌ها را که به صورت دودویی، یا صفر و یک به رمز درآورده‌اند، در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می‌کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری درون دستگاه کارت خوان کشیده می‌شود، میدان مغناطیسی ناشی از نوار مغناطیسی، روی پیچه قرار داده شده در دستگاه کارت خوان اثر می‌گذارد و جریان اندکی را در پیچه القا می‌کند (شکل ب). این جریان بسیار کوچک توسط دستگاه دیگری تقویت و داده‌های ذخیره شده در نوار مغناطیسی پشت کارت، رمزگشایی می‌شود. پس از رمزگشایی داده‌ها، دستور مورد نظر انجام می‌شود.



(ب) کشیدن کارت، جریان اندکی در پیچه دستگاه کارت خوان القا می‌کند.



(الف) داده‌ها را به صورت صفر و یک در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می‌کنند.

## خوب است بدانید: معاینه مغز با نیروهای محرکه القایی



برانگیزش (تحریک) مغناطیسی فرا جمجمه‌ای<sup>۱</sup> (TMS) روشی برای بررسی عملکرد بخش‌های مختلف مغز است. در این روش، پیچه‌ای روی سر شخص بیمار قرار داده می‌شود که جریان الکتریکی متغیری از آن می‌گذرد و در نتیجه میدان مغناطیسی متغیری تولید می‌کند. این میدان متغیر، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی و جریان القایی در ناحیه‌ای از مغز می‌شود که در زیر پیچه قرار دارد. پزشک با مشاهده واکنش مغز (مثلاً اینکه کدام عضله‌ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می‌کنند) می‌تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بیازماید.

## ۳-۹ قانون لنز

مدت کوتاهی پس از آنکه فاراده قانون القای الکترومغناطیسی را ارائه کرد، هاینریش لنز، دانشمند روس تبار، در سال ۱۸۳۴ میلادی روشی را برای تعیین جهت جریان القایی در یک پیچه یا در هر مدار بسته دیگری پیشنهاد کرد. این روش که بعدها به قانون لنز شهرت یافت، حاکی از آن است که:

**جریان حاصل از نیروی محرکه القایی در یک مدار یا پیچه در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی**

**از آن، با عامل به وجود آورنده جریان القایی، یعنی تغییر شار مغناطیسی، مخالفت می‌کند.**

علامت منفی در رابطه ۳-۶ نشان دهنده همین مخالفت است. توضیح دقیق‌تر این مطلب فراتر

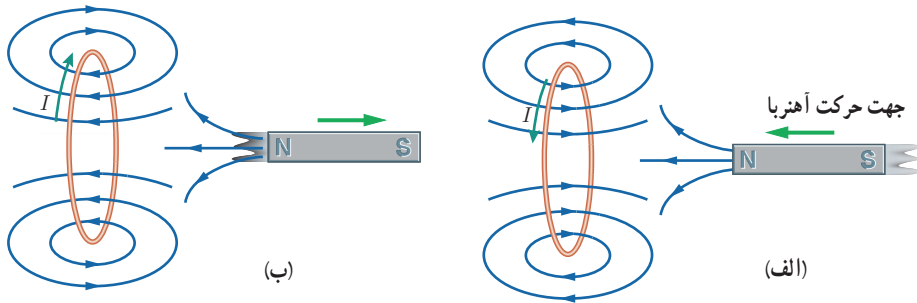
از سطح این کتاب است. در اینجا تنها به ذکر مثال‌هایی از چگونگی استفاده از قانون لنز برای تعیین جهت جریان القایی اکتفا می‌کنیم.

<sup>۱</sup> Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)



**هاینریش فردریش امیل لِنز (۱۸۰۴-۱۸۶۵)** از فیزیک‌دانان مشهور آلمانی و دارای تبار روس بود. وی در استونی که در آن دوران تحت امپراتوری روسیه بود به دنیا آمد. پس از اتمام دوره دبیرستان در سال ۱۸۲۰ وارد دانشگاه دُریِت شد و به تحصیل در زمینه فیزیک و شیمی پرداخت. لنز طی سال‌های ۱۸۲۳ تا ۱۸۲۶ میلادی، در ضمن یک سفر دریایی به دور دنیا، به مطالعه شرایط آب و هوایی و همچنین ویژگی‌های فیزیک دریا پرداخت و نتایج آن را در سال ۱۸۳۱ منتشر کرد. پس از این سفر، در دانشگاه سن پترزبورگ آغاز به کار نمود. لنز مطالعه الکترومغناطیس را در سال ۱۸۳۱ شروع کرد و بیشتر شهرتش برای فرمول‌بندی قانون لنز در الکترومغناطیس در سال ۱۸۳۴ است.

شکل ۳-۲۸ الف، آهنربایی را نشان می‌دهد که قطب  $N$  آن در حال نزدیک شدن به یک حلقه رساناست. در این وضعیت اندازه  $\vec{B}$  در محل حلقه افزایش می‌یابد و در نتیجه شار گذرنده از حلقه زیاد می‌شود. بنا به قانون لنز، جهت جریان القایی ایجاد شده در حلقه چنان است که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مخالفت کند. بنابراین، میدان مغناطیسی حلقه در خلاف سوی میدان مغناطیسی آهنربا می‌شود. با توجه به قاعده دست راست و از روی جهت میدان مغناطیسی حلقه، جهت جریان در حلقه تعیین می‌شود. همچنین اگر مطابق شکل ۳-۲۸ ب، قطب  $N$  آهنربا را از حلقه رسانا دور کنیم، جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، همسو با میدان آهنربا می‌شود و به این ترتیب با کاهش شار عبوری از حلقه، مخالفت می‌کند.



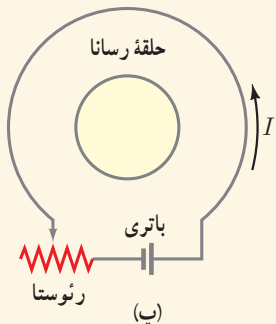
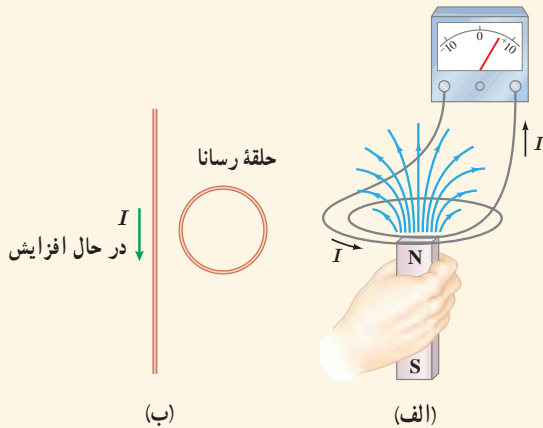
**شکل ۳-۲۸ الف)** وقتی آهنربا به حلقه رسانا نزدیک می‌شود جریان در جهتی در حلقه القا می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند. **ب)** با دور شدن آهنربا از حلقه رسانا، جریان در جهتی در حلقه القا می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با کاهش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند.

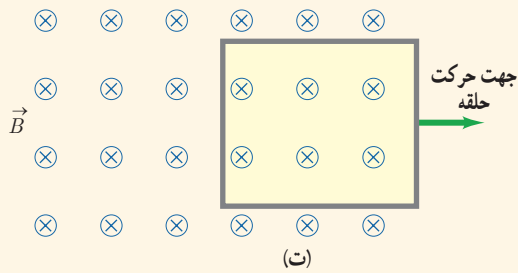
### پرسش ۳-۱۳

۱- با توجه به جهت جریان القایی در مدار شکل الف، توضیح دهید که آیا آهنربا رو به بالا حرکت می‌کند یا رو به پایین.

۲- شکل ب سیم بلند و مستقیمی را نشان می‌دهد که جریان عبوری از آن در حال افزایش است. جهت جریان القایی را در حلقه رسانای مجاور سیم تعیین کنید.

۳- اگر در مدار شکل پ مقاومت رنوستا افزایش یابد، جریان القایی در حلقه رسانای داخلی در چه جهتی ایجاد می‌شود؟





۴- حلقه رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل ت به طرف راست می کشیم و از میدان مغناطیسی درون سویی خارج می کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟

### خوب است بدانید: اثر دیامغناطیس

چرخش هر الکترون به دور هسته اتم را می توان به صورت یک حلقه میکروسکوپی جریان مدل سازی کرد. هرگاه ماده ای در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، شار مغناطیسی گذرنده از هر یک از این حلقه های میکروسکوپی افزایش می یابد و در نتیجه بنابر قانون لنز، در این حلقه ها، یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیس خارجی القا می شود. به این ویژگی که در اتم های همه مواد در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی رخ می دهد، پدیده یا اثر دیامغناطیس گفته می شود. اثر دیامغناطیسی در موادی نظیر بیسموت، جیوه، نقره، سرب، مس و کربن (الماس) بهتر نمایان می شود، زیرا اتم های آنها، فاقد دو قطبی های مغناطیسی دائمی اند. از آنجا که اثر دو قطبی های مغناطیسی دائمی در مواد فرومغناطیسی و پارامغناطیسی بسیار بیشتر از اثر دو قطبی های القایی است، اثر دیامغناطیس در این گونه مواد نمود کمتری دارد.

### ۱۰-۳ القاگرها

در فصل ۲ دیدیم که در فضای بین صفحه های یک خازن باردار، میدان الکتریکی ایجاد می شود و انرژی الکتریکی در این میدان ذخیره می شود. به همین ترتیب، می توان از القاگر (سیم بیچ) برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیره انرژی در این میدان استفاده کرد. القاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای الکترونیکی است.

شکل ۳-۲۹ تصویر چند القاگر را در اندازه ها و شکل های متفاوت نشان می دهد. نماد مداری القاگر،  $\text{---}\text{---}\text{---}$  است. ویژگی های فیزیکی هر القاگر، توسط ضریب القاوری آن تعیین می شود. ضریب القاوری که با نماد  $L$  نمایش داده می شود به عواملی همچون تعداد دور، طول و سطح مقطع القاگر و جنس هسته ای که داخل آن قرار می گیرد بستگی دارد. یکای SI ضریب القاوری، هانری (H) نام دارد.

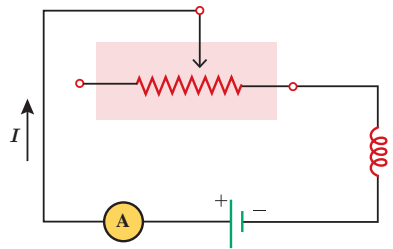


شکل ۳-۲۹ تصویری از چند القاگر در اندازه ها و شکل های متفاوت



**جوزف هانری (۱۸۷۸-۱۷۹۷):** یکی از فیزیک دانان تجربی قرن نوزدهم است که در آمریکا به دنیا آمد و کار خود را با آموزش علوم در یک مدرسه روستایی آغاز کرد. سپس به تحصیل در طب و مهندسی علاقه مند شد و سرانجام به فیزیک و ریاضیات روی آورد. هانری در سال ۱۸۳۱، هم زمان و مستقل از فاراده، موفق به کشف پدیده القای الکترومغناطیسی شد. وی همچنین توانست نوعی موتور الکترومغناطیسی و یک تلگراف جدید و کارآمد اختراع کند. یکای SI ضریب القاوری به احترام یک عمر فعالیت های علمی وی، هانری (H) انتخاب شده است.

**خود – القاوری:** مداری را مطابق شکل ۳-۳ در نظر بگیرید. این مدار شامل منبع نیروی محرکه، رئوستا، آمپرسنج و القاگری است که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان در مدار تغییر می‌کند. تغییر جریان در مدار، سبب تغییر میدان مغناطیسی القاگر می‌شود و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از آن نیز تغییر می‌کند. این فرایند سبب القای نیروی محرکه‌ای در القاگر می‌شود که بنابر قانون لنز با تغییر جریان عبوری از آن مخالفت می‌کند. این پدیده که می‌تواند در هر القاگری (از قبیل بیچه یا سیملوله) رخ دهد اثر **خود – القاوری** نامیده می‌شود.



شکل ۳-۳ مدار ساده شامل رئوستا، القاگر، باتری و آمپرسنج

## آزمایش ۳-۵

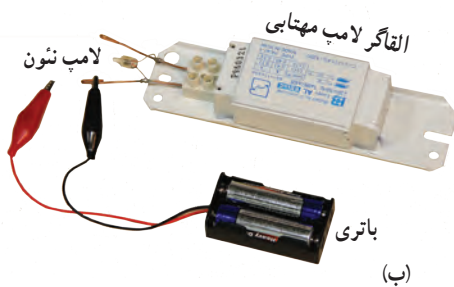
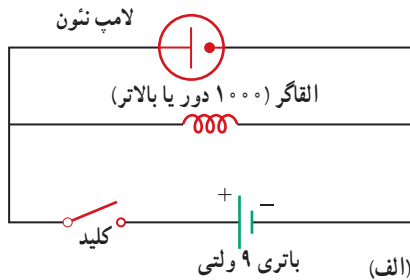
### هدف: بررسی اثر خود – القاوری

وسایله‌های مورد نیاز: لامپ نئون (لامپ فازمتری)، القاگر (۱۰۰۰ دور یا بالاتر)، باتری قلمی (۲ عدد) یا باتری ۹ ولتی، سیم رابط، کلید

شرح آزمایش:

- مداری مطابق شکل الف ببینید.
- کلید را وصل کنید. آیا لامپ روشن است؟ اینک کلید را قطع کنید. در لحظه قطع کردن کلید چه چیزی مشاهده می‌کنید؟ دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به گفت‌وگو بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

توجه: می‌توانید مطابق شکل ب، به جای القاگر از القاگر لامپ‌های مهتابی (که به اشتباه ترانس نامیده می‌شود) نیز استفاده کنید.



### خوب است بدانید:

#### کاربرد القاگرها در سامانه‌های انتقال برق

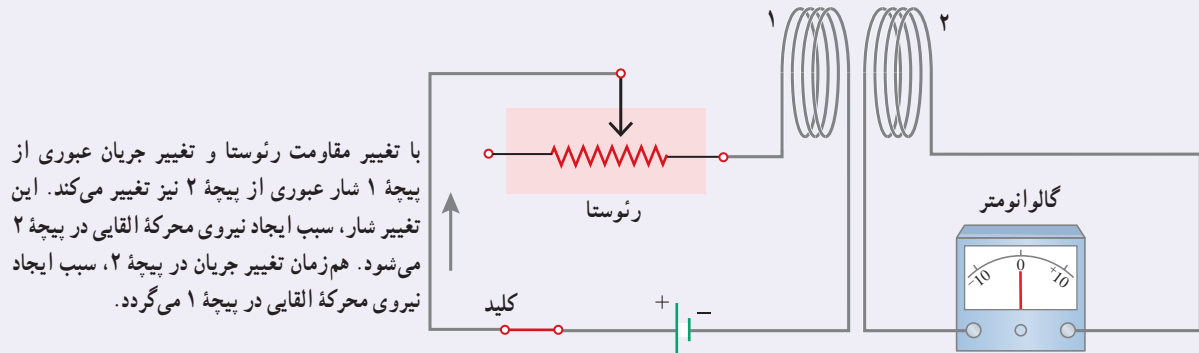
برخورد آذرخش به بخشی از یک سامانه انتقال توان الکتریکی موجب افزایش ناگهانی ولتاژ می‌شود که می‌تواند به اجزای سامانه و هر چیز دیگری که به آن وصل باشد (برای مثال، وسایله‌های برقی خانگی) آسیب برساند. برای کمینه کردن این آثار، القاگرهای بزرگی را در مسیر سامانه انتقال قرار می‌دهند. این کار باعث می‌شود که القاگر با هر تغییر سریع در جریان مخالفت کند و آن را فرو نشاند!

#### کاربرد القاگرها در لامپ‌های فلوروسان

همان‌طور که در ابتدای این بخش دیدیم القاگرها با تغییرات سریع جریان در مدار مخالفت می‌کنند، به همین دلیل نقش مهمی در لامپ‌های فلوروسان (مهتابی) دارند. در این لامپ‌ها، جریان الکتریکی از گاز رقیقی که فضای درون لامپ را پر کرده است می‌گذرد و گاز را یونیده و به پلاسما تبدیل می‌کند. پلاسما یک رسانای غیراھمی است و هرچه بیشتر یونیده شود مقاومت آن کمتر می‌شود. اگر ولتاژ به حد کافی بالایی به گاز اعمال شود، جریان می‌تواند بسیار زیاد شود و به مدار بیرونی لامپ فلوروسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر را به طور متوالی با لامپ فلوروسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل کننده همچنین باعث می‌شود تا لامپ فلوروسان بتواند با ولتاژ متناوب کار کند.

## خوب است بدانید: القای متقابل

شکل زیر اسباب آزمایش ساده‌ای را برای بررسی اثر القای متقابل نشان می‌دهد. جریان عبوری از پیچه ۱، میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  را به وجود می‌آورد. این میدان  $\vec{B}$ ، شار مغناطیسی‌ای را از پیچه ۲ می‌گذراند که در مجاورت آن قرار دارد. با تغییر دادن مقاومت رئوستا و تغییر جریان در پیچه ۱، میدان مغناطیسی پیچه ۱ و در نتیجه شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند؛ بنابر قانون فاراده، این تغییر شار، نیروی محرکه‌ای را در پیچه ۲ القا می‌کند که به ایجاد جریان القایی در این پیچه می‌انجامد. همچنین تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۱ می‌شود. این فرایند، **القای متقابل** نامیده می‌شود و به کمک آن می‌توان انرژی را از یک پیچه، به پیچه دیگر منتقل کرد.



با تغییر مقاومت رئوستا و تغییر جریان عبوری از پیچه ۱، شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۲ می‌شود. هم‌زمان تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۱ می‌گردد.



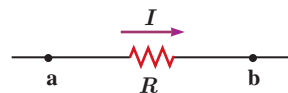
برای به حداقل رساندن اثر القای متقابل در برخی از مدارهای الکتریکی، القاگرهای مجاور را به گونه‌ای قرار می‌دهند که سطح حلقه‌های آنها بر یکدیگر عمود باشد.

در برخی از مدارهایی که از چندین القاگر به وجود آمده است، تغییرات جریان در یک القاگر می‌تواند نیروهای محرکه ناخواسته‌ای را در القاگرهای مجاور القا کند. به همین دلیل، در برخی از مدارهای الکتریکی، القای متقابل می‌تواند مزاحم باشد. برای هرچه کمتر کردن این اثر ناخواسته، باید سطح حلقه‌های القاگرهای مجاور را به طور عمود بر یکدیگر قرار داد (شکل روبه‌رو). در این صورت، اثر القای متقابل تا حد امکان کوچک می‌شود. القای متقابل کاربردهای مفید بسیاری نیز دارد. مثلاً در مبدل‌ها که در پایان همین فصل با آنها آشنا خواهید شد، القای متقابل، نقش مهمی در مقدار ولتاژ خروجی مبدل ایفا می‌کند.

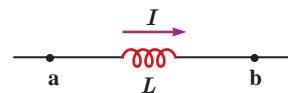
انرژی ذخیره شده در القاگر: وقتی توسط باتری جریانی در القاگر برقرار شود، مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی در مقاومت الکتریکی سیم‌های القاگر به صورت گرما تلف و بقیه آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در میدان القاگر با ضرب القابوری  $L$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (۸-۳)$$

مقاومت با جریان  $I$ : انرژی تلف شده است.



القاگر با جریان  $I$ : انرژی ذخیره شده است.



لازم است رفتار مقاومت و القاگر را به لحاظ انرژی اشتباه نگیرید (شکل ۳-۳۱). هنگام عبور جریان از مقاومت، انرژی وارد آن می‌شود، جریان چه پایا باشد و چه تغییر کند، این انرژی در مقاومت به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود؛ در حالی که در یک القاگر آرمانی (با مقاومت صفر) تنها وقتی انرژی وارد القاگر می‌شود که جریان در آن افزایش یابد. این انرژی تلف نمی‌شود؛ بلکه در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره شده و هنگام کاهش جریان، آزاد می‌شود. هنگام عبور جریان پایا از یک القاگر آرمانی (سیم پیچ بدون مقاومت)، انرژی به آن وارد یا از آن خارج نمی‌شود.

**شکل ۳-۳۱** مقاومت قطعه‌ای است که در آن انرژی به طور غیرقابل برگشت تلف می‌شود. برخلاف آن، انرژی ذخیره شده در القاگر حامل جریان را می‌توان هنگام کاهش جریان، بازیافت.

### مثال ۳-۷

متخصصان صنعت برق، علاقه‌مندند راه‌های مؤثری را برای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی در ساعت‌های کم مصرف (کم‌باری) بیابند تا با استفاده از آن، نیاز مشترکان را در ساعت‌های پرمصرف (اوج بار) تأمین کنند. یک ایده فرضی، استفاده از یک القاگر بزرگ است. ضریب القاوری این القاگر چقدر باشد تا بتواند  $۱/۰ \text{ kWh}$  انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان  $۲۰۰ \text{ A}$  ذخیره کند؟ **پاسخ:** مقدار انرژی ذخیره شده مورد نیاز  $U = ۱/۰ \text{ kWh}$  و جریان  $I = ۲۰۰ \text{ A}$  داده شده است. از معادله  $۳-۸$  ضریب القاوری را به دست می‌آوریم:

$$U = ۱/۰ \text{ kWh} = (۱/۰ \times ۱۰^۳ \text{ W})(۳۶۰۰ \text{ s}) = ۳/۶ \times ۱۰^۶ \text{ J}$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow L = \frac{2U}{I^2} = \frac{2(۳/۶ \times ۱۰^۶ \text{ J})}{(۲۰۰ \text{ A})^2} = ۱/۸ \times ۱۰^۲ \text{ H}$$

ضریب القاوری به دست آمده، بسیار بیشتر از ضریب القاوری یک القاگر معمولی (در حد میلی‌هانری) است که در آزمایشگاه از آن استفاده می‌کنیم. افزون بر این همان‌طور که در فصل ۲ دیدیم سیم‌های معمولی که بتوانند جریان  $۲۰۰ \text{ A}$  را از خود عبور دهند باید قطر بسیار بزرگی داشته باشند. اندازه یک القاگر  $۱۸ \text{ H}$  که از سیم‌های معمولی ساخته شده باشد و بتواند چنین جریانی را تحمل کند باید خیلی بزرگ (به اندازه یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری‌های موجود، این ایده غیرعملی است و توجیه اقتصادی ندارد.

### فناوری و کاربرد: انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو



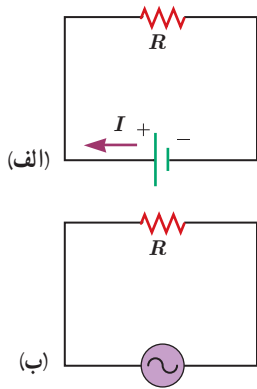
انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو، از انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی پیچه احتراق تأمین می‌شود.

انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه‌های احتراق خودروهای با موتور بنزینی دارد. پیچه اولیه با حدود  $۲۵۰^\circ$  دور به باتری خودرو بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی‌ای تولید می‌کند. این پیچه، درون یک پیچه ثانویه با  $۲۵۰۰^\circ$  دور سیم خیلی نازک قرار گرفته است. برای جرقه زدن شمع، جریان در پیچه اولیه قطع می‌شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر می‌رسد و نیروی محرکه الکتریکی ده‌ها هزار ولتی در پیچه ثانویه القا می‌کند. در نتیجه انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی همراه با جریانی لحظه‌ای از پیچه ثانویه به طرف شمع می‌رود و جرقه‌ای تولید می‌کند که سبب احتراق مخلوط سوخت و هوا در سیلندرهای موتور می‌شود (شکل روبه‌رو).



### ۳-۱۱ جریان متناوب

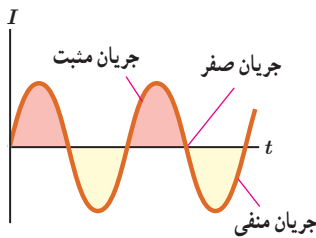
در اواخر قرن نوزدهم، بحث‌های داغی بین توماس ادیسون و جورج وستینگهاوس دربارهٔ بهترین روش انتقال انرژی الکتریکی از محل تولید تا محل مصرف صورت گرفت. ادیسون موافق جریان مستقیم (dc) بود، در حالی که وستینگهاوس از جریان متناوب (ac) حمایت می‌کرد. سرانجام، وستینگهاوس پیروز شد و پس از آن سامانه‌های انتقال و توزیع برق و بیشتر وسایل خانگی با جریان متناوب به کار افتادند.



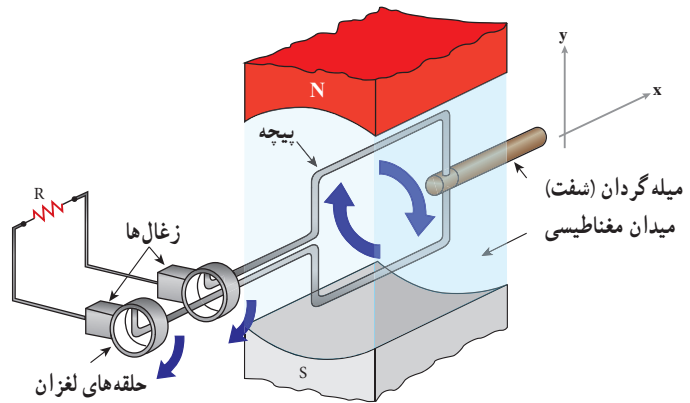
شکل ۳-۳ الف) مدار ساده جریان مستقیم، که در آن جریان با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. ب) مدار ساده جریان متناوب، که در آن ولتاژ و جریان با گذشت زمان به طور سینوسی تغییر می‌کنند.

شکل ۳-۳ دو مدار سادهٔ جریان مستقیم و جریان متناوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید جهت جریان در مدار جریان مستقیم معین است، در حالی که در مدار جریان متناوب، به دلیل تغییر جهت جریان با گذشت زمان، نمی‌توان جهت معینی را برای جریان در نظر گرفت. تمامی نیروگاه‌های تولید برق در دنیا و از جمله ایران، جریان متناوب تولید می‌کنند که تابعی سینوسی از زمان است و به همین دلیل، جریان متناوب سینوسی نامیده می‌شود (شکل ۳-۳۳).

تولید جریان متناوب: یکی از کاربردهای مهم اثر القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. پیش از این دیدیم که برای تولید نیروی محرکهٔ القایی باید شار عبوری از پیچه تغییر کند. رایج‌ترین روش برای تغییر شار و در نتیجه تولید جریان القایی، تغییر زاویهٔ  $\theta$  در رابطهٔ شار مغناطیسی، یعنی  $\Phi = BA \cos \theta$  است. شکل ۳-۳۴ پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت دور محور  $x$  بچرخد.



شکل ۳-۳۳ جریان متناوب سینوسی، متداول‌ترین نوع جریان متناوب است.



شکل ۳-۳۴ اجزای یک مولد (ژنراتور) جریان متناوب. حرکت مکانیکی از طریق میلۀ گردان، سبب چرخیدن پیچه در میدان مغناطیسی می‌شود و جریان متناوبی را در مدار به وجود می‌آورد.

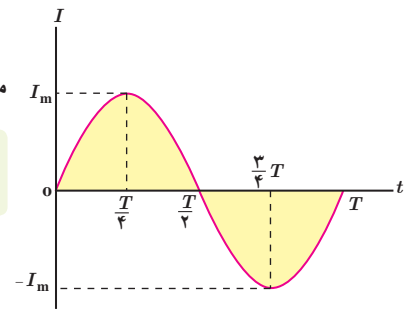
هر دور چرخش پیچه، معادل  $2\pi$  رادیان است. اگر پیچه به‌طور یکنواخت بچرخد و هر دور چرخش آن  $T$  ثانیه طول بکشد، پیچه در مدت  $t$  ثانیه، به اندازه  $\frac{t}{T}$  دور خواهد چرخید. در نتیجه اگر سطح پیچه در لحظه  $t=0$  عمود بر میدان مغناطیسی باشد ( $\theta=0$ )، پس از گذشت  $t$  ثانیه، زاویه  $\theta$  برابر  $(2\pi)(\frac{t}{T})$  رادیان است. زمان یک دور چرخش کامل پیچه ( $T$ ) را **دوره** یا **زمان تناوب** می‌نامند. شاری که در لحظهٔ  $t$  از پیچه می‌گذرد برابر است با

$$\Phi = BA \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (9-3)$$

می توان نشان داد با تغییر شار مغناطیسی، جریانی که در پیچه القا می شود، از رابطه زیر به دست می آید<sup>۱</sup>:

$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (۱-۳)$$

در این رابطه  $I_m$  بیشینه جریان القا شده در پیچه است. رابطه ۱-۳ همچنین نشان می دهد که جریان القایی در پیچه، به طور سینوسی تغییر می کند، به همین سبب به آن **جریان متناوب** می گویند. نمودار این جریان بر حسب زمان، در یک دوره در شکل ۳-۳۵ رسم شده است.

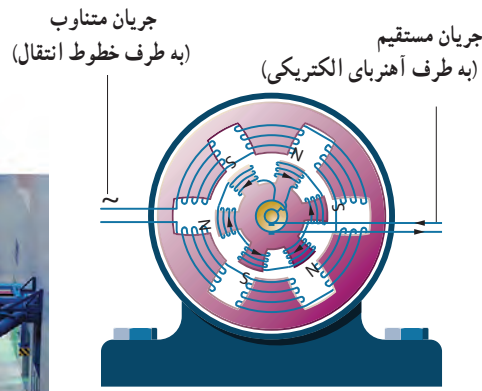


شکل ۳-۳۵ نمودار جریان متناوب سینوسی در یک دوره

در نیروگاه های تولید برق، برای تولید جریان متناوب از مولدهای خاصی استفاده می شود که به آنها مولدهای صنعتی جریان متناوب می گویند. در مولدهای صنعتی پیچه ها ساکن اند و آهنربای الکتریکی در آنها می چرخد (شکل ۳-۳۶). در نیروگاه های تولید برق در ایران، آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، ۵۰ دور درون پیچه می چرخد. این کمیت را بسامد برق تولید شده می نامند و به صورت  $50 \text{ Hz}$  بیان می کنند. یکای SI بسامد  $s^{-1}$  یا  $\text{Hz}$  (هرتز) است.



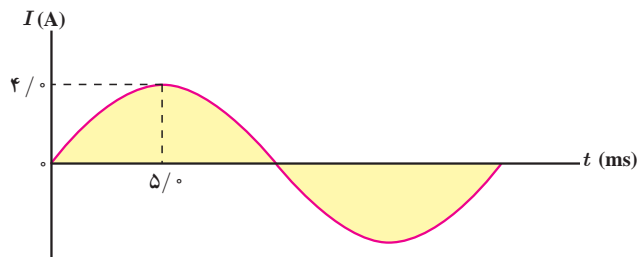
(ب)



(الف)

شکل ۳-۳۶ الف) در مولدهای صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچه ها، جریان متناوب تولید می شود. ب) نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق.

### مثال ۳-۸



شکل روبه رو، نمودار جریان متناوب سینوسی را نشان می دهد که یک مولد جریان متناوب تولید کرده است. معادله جریان بر حسب زمان را بنویسید.

**پاسخ:** چون ربع چرخه در  $5/0 \text{ ms}$  طی شده است، دوره تناوب برابر  $T = 20 \text{ ms}$  است. همچنین با توجه به نمودار، بیشینه جریان  $I_m = 4/0 \text{ A}$  است. در نتیجه از رابطه ۳-۹ داریم:

$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t = (4/0 \text{ A}) \sin \left( \frac{2\pi}{20 \times 10^{-3} \text{ s}} \right) t = 4/0 \sin 100 \pi t$$

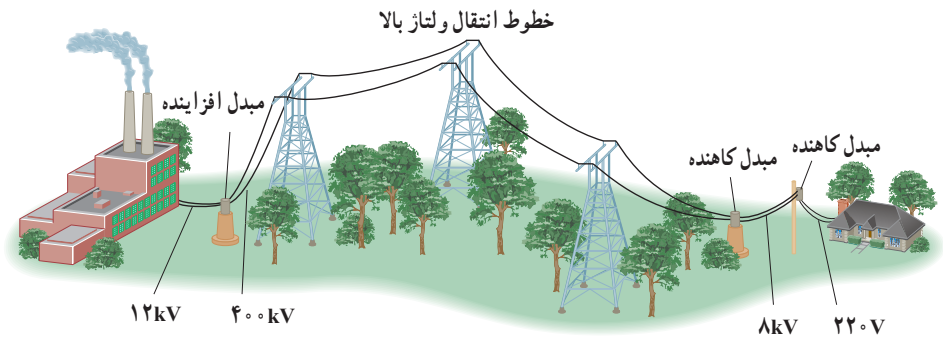
نتیجه نهایی بر حسب یکاهای SI نوشته شده است.

۱- اثبات این رابطه، خارج از اهداف برنامه درسی این کتاب است.

معادله جریان - زمان یک مولد جريان متناوب بر حسب يکاهای SI به صورت  $I = (4/0 \times 10^{-3}) \sin 250 \pi t$  است. الف) جريان در دو لحظه  $t_1 = 2/0 \text{ ms}$  و  $t_2 = 8/0 \text{ ms}$  چقدر است؟ ب) دوره تناوب جريان را به دست آورید و نمودار جريان - زمان را در یک دوره کامل رسم کنید.

**مبدل ها:** یکی از مزیت‌های مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان‌تر از dc است. برای انتقال توان الکتریکی در فاصله‌های دور، تا جایی که امکان دارد باید از ولتاژهای بالا و جریان‌های کم استفاده کنیم. این کار اتلاف توان را در خط‌های انتقال کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به کاهش جريان می‌توان از سیم‌های نازک‌تری استفاده و در مصرف مواد اولیه ساخت سیم صرفه‌جویی کرد.

خط‌های انتقال توان الکتریکی به طور معمول از ولتاژهایی در حدود  $400 \text{ kV}$  استفاده می‌کنند (شکل ۳-۳۸). از طرف دیگر، ملاحظات ایمنی و الزامات عایق‌بندی در ساخت وسایل خانگی و صنعتی، ولتاژهای به نسبت پایین‌تری را در محل مصرف انرژی ضروری می‌کند. ولتاژ استاندارد برای سیم‌کشی خانگی در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر  $220 \text{ V}$  است. تبدیل ولتاژ مورد نیاز با استفاده از مبدل‌ها صورت می‌گیرد.



**شکل ۳-۳۸** قبل از انتقال توان الکتریکی از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزایشنده، ولتاژ را تا حدود  $400 \text{ kV}$  افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهشنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا توان الکتریکی با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.

الف) هنگامی که آهنربای دائمی به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟

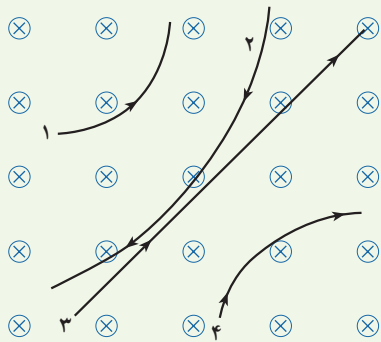
ب) ساختن نوک ثابت آهن چه مزیتی دارد؟

پ) این وسیله را باید به درون گلولی کودک وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد؛ چرا غلاف باید انعطاف پذیر باشد؟

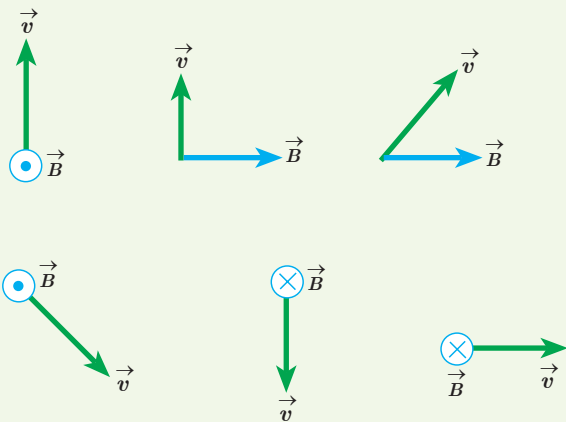
ت) پزشک می‌خواهد یک گیره آهنی کاغذ و یک واشر آلومینیومی را از گلولی کودک بیرون بیاورد؛ کدام یک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟

### ۳-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی

۴) چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون سو مسیرهایی مطابق شکل زیر می‌پیمایند. درباره نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟

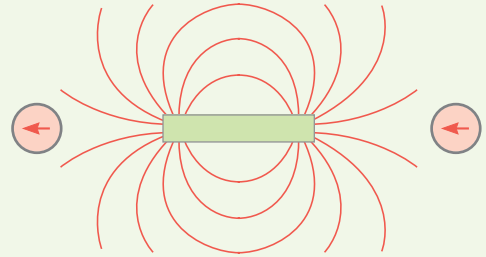


۵) جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هر یک از حالت‌های نشان داده در شکل زیر تعیین کنید.



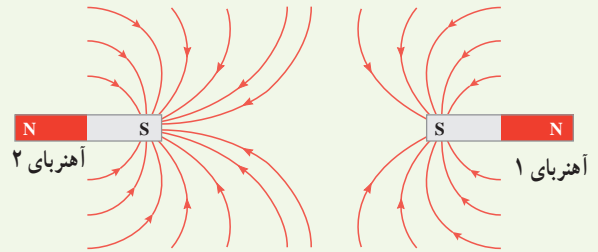
### ۱-۳ و ۲-۳ مغناطیسی و قطب‌های مغناطیسی و میدان مغناطیسی

۱) با توجه به جهت گیری عقربه‌های مغناطیسی در شکل زیر، قطب‌های آهنربای میله‌ای و جهت خط‌های میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

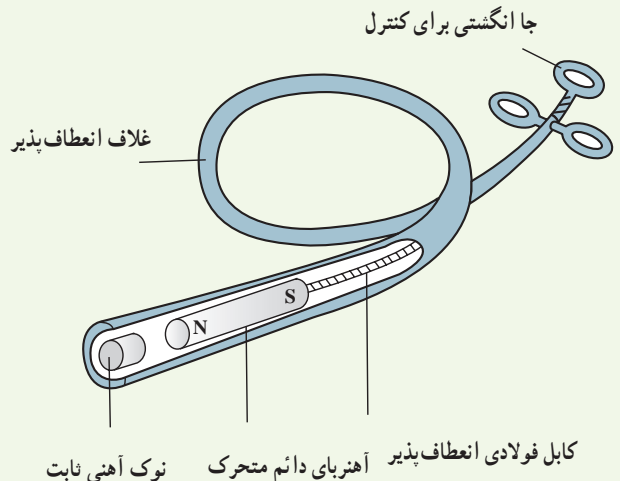


۲) الف) آهنربای میله‌ای با قطب‌های نامشخص در اختیار داریم. دست کم دو روش را برای تعیین قطب‌های این آهنربا بیان کنید.

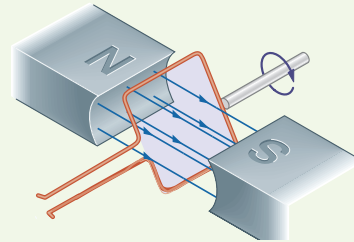
ب) خط‌های میدان مغناطیسی بین دو آهنربا در شکل زیر نشان داده شده است. اندازه میدان مغناطیسی را در نزدیکی قطب‌های آهنرباها با هم مقایسه کنید.



۳) کودکی یک قطعه کوچک آهنی را بلعیده است. پزشک می‌خواهد آن را با دستگاه شکل زیر بیرون بیاورد.



۶ حلقه رسانای مستطیل شکلی که حامل جریان  $I$  است، مطابق شکل درون میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد. جهت جریان را در حلقه تعیین کنید.

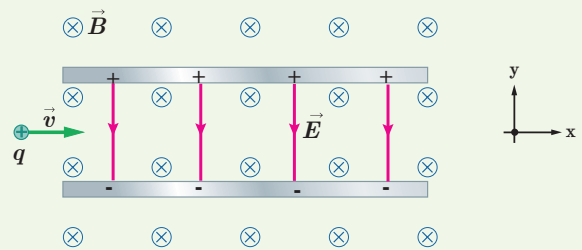


۷ پروتونی با تندی  $4/4 \times 10^6 \text{ m/s}$  درون میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه  $18 \text{ mT}$  در حرکت است. جهت حرکت پروتون با جهت  $\vec{B}$ ، زاویه  $60^\circ$  می‌سازد.

الف) اندازه نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

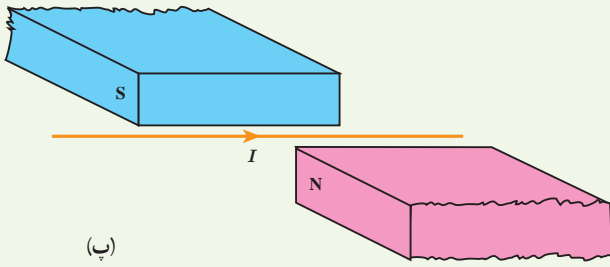
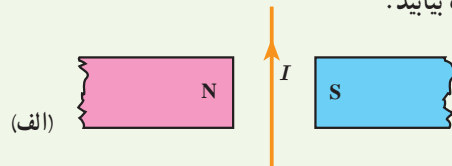
ب) اگر تنها این نیرو بر پروتون وارد شود، شتاب پروتون را حساب کنید. (بار الکتریکی پروتون  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و جرم آن  $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$  در نظر بگیرید).

۸ ذره باردار مثبتی با جرم ناچیز و با سرعت  $\vec{v}$  در امتداد محور  $x$  وارد فضایی می‌شود که میدان‌های یکنواخت  $\vec{B}$  و  $\vec{E}$  وجود دارد (شکل زیر). اندازه این میدان‌ها برابر  $E = 45 \text{ N/C}$  و  $B = 0.18 \text{ T}$  است. تندی ذره چقدر باشد تا در همان امتداد محور  $x$  به حرکت خود ادامه دهد؟

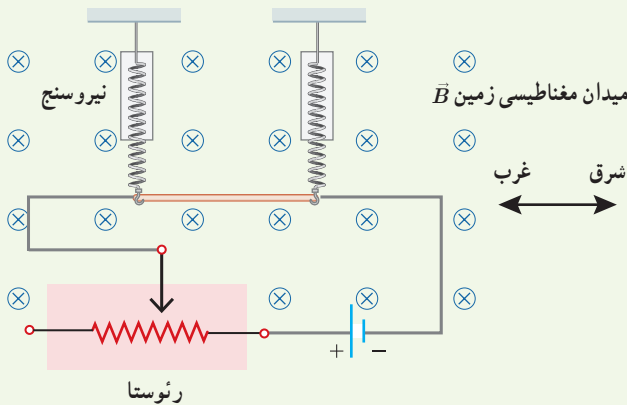


۳-۴ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان

۹ جهت نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های الف، ب و پ با استفاده از قاعده دست راست بیابید.

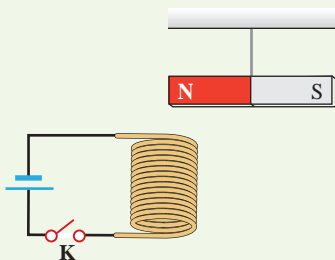


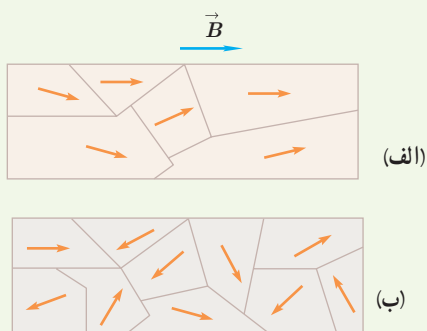
۱۰ یک سیم حامل جریان  $1/6$  آمپر مطابق شکل زیر با دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به طور افقی و در راستای غرب - شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را یکنواخت، به طرف شمال و اندازه  $0.5 \text{ mT}$  بگیرید. الف) اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را پیدا کنید. ب) اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور کند؟ جرم هر متر از طول این سیم  $8$  گرم است ( $g = 9.8 \text{ N/kg}$ ).



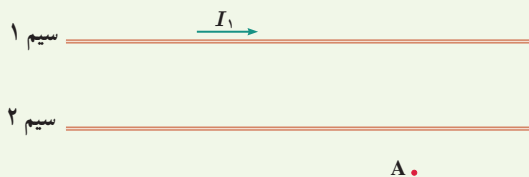
۳-۵ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

۱۱ یک آهنربای میله‌ای مطابق شکل زیر، بالای سیملوله‌ای آویزان شده است. توضیح دهید با بستن کلید  $K$  چه تغییری در وضعیت آهنربا رخ می‌دهد.

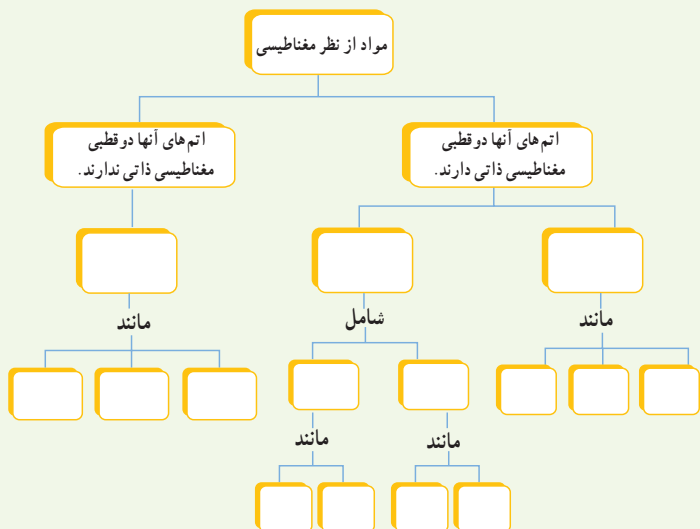




۱۲ شکل زیر، دو سیم موازی و بلند حامل جریان را نشان می‌دهد. اگر میدان مغناطیسی برآیند حاصل از این سیم‌ها در نقطه A صفر باشد، جهت جریان آن را در سیم ۲ پیدا کنید.

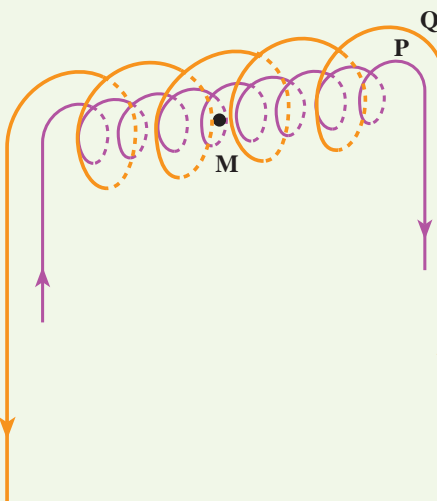


۱۶ با توجه به آنچه در بخش ویژگی‌های مغناطیسی مواد دیدید، نقشه مفهومی زیر را کامل کنید.



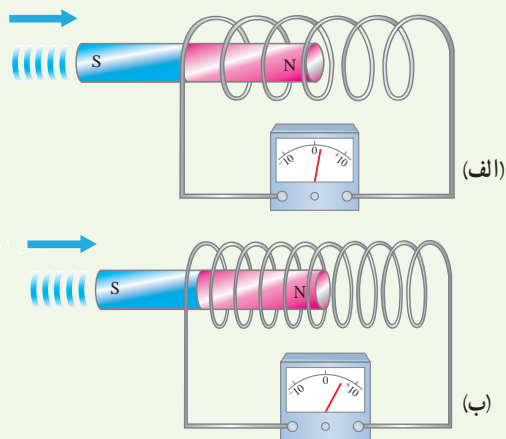
۱۳ سیم‌لوله‌ای شامل  $25^\circ$  حلقه است که دور یک لوله پلاستیکی توخالی به طول  $14^\circ$  متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیم‌لوله  $8A$  باشد، اندازه میدان مغناطیسی درون سیم‌لوله را حساب کنید.

۱۴ در شکل زیر دو سیم‌لوله P و Q هم محورند و طول برابر دارند. تعداد دور سیم‌لوله P برابر  $200$  و تعداد دور سیم‌لوله Q برابر  $300$  است. اگر جریان  $1A$  از سیم‌لوله Q عبور کند، از ناشی از دو سیم‌لوله در نقطه M (روی محور دو سیم‌لوله) صفر شود؟



### ۳-۸ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

۱۷ دو سیم‌لوله با حلقه‌های با مساحت یکسان ولی با تعداد دور متفاوت را مطابق شکل‌های زیر به ولت‌سنج حساسی وصل کرده‌ایم. دریافت خود را از این شکل‌ها بنویسید. (آهن‌رباها مشابه‌اند و با تندی یکسانی به طرف سیم‌لوله‌ها حرکت می‌کنند.)



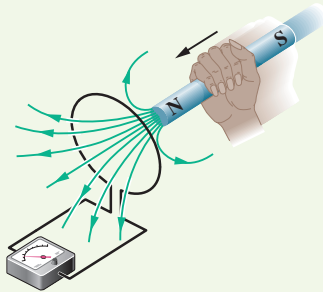
### ۳-۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

۱۵ شکل الف حوزه‌های مغناطیسی ماده فرومغناطیسی را درون میدان خارجی  $\vec{B}$  نشان می‌دهد. شکل ب همان ماده را پس از حذف میدان  $\vec{B}$  نشان می‌دهد. نوع ماده فرومغناطیسی را با ذکر دلیل تعیین کنید.

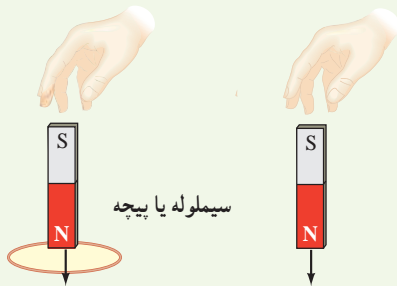
تغییر می‌کند و به  $0.4\%$  در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه  $5\text{ cm}^2$  باشد، اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.

### ۹-۳ قانون لنز

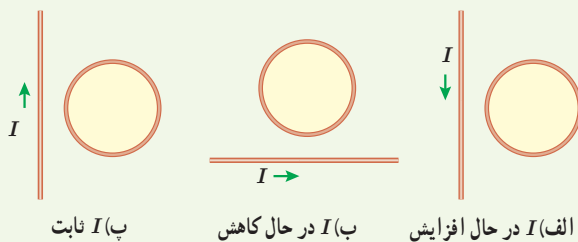
۲۱ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل زیر به یک حلقه رسانا نزدیک می‌کنیم. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



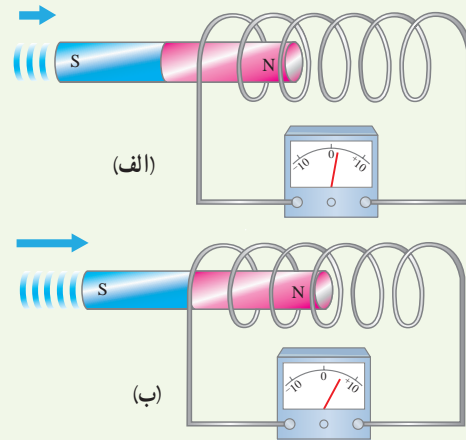
۲۲ دو آهنربای میله‌ای مشابه را مطابق شکل، به طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می‌کنیم به طوری که یکی از آنها از حلقه رسانایی عبور می‌کند. اگر سطح زمین در محل برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرورفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.)



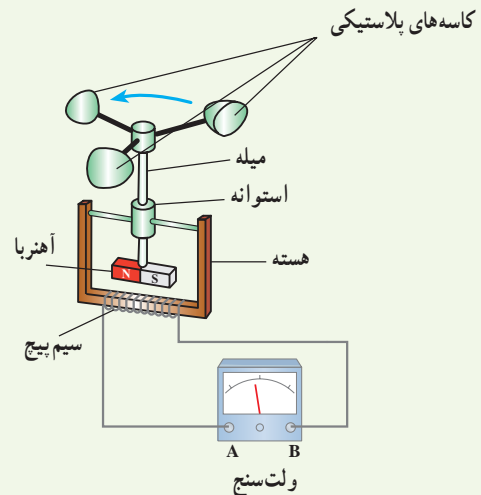
۲۳ جهت جریان القایی را در هر یک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل‌های زیر تعیین کنید.



۱۸ دو سیمولوله مشابه را مطابق شکل‌های زیر به ولت‌سنج حساسی وصل کرده‌ایم. دریافت خود را از شکل‌های زیر بنویسید. (آهنرباها مشابه اند ولی با تندی متفاوتی به طرف سیمولوله حرکت می‌کنند.)

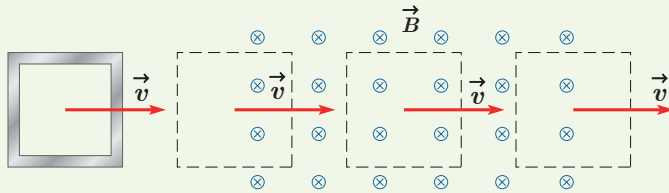


۱۹ شکل زیر ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد. چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه ولت‌سنج می‌شود؟ (ب) آیا با افزایش تندی باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟ (پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.

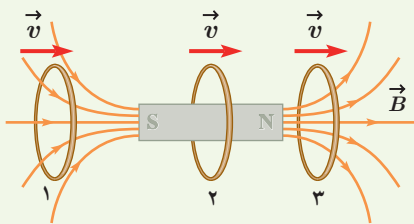


۲۰ سطح حلقه‌های پیچه‌ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه آن  $0.4\text{ T}$  و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت  $0.1\text{ s}$

الف) در کدام مرحله شار عبوری از حلقه بیشینه است؟ مقدار شار گذرنده از حلقه در این حالت چقدر است؟  
 ب) در کدام وضعیت (ها) شار گذرنده از حلقه تغییر می کند؟ جهت جریان القایی را در حلقه تعیین کنید.

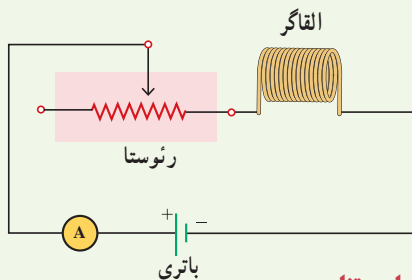


۲۹ حلقه رسانایی به طرف یک آهنربای میله ای حرکت می کند. شکل زیر، حلقه را در سه وضعیت نسبت به آهنربا نشان می دهد. جهت جریان القایی را در حلقه برای هر وضعیت به طور جداگانه تعیین کنید.



### ۳-۱۰ القاگرها

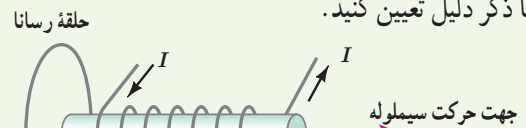
۳۰ شکل زیر مداری را نشان می دهد؛ شامل یک القاگر (سیملوله)، باتری، رئوستا و آمپرسنج که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ باتری، انرژی ذخیره شده در القاگر را زیاد کنیم چه راهی پیشنهاد می کنید؟



### ۳-۱۱ جریان متناوب

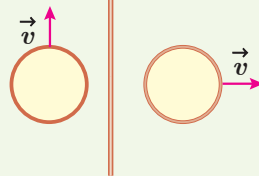
۳۱ جریان متناوبی که بیشینه آن  $A/2$  و دوره آن  $20\pi$  s است، از یک رسانای ۵ اهمی می گذرد. الف) اولین لحظه ای که در آن جریان بیشینه است چه لحظه ای است؟ در این لحظه نیروی محرکه القایی چقدر است؟ ب) در لحظه  $t = \frac{1}{40}$  s، جریان چقدر است؟

۲۴ شکل زیر سیملوله حامل جریانی را نشان می دهد که در حال دور شدن از یک حلقه رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.

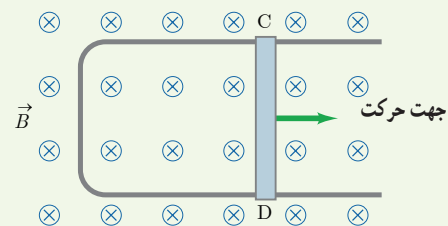


۲۵ دو حلقه رسانا در نزدیکی یک

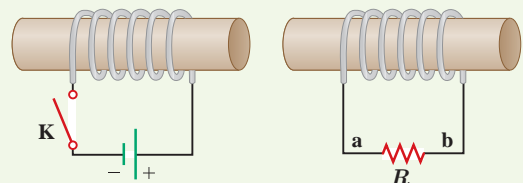
سیم دراز حامل جریان ثابت  $I$  قرار دارند؛ این دو حلقه با تندی یکسان، ولی در جهت های متفاوت مطابق شکل روبه رو حرکت می کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



۲۶ شکل زیر رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  که عمود بر صفحه شکل و رو به داخل صفحه است نشان می دهد. وقتی میله فلزی CD به طرف راست حرکت کند، جهت جریان القایی در مدار در چه جهتی است؟



۲۷ در مدار نشان داده شده در شکل زیر، جهت جریان القایی را در مقاومت R در هر یک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید: الف) در لحظه بستن کلید K، ب) در لحظه باز کردن کلید K.



۲۸ حلقه رسانای مربعی شکل، به طول ضلع  $10\text{ cm}$  وارد میدان مغناطیسی درون سویی به اندازه  $20\text{ mT}$  و سپس از آن خارج می شود.



# پیوست

## واژه نامه فارسی – انگلیسی

Magnetic permeability	تراوایی مغناطیسی	Millikan's oil- drop experiment	آزمایش قطره – روغن میلیکان
Thermistor	ترمیستور	Permanent magnet	آهنربای دائمی
Dielectric constant	ثابت دی الکتریک	Temporary magnet	آهنربای موقت
Induced current	جریان القایی	Bar magnet	آهنربای میله‌ای
Electric Current	جریان الکتریکی	Horseshoe magnet	آهنربای نعلی شکل
Alternating Current (AC)	جریان متناوب	Superconductivity	ابرسانایی
Direct Current (DC)	جریان مستقیم	Potential difference	اختلاف پتانسیل
Surface charge density	چگالی سطحی بار	Voltage drop	افت پتانسیل
Loop	حلقه	Inductor	القاگر
Magnetic domain	حوزه مغناطیسی	Electromagnetic induction	القای الکترومغناطیسی
Capacitor	خازن	Electric induction	القای الکتریکی
Parallel – plate capacitor	خازن تخت	Magnetic induction	القای مغناطیسی
Discharging	خالی کردن (خازن)	Electric potential energy	انرژی پتانسیل الکتریکی
Electric field lines	خط‌های میدان الکتریکی	Magnetic energy	انرژی مغناطیسی
Magnetic field lines	خط‌های میدان مغناطیسی	Net charge	بار خالص
Self – inductance	خود – القاوری (خود القایی)	Polarized charge	بار قطبیده
Electric dipole	دوقطبی الکتریکی	Lightning rod	برق گیر
Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی	Angular frequency	بسامد زاویه‌ای
Diamagnetism	دیامغناطیس	Leyden jar	بطری لیدن
Light Emitting Diode (LED)	دیود نورگسیل	Paramagnetism	پارامغناطیس
Electrostatic precipitator	رسوب دهنده الکتروستاتیکی	Conservation of charge	پایستگی بار
Rheostat	رئوستا	Potentiometer	پتانسیومتر
Inclination angle	زاویه شیب	Charging	پر کردن – شارژ (خازن)
Drift velocity	سرعت سوق	Cosmic ray	پرتو کیهانی
Triboelectric series	سری الکتریسیته مالشی (تریبو الکتریک)	Coil	پیچه
Solenoid	سیملوله	Corona discharge	تخلیه هاله‌ای

Series circuits	مدارهای متوالی	Magnetic flux	شار مغناطیسی
Parallel circuits	مدارهای موازی	Inductance	ضریب القاوری (ضریب خود القایی)
Resistor	مقاومت	Coefficient of resistivity	ضریب دمایی مقاومت ویژه
Electric resistance	مقاومت الکتریکی	Permittivity	ضریب گذردهی
Wire-wound resistor	مقاومت پیچهای	Capacitance	ظرفیت
Composition resistor	مقاومت ترکیبی	Insulator	عایق
Internal resistance	مقاومت درونی	Ferromagnetism	فرومغناطیس
Variable resistor	مقاومت متغیر	Electric breakdown	فروریزش الکتریکی
Equivalent resistance	مقاومت معادل	Junction rule	قاعده انشعاب
Light Dependent Resistor (LDR)	مقاومت نوری		قانون القای الکترومغناطیسی فاراده
Resistivity	مقاومت ویژه	Faraday's law of electromagnetic induction	
Electric motor	موتور الکتریکی	Coulomb's law	قانون کولن
Van de Graaff generator	مولد وان دو گراف	Lenz's law	قانون لنز
Electric field	میدان الکتریکی	Kirchhoff's laws	قانون های کیرشهف
Magnetic field	میدان مغناطیسی	Right hand rule	قاعده دست راست
Magnetic declination	میل مغناطیسی	Magnetic induction South pole	قطب جنوب
Lichenberg patterns	نقش های لیچنبرگ	North pole	قطب شمال
Electric force	نیروی الکتریکی	Polarization	قطبش
Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی محرکه الکتریکی	Faraday cage	قفس فاراده
Iron core	هسته آهنی	Quark	کوارک
Iontophoresis	یون رانی	Quantized	کوانتیده
		Magnetic axis	محور مغناطیسی

## منابع

### منابع انگلیسی

1. McGraw – Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms, Sybil p. Parker, 4th edition, 1989, McGraw – Hill.
2. Applied Physics, Dale Ewen, 10th Edition, 2012, Prentice Hall.
3. Physics, James S. Walker, 4th Edition, 2010, Pearson.
4. IGCSE Physics, Tom Duncan, 3th Edition, 2014, Hodder Education.
5. University Physics, Bauer and Westfall, 1th edition, 2011, McGraw – Hill.
6. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th Edition, 2014, Prentice – Hall International.
7. Physics, Allen Giambattista , Betty Richardson and Robert Richardson, 2th Edition, 2008, McGraw– Hill.
8. The Physics of Everyday Phenomena, 6th Edition, W. Thomas Griffith and Juliet W. Brosing , 2009, Mc Graw Hill.
9. Physics for Scientists and Engineers, Randall D. Knight, 3th Edition, 2013, Pearson.
10. Cambridge International AS and A Level Physics, Mike Crundell, 2th Edition, 2014, Hodder Education.
11. University Physics, Richard Wolfson, 2th Edition, 2012, Pearson.
12. Holt Physics, Serway and Faughn, 1999, Holt Rinehart and Winston.
13. College Physics, Sears & Zemansky and Hugh D. Young, 9th edition 2012, Addison–Wesley.
14. Introduction to Physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 10th Edition, 2016, John Wiley & Sons, Inc.
15. Contemporary College Physics, Edwin Jones and Richard Childers, 2001, McGraw–Hill.
16. Glencoe Physics, Paul W. Zitzewitz, 2000, McGraw– Hill
17. Physics for Scientists and Engineers, Paul Tipler and Gene Mosca, 6th Edition 2008, W .H. Freeman.
18. Physical Science, Shipman & Wilson & Todd 13th Edition, 2013, Brooks/Cole.
19. How Things Work, Louis A. Bloomfield, 6th Edition, 2016, John Wiley & Sons, Inc.

## منابع فارسی

- ۱- فیزیک دانشگاهی (جلد دوم)، ویراست سیزدهم، سیرز، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح اله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۹۱، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۲- مبانی فیزیک (جلد دوم) الکتریسیته و مغناطیس، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر، چاپ اول ۱۳۹۳، انتشارات نیاز دانش.
- ۳- مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی، ۱۳۸۷-۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
- ۴- فیزیک مفهومی، ویراست دهم، پل جی هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
- ۵- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱، انتشارات آراکس.
- ۶- اصول فیزیک (جلد دوم)، هانس اوهانیان، ترجمه بهرام معلمی و جهانشاه میرزاییگی، چاپ اول، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۷- فیزیک (جلد دوم)، مارچلو آلونسو و ادوارد جی. فین. ترجمه لطیف کاشیگر، چاپ اول، ۱۳۶۷، نشر روز.



سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی جهت ایفای نقش خطیر خود در اجرای سند تحول بنیادین در آموزش و پرورش و برنامه درسی ملی جمهوری اسلامی ایران، مشارکت معلمان را به‌عنوان یک سیاست اجرایی مهم دنبال می‌کند. برای تحقق این امر در اقدامی نوآورانه سامانه تعاملی بر خط اعتبارسنجی کتاب‌های درسی راه‌اندازی شد تا با دریافت نظرات معلمان درباره کتاب‌های درسی نونگاشت، کتاب‌های درسی را در اولین سال چاپ، با کمترین اشکال به دانش‌آموزان و معلمان ارجمند تقدیم نماید. در انجام مطلوب این فرایند، همکاران گروه تحلیل محتوای آموزشی و پرورشی استان‌ها، گروه‌های آموزشی و دبیرخانه راهبری درس و مدیریت محترم پروژه آقای محسن باهو نقش سازنده‌ای را بر عهده داشتند. ضمن ارج نهادن به تلاش تمامی این همکاران، اسامی دبیران و هنرآموزانی که تلاش مضاعفی را در این زمینه داشته و با ارائه نظرات خود سازمان را در بهبود محتوای این کتاب یاری کرده‌اند به شرح زیر اعلام می‌شود.

### کتاب فیزیک ۲ - کد ۱۱۱۲۴۴

ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت	ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت
۱	لیلا لطفی	مرکزی	۲۶	علی اکبر خلیلی	آذربایجان غربی
۲	امید علی خلیل مقدم	چهارمحال و بختیاری	۲۷	نجمه رضوان نژاد	کرمان
۳	هایده فرهی	سمنان	۲۸	فرشته شاهرودی	چهارمحال و بختیاری
۴	سیمین فتحی	شهرستان‌های تهران	۲۹	عباس فرجی	یزد
۵	معصومه ضیا بری	سمنان	۳۰	مدیحه نامور	خراسان شمالی
۶	سیده فاطمه کمالی کارسالاری	مازندران	۳۱	اسدالله رفیعی	آذربایجان شرقی
۷	فتح اله دویرانی	زنجان	۳۲	فاطمه نصرت	اصفهان
۸	مجید عتیقی	خراسان رضوی	۳۳	ناصر غلامی	مرکزی
۹	فاطمه اوصانلو	زنجان	۳۴	فاطمه سادات کریمی دیوکلانی	قم
۱۰	مصطفی خسروی	فارس	۳۵	زهرا عزتی	آذربایجان غربی
۱۱	ملیحه مذنبی	هرمزگان	۳۶	محمد تقی غلامی	ایلام
۱۲	احمد کمالیان فر	فارس	۳۷	عمید عقیلی نژاد	گلستان
۱۳	سید جواد شاکری	خراسان شمالی	۳۸	مرضیه قدرتی	همدان
۱۴	مریم تنفگ ساز رحیمی	قزوین	۳۹	حمید رضا نوری	خراسان جنوبی
۱۵	صدیقه سیروسی	خراسان جنوبی	۴۰	سیده زهره دودمانی	گیلان
۱۶	بهاره فخرائی	کردستان	۴۱	اسماعیل مطیع	قم
۱۷	لیلا روحی	شهرستان‌های تهران	۴۲	مجید سعدآبادی	خراسان رضوی
۱۸	عبدالواحد خالدی	کردستان	۴۳	طیبه شفیعی	بوشهر
۱۹	مهسا جلیلی	شهر تهران	۴۴	غیاض سلیمانی	خوزستان
۲۰	محمد رضا شفیعی	کرمان	۴۵	علی حسن بهامین پیلی	کهگیلویه و بویراحمد
۲۱	مهسا حبیب الهی	شهر تهران	۴۶	مجید راسخ	گیلان
۲۲	محمد شفیع مرادی	همدان	۴۷	زریر زمانی	کهگیلویه و بویراحمد
۲۳	سعیده طاهری فر	ایلام	۴۸	محمد رضا عباسی	کرمانشاه
۲۴	الهام حیدری	خوزستان	۴۹	شیرین تلمه	کرمانشاه
۲۵	خشایار بازیاری	بوشهر			

معلمان محترم، صاحب نظران، دانش آموزان عزیز و اولیای آنان می توانند نظر اصلاحی خود را در باره مطالب

این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۸۷۴ - گروه درسی مربوط و یا پیام نگار (Email)

talif@talif.sch.ir ارسال نمایند.

دفتر تألیف کتاب های درسی عمومی و متوسطه نظری