

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيمِ

اللّٰهُمَّ صَلُّ عَلٰى مُحَمَّدٍ وَآلِ مُحَمَّدٍ وَعَجّلْ فَرَحَهُمْ

# فیزیک (۲)

رشته ریاضی و فیزیک

پایه یازدهم

دوره دوم متوسطه



## وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

فیزیک (۲) پایه یازدهم دوره دوم متوسطه - ۱۱۱۲۰۹

سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری

امحمد احمدی، روح الله خلیلی بروجنی، محمدرضا خوش بین خوش نظر، محمدرضا شریف زاده اکباتانی، سید هدایت سجادی، سیروان مددو خوی و علیرضا نیکنام (اعضای شورای برنامه ریزی و گروه تألیف) - محمد کاظم بهنیا (ویراستار ادبی)

اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی  
احمدرضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) - مجید ذاکری یونسی (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی (طرح جلد)-  
راحله زادفتح‌الله(طراح گرافیک و صفحه‌آرای) - فاطمه رئیسیان فیروزآباد (رسام) - سیده فاطمه طباطبائی، بهنار  
بهبود، سید کیوان حسینی، فاطمه صفری ذوالقاری، زینت بهشتی شیرازی، حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)  
تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پژوهش (شهید موسوی)

تلفن: ۰۹۲۶۶، ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹، کد پستی:

ویگاه: www.irtextbook.ir و www.chap.sch.ir

شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروخشن)  
تلفن: ۰۵۱-۴۹۹۸۵۱۶۰، دورنگار: ۰۴۹۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹-۳۷۵۱۵

شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»

جات چہارم ۱۳۹۹

## نام کتاب:

پدیدآورندہ:

مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف:

شناسه افزوده برنامه ریزی و تأثیف:

مدیریت آماده‌سازی هنری:

شناسه افزوده آماده‌سازی؛

نیشنی سازمان:

ناشر:

حائچانہ:

سال انتشار و نوبت چاپ:

A portrait of Ayatollah Ruhollah Khomeini, an elderly man with a long white beard and a black turban, shown from the chest up. He is looking slightly to his right with a thoughtful expression. His hands are clasped together in front of him in a traditional Islamic gesture of prayer. The background is a bright, cloudy sky.

جوان‌ها قدر جوانی‌شان  
را بدانند و آن را در علم و  
تقوا و سازندگی خودشان  
صرف کنند که اشخاصی  
امین و صالح بشوند.  
ملکت ما با اشخاص امین  
می‌تواند مستقل باشد.

امام خمینی  
«قَدِيسَ سِرْهُ»

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، عکس‌برداری، 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

٢.....	١- بار الکتریکی
٣.....	٢- پایستگی و کوانتیده بودن بار الکتریکی
٥.....	٣- قانون کولن
١٠.....	٤- میدان الکتریکی
١٢.....	٥- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار
١٧.....	٦- خطوط میدان الکتریکی
٢١.....	٧- انرژی پتانسیل الکتریکی
٢٣.....	٨- پتانسیل الکتریکی
٢٧.....	٩- میدان الکتریکی در داخل رساناها
٣٢.....	١٠- خازن
٣٤.....	١١- خازن با دی الکتریک
٣٨.....	١٢- انرژی خازن
٤١.....	پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱



## ٢ جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

٤٦.....	١- جریان الکتریکی
٤٩.....	٢- مقاومت الکتریکی و قانون اهم
٥١.....	٣- عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی
٦١.....	٤- نیروی محرکه الکتریکی و مدارها
٦٧.....	٥- توان در مدارهای الکتریکی
٧٠.....	٦- ترکیب مقاومت‌ها
٧٨.....	پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲





۸۴	۱-۳ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی .....
۸۵	۲-۳ میدان مغناطیسی .....
۸۹	۳-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی .....
۹۱	۴-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان .....
۹۴	۵-۳ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی .....
۱۰۱	۶-۳ ویژگی‌های مغناطیسی مواد .....
۱۰۴	پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ .....



## ۳- القای الکترومغناطیسی و جریان متناوب

۱۱۰	۱-۴ پدیده القای الکترومغناطیسی .....
۱۱۱	۲-۴ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده .....
۱۱۷	۳-۴ قانون لنز .....
۱۱۸	۴-۴ القاگرها .....
۱۲۲	۵-۴ جریان متناوب .....
۱۲۸	پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴ .....



۱۳۲	واژه‌نامه .....
۱۳۴	منابع .....

# خودکار گنجی آردوپیش بنام خدا سازد آن را کلید

## الف) سخنی با دانش آموزان عزیز

کتاب فیزیک ۲ برای بایه یازدهم دوره نظری تالیف 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 می‌آید توصیه می‌شود. مسیر آموزش و یادگیری: داش آموزان عزیز! مسیر آموزش و یادگیری، وقتی شوق انگیز و لذت‌بخش است که با تلاش و جذب شما برای پیمودن آن همراه شود. پیش از همه، باید به توانایی‌های خود باور و اعتماد داشته باشید. مفاهیمی که در هر سال تحصیلی می‌خوانید، با سطح درک و فهم شما متناسب است و برای بهبود و ارتقای زندگی فردی، اجتماعی و حرفه‌ای شما مفیدند. در فرایند آموزش، به طور فعال و بالانگیزه مشارکت کنید. اگر امروز توانید داش، مهارت و نگرش خود را بهبود ببخشید، ممکن است فردا دیر باشد! برای تعامل مؤثر و سازنده با دنیای پرستاب و درحال 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 می‌آید.

خود رهنمای خود رهگشای خود دست گیرد به هر دو سرای

یادگیری را بیاموزیم: هر یک از شما شیوه‌های یادگیری متفاوت و ابزار یادگیری ویژه خود را دارید و بهتر است بر همین اساس روشنی مناسب برای یادگیری خود بیابید و متناسب با آن برنامه ریزی کنید. شاید مهم ترین کاری که می‌توانید انجام دهید، آن باشد که برای خود زمان‌های مطالعه با برنامه زمان‌بندی منظم و کافی در محیط خالی از عامل‌های برهم‌زننده تمرکز، در نظر بگیرید. روشی است که باید وقت پیشتری را صرف جنبه‌هایی کنید که یادگیری آن برای شما دشوارتر است. اگر باشندین و انجام آزمایش مطلب درسی را می‌آموزید، حضور فعال در کلاس‌های درس بسیار مهم است. اگر با توضیح دادن آنها را می‌آموزید، آنگاه علاوه بر حضور فعال در کلاس‌های درس، کار کردن با داش آموزان دیگر نیز برای شما بسیار راه‌گشا است. اگر حل کردن مسئله برای شما دشوار است وقت پیشتری را صرف یادگیری روش حل مسئله‌ها کنید. با توجه به آنچه گفته شد، اکنون به پرسش‌های زیر باسخ دهید:

آیا من توانایی به کاربردن مفهوم‌های ریاضی را در فیزیک دارم؟ اگر پاسخ شما منفی است، به کتاب‌های ریاضیات پایه هفتم تا دهم خود مراجعه کنید و افزون بر اینها از معلم خود نیز راهنمایی‌های لازم را بخواهید. آسان‌ترین فعالیت‌ها در فیزیک برای من کدام‌ها بوده‌اند؟ نخست این فعالیت‌ها را انجام دهید؛ این کار به ایجاد اعتماد به نفس در شما کمک می‌کند. آیا اگر کتاب را پیش از کلاس خوانده باشم، مطلب را بهتر می‌فهمم یا پس از آن؟ آیا زمانی که صرف یادگیری فیزیک می‌کنم 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 تمرن کردن را حفظ کنم، کار می‌کنم؟

کار گروهی: داشمندان و مهندسان به ندرت در اتزوا کار می‌کنند؛ بلکه پیشتر با یکدیگر همکاری دارند. در آموزش مدرسه‌ای نیز اگر با دیگر دوستانتان کار کنید، هم فیزیک پیشتر می‌آموزید و هم از این یادگیری بیشتر لذت خواهید برد. امروزه بسیاری از معلمان به این همکاری گروهی و مشارکت در یادگیری در کلاس‌های درس توجه ویژه‌ای 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 فعالیت‌هایی انجام می‌شود که شما را باری می‌کند تا درک خوبی از مفاهیم فیزیکی و کاربردهای آنها پیدا کنید. اگر توانستید در یکی از جلسه‌های کلاسی شرکت کنید، از یکی از اعضای گروه یا هم کلاسی‌های خود بخواهید که شما را در جریان آنچه گذشته است، قرار دهد.

چه موقع فیزیک را فهمیده‌ایم؟ برخی از داش آموزان هنگام خواندن درس فیزیک، خود را در این اندیشه می‌یابند که «من مفهوم‌هارا می‌دانم، اما نمی‌توانم مسئله‌ها را حل کنم.» حال آنکه در فیزیک، درک واقعی یک مفهوم یا اصل، با توانایی در به کار بردن آن اصل در مسئله‌های مختلف مرتبط است. فراغیری چگونگی حل مسئله‌ها اهمیت اساسی دارد؛ شما فیزیک را خوب فرا نگرفته‌اید؛ مگر آنکه بتوانید آنچه را فرا گرفته‌اید، در موقعیت‌های مناسب به کار ببرید.

مسئله‌های فیزیک را چگونه حل کنیم؟ برای حل انواع مختلف مسئله‌های فیزیک به روش‌های متفاوتی نیاز داریم. صرف نظر از نوع مسئله‌ای که در دست دارید، گام‌های کلیدی مؤثری وجود دارند که باید آنها را مراعات کنید.

• گام اول؛ شناسایی مفهوم‌های مرتبط : نخست تشخیص دهد چه مفهوم‌های فیزیکی‌ای به مسئله مربوط‌اند، اگرچه در این مرحله هیچ محاسبه‌ای وجود ندارد؛ اما گاهی بحث‌انگیزترین بخش راه حل 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 سیم‌لوله 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 دهد. پیش از آنکه دست به کار محاسبه‌ها شوید، فهرستی از همه متغیرهای معلوم و مجھول تهیه کنید. سپس معادله‌ها را حل کنید و مجھول‌ها 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 بیازماید و دریابید که به شما چه می‌گوید. فراموش نکنید که از خود پرسید «آیا این پاسخ با معناست؟» اگر مجھول شما اندازه میدان مغناطیسی یک سیم‌لوله حامل جریان است، پاسخ شما نباید عدد بسیار بزرگی مانند  $5^{\circ}$  تسلای باشد؛ در این صورت، حتماً چیزی در فرایند حل مسئله شما نادرست بوده است. بازگردید و روش کار خود را وارسی و راه حل را اصلاح کنید.

## ب) سخنی با دیران ارجمند

اهداف برنامه آموزش فیزیک در دوره متوسطه دوم، مطابق با برنامه درسی ملی در چهار عرصه ارتباط با خود، خلق و خلقت مبنی 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 داشت آموز تحقق باید، عبارت اند از :

• نظام مندی طبیعت را براساس درک و تحلیل مفاهیم، الگوها و روابط بین پدیده‌های طبیعی به عنوان شناوهای 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 کار گیری این علم را در حل مسائل واقعی زندگی (حال و آینده)، تحلیل و محدودیت‌ها و توأم‌نندی‌های علوم تجربی را در حل این مسائل گزارش کند.

• با استفاده از منابع علمی معتبر و بهره گیری از علم تجربی، بتواند اندیشه‌هایی مبنی بر تجارت 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 موقوفیت داشت آموزان مؤثر است، شیوه‌های آموزش ما در کلاس درس است. این شیوه‌ها می‌توانند درهای درک و فهم مفاهیم فیزیک را برای همه دانش‌آموزان، بدون توجه به توانایی علمی آنان، باز کند. بنابراین، می‌توان گفت شیوه آموزش کارآمد کلید موقوفیت هر برنامه درسی است. انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربه خود و به کار گیری 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 حد 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 دیرخانه راهبری فیزیک، اتحادیه انجمن‌های علمی آموزشی معلمان فیزیک ایران و انجمن‌های استان‌ها، کارگروه معلمان فیزیک و همکارانی که به طور مستقل در اعتبارسنجی این کتاب با ما همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی کند.

# الکترونیکیتیه ساکن



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

از آذربخش 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 خردۀای کاه نزدیک گردد، آن خردۀا به سوی کهربا کشیده می‌شوند. امروز می‌دانیم این کشش ناشی از یک نیروی الکتریکی است. در واقع واژه الکتریسیته از واژه یونانی **الکترون**<sup>۱</sup> گرفته شده است که به معنای کهرباست.

وقتی لباس‌های بافته‌ی را از تن خارج می‌کنیم، یا پس از اینکه چند قدم بر روی فرشی راه می‌رویم، دستگیره فلزی در را با دست بگیریم، عملًا 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 ۱-۱ توصیف آذربخش مبتنی بر اصول الکتریسیته ساکن است.



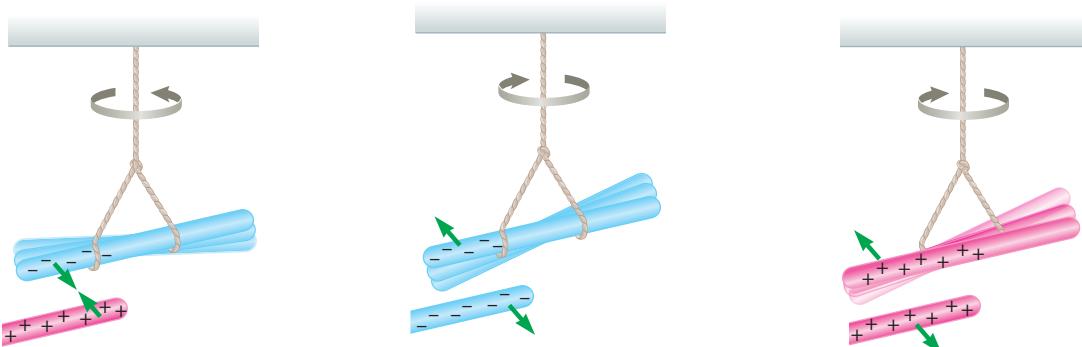
شکل ۱-۲ انتقال پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب به صورت الکتریکی صورت می‌گیرد.

### 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 ۳-۱) و بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند (شکل ۴-۱). 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 جری 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 جری بارهای جسم صفر می‌شود که به معنای خنثی بودن آن جسم است.



شکل ۳-۱ مالش بادکنک به بدنه 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 ۱-۲

۱- واژه یونانی الکترون به صورت elektron نوشته می‌شود.



بنیامین فرانکلین (۱۷۰۶-۱۷۹۰م)

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 ۱۷۴۳ میلادی با مبحث الکتریسیته آشنا شد و عمدۀ 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 الکتریسیته» است که بسیاری آن را با کتاب «اصول ریاضیات» اسحاق نیوتون مقایسه کرده‌اند. فرانکلین در این کتاب شالوه و بنیاد اصول علم الکتریسیته را بر مبنای تجربیات و مشاهدات علمی خود تشریح کرده است. در واقع تجربیات متعدد و مهم فرانکلین آغازگر دوره‌ای جدید در مبحث الکتریسیته بوده است و بسیاری از واژگانی که ما امروزه در الکتریسیته 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 داده‌ایم.



الف) تصویری از یک الکتروسکوپ درجه‌بندی شده بدون بار

شکل ۱-۵

یکای بار الکتریکی در SI، کولن (C) است. توجه کنید یک کولن مقدار بار بزرگی است. مثلاً در یک آذرخش نوعی، باری از مرتبه  $10^{-19}$  C به زمین منتقل می‌شود و از این رو، در این فصل غالباً با بارهایی از مرتبه میکروکولن ( $\mu\text{C}$ ) و نانو کولن ( $\text{nC}$ ) سروکار داریم. به عنوان مثال، در مالش شانه پلاستیکی با موهای سر، بارهای منتقل شده از مرتبه نانو کولن ( $\text{nC}$ ) 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<sup>۱</sup>

$$e = 1/6.217653 \times 10^{-19} \text{ C} \approx 1/6.0 \times 10^{-19} \text{ C}$$

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

<b>جدول ۱-۱</b>	سری الکتروسیته مالشی (تریبوالکتریک)
انتهای مثبت سری	

موی انسان
شیشه
نایلون
پشم
موی گربه
سرب
ابریشم
آلومینیم
پوست انسان
کاغذ
چوب
پارچه کان
کهربا
برنج، نقره
پلاستیک، پلی اتیلن
لاستیک
تفلون

## انتهای منفی سری

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 الکتروسیته مالشی** (تریبوالکتریک؛ Triboelectricity) 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 شود. 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 پایستگی بار** است که بیان می دارد : مجموع جبری همه بارهای الکتریکی در یک دستگاه منزوی<sup>۱</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 بددهد، همواره بار الکتریکی مشاهده شده جسم، مضرب درستی از بار بنیادی  $e$  است :

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

یک مثال آشنا از کوانتیده بودن یک کمیت، تعداد دانش آموزان یک کلاس با تعداد تخم مرغ های درون یک ظرف است. برای مثال، ما نمی توانیم  $\frac{2}{3}$  دانش آموز در یک کلاس و یا  $\frac{1}{4}$  تخم مرغ در یک ظرف داشته باشیم.

## خوب است بدانید

الکترون یک ذره بنیادی است و زیرساخته ندارد؛ یعنی از اجزای دیگری تشکیل نشده است. اما پروتون و نوترون برخلاف الکترون از ذراتی بنیادی به نام کوارک<sup>۲</sup> ساخته شده اند. کوارک ها بار  $e$   $-\frac{1}{3}$  یا  $+\frac{2}{3}$  دارند، ولی این در تناقض با اصل کوانتیده بودن بار نیست؛ زیرا هیچ کوارک مستقلی مشاهده نشده است؛ یعنی این بارهای کسری نمی توانند به طور مستقل دیده شوند. مثلاً یک پروتون از دو کوارک بالا<sup>۳</sup> (u) هر یک با بار  $e$   $+\frac{2}{3}$  و یک کوارک پایین<sup>۴</sup> (d) با بار  $e$   $-\frac{1}{3}$  ساخته شده است که بار خالص پروتون را برابر  $+e$  به دست می دهد، یا نوترون از یک کوارک بالا و دو کوارک پایین ساخته شده است که بار خالص صفر را به دست می دهد.



الف) پروتون از دو کوارک بالا (u) و یک کوارک پایین (d) ساخته شده است.

ب) نوترون از یک کوارک بالا (u) و دو کوارک پایین (d) ساخته شده است.

۱- نیازی به حفظ این جدول نیست.

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

۳- Quark

۴- up

۵- down

**مثال ۱-۱**

وقتی روی فرش راه می‌روید و بدنتان بار الکتریکی پیدا می‌کند، 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 :

$$q = ne$$

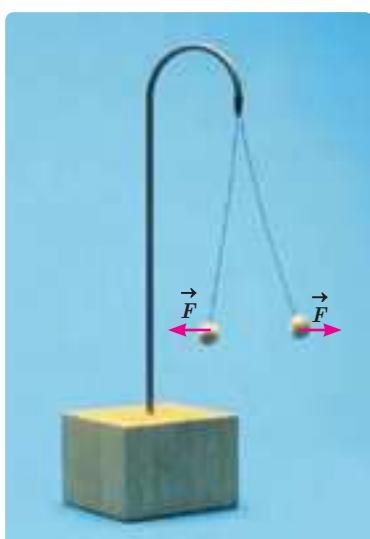
$$n = \frac{q}{e} = \frac{1 \times 10^{-9} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6 \times 10^9 \text{ الکترون}$$

**تمرین ۱-۱**

عدد اتمی اورانیوم  $Z=92$  است. بار الکتریکی هسته اتم اورانیم چقدر است؟ مجموع بار الکتریکی الکترون‌های اتم اورانیم (ختنی) چه مقدار است؟ بار الکتریکی اتم اورانیم (ختنی) چقدر است؟

**۱-۳ قانون گولن**

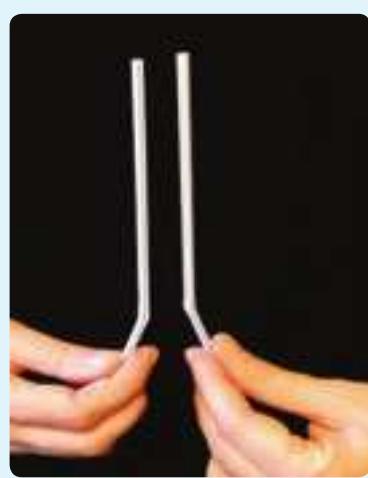
همان‌طور که می‌دانیم نیروی الکتریکی که دو جسم باردار برهم وارد می‌کنند می‌تواند جاذبه یا دافعه باشد. اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، این نیرو دافعه است (شکل ۱-۶). و اگر ناهمنام باشند، این نیرو جاذبه است.



شکل ۱-۶ گویی‌های باردار همنام یکدیگر را با نیرویی هم اندازه دفع کرده‌اند.

**فعالیت ۱-۱ (کار در کلاس)**

مطابق شکل، دو نی پلاستیکی را از تزدیکی یک انتهای آنها خم کنید و پس از مالش دادن با پارچه‌ای پشمی تزدیک یکدیگر قرار دهید. اگر نی‌ها به خوبی باردار شده باشند، نیروی دافعه آنها را می‌توانند به وضوح بر روی انگشتان خود حس کنید.

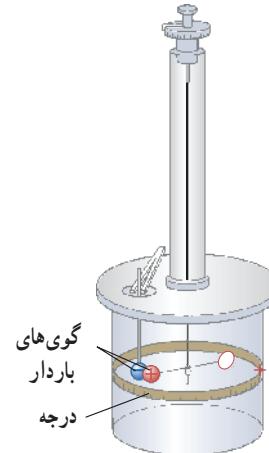


نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار، به چه عامل‌هایی بستگی دارد و اندازه این نیروها را از چه رابطه‌ای می‌توان محاسبه کرد؟ شارل آگوستین کولن، دانشمند فرانسوی برای نخستین بار با انجام آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای توانست عامل‌های مؤثر بر نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار را که اصطلاحاً بار نقطه‌ای خوانده می‌شود، شناسایی کند. نتیجه آزمایش‌های او امروزه به نام **قانون کولن** خوانده می‌شود. شکل ۷-۱ طرحی از آزمایش کولن را نشان می‌دهد.



**شارل آگوستین کولن (۱۷۳۶-۱۸۰۶)**

شارل آگوستین کولن در فرانسه به دنیا آمد. او در دانشگاه مباحث متعددی از قبیل فلسفه، ریاضیات، نجوم و شیمی را آموخت، و در طی دوازده سال پس از فارغ‌التحصیلی شغل‌های متعددی 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 ذره‌ای با مراعع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد، به چاپ رساند. نتیجه این آزمایش که به قانون کولن معروف شده است از هر آزمون و تجربه‌ای سریلاند بیرون آمده است و تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافته نشده است. کولن معقد بود چنین قانونی برای قطب‌های مغناطیسی نیز برقرار است، گرچه هیچ وقت توانست به چنین رابطه‌ای برسد. نام کولن یکی از ۷۲ نامی است که روی برج ایفل نصب شده است.



قانون کولن بیان می‌دارد:

اندازه نیروی الکتریکی (الکتروستاتیکی) بین دو بار نقطه‌ای<sup>۱</sup> که در راستای خط وصل آنها اثر می‌کند، با حاصل ضرب بزرگی آنها متناسب است و با مراعع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد. بنابراین، اندازه این نیرو برابر است با

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

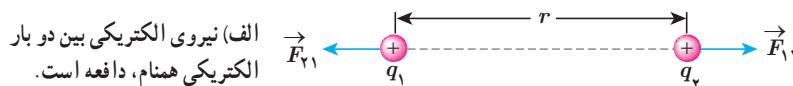
که در آن  $q_1$  و  $q_2$  بارهای الکتریکی دو بار نقطه‌ای برحسب کولن (C)،  $r$  فاصله بین دو بار برحسب متر (m)، و  $F$  بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر هر بار برحسب نیوتون (N) است. در این رابطه  $k$  ثابت الکتروستاتیکی یا ثابت کولن نام دارد و برابر است با<sup>۲</sup>

$$k = ۸/۹۸۷۵۵۱۷۹ \times ۱۰^۹ \text{ N.m}^۲/\text{C}^۴ \approx ۹/۰ \times ۱۰^۹ \text{ N.m}^۲/\text{C}^۴$$

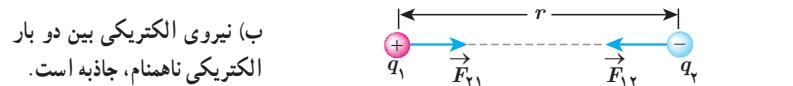
در شکل ۸-۱،  $\vec{F}_{۱۲}$  نیرویی است که بار نقطه‌ای  $q_1$  به بار نقطه‌ای  $q_2$  وارد می‌کند و  $\vec{F}_{۲۱}$  نیرویی

است که بار نقطه‌ای  $q_2$  به بار نقطه‌ای  $q_1$  وارد می‌کند. این دو نیروی الکتریکی (بنا به قانون سوم نیوتون) هماندازه، هم‌راستا، و در خلاف جهت هم‌دیدگرند. به عبارتی:

$$\vec{F}_{۱۲} = -\vec{F}_{۲۱} \Rightarrow \vec{F}_{۱۲} = \vec{F}_{۲۱} = \vec{F}$$



شکل ۸-۱



۱- در این بخش بارهای بین ذره‌های باردار (بارهای نقطه‌ای) سروکار داریم. البته اگر فاصله یک جسم باردار با جسم باردار دیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هریک از دو جسم در مقایسه با فاصله بین آنها چشم‌پوشی کرد، می‌توان دو جسم را به صورت ذره‌های باردار در نظر گرفت.  
۲- به ذهن سپردن این اعداد لازم نیست.

**مثال ۱-۲**

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

(ب) در هسته اتم هلیم دو پروتون به فاصله تقریبی  $m^{-15} \times 10^{-15} \text{ m}$  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 :

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

(ب) با استفاده از قانون کولن داریم :

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

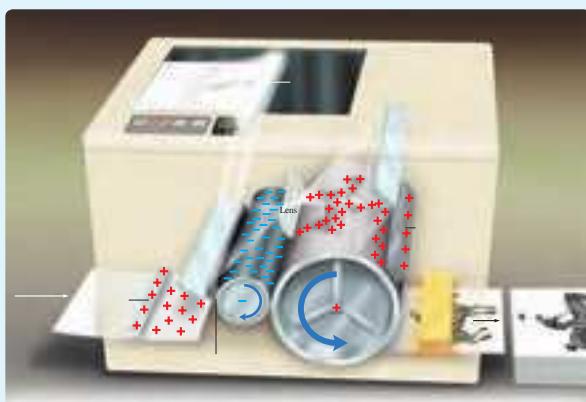
که این به مراتب بزرگ‌تر از نیروی محاسبه شده در قسمت الف است. این نیروی بزرگ، از جنس دافعه است. بنابراین، هسته اتم باید فرو پیاشد. از اینجا نتیجه می‌گیریم که باید نیروی دیگری وجود داشته باشد که مانع فروپاشی هسته شود. به این نیرو، نیروی هسته‌ای گفته می‌شود.

**خوب است بدآیند**

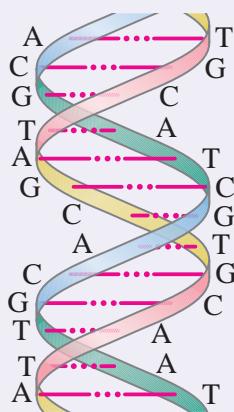
تمامی اجسام به علت جرمشان بر یکدیگر نیروی گرانشی نیز وارد می‌کنند که همواره از نوع جاذبه است. بزرگی این نیرو برای الکترون و پروتون اتم هیدروژن از مرتبه  $N^{47} \times 10^{-47}$  است. بنابراین، در حدود  $10^4$  بار کوچک‌تر از نیروی الکتریکی بین این دو ذره است و این نشان می‌دهد نیروی گرانشی به مراتب ضعیف‌تر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

**فعالیت ۱-۲**

شکل رو به رو تصویری از مرحله‌های ایجاد یک رونوشت در دستگاه فتوکپی را نشان می‌دهد. در مورد چگونگی کار دستگاه‌های فتوکپی تحقیق کنید.



## خوب است بدانید: DNA



اطلاعات ژنتیکی در مولکول‌های خاصی به نام دِنا (DNA) وجود دارد. در واقع دِنا دارای اطلاعات و دستورهایی برای تعیین و ایجاد صفات ارشی ما و همه جانداران است. در مولکول‌های دِنا چهار نوع باز به نام‌های آدنین (A)، سیتوزین (C)، گوانین (G) و تیمین (T) وجود دارد. دِنا مولکولی دورشته‌ای است که به صورت مارپیچ دوگانه پیچیده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است این دو رشته توسط نیروهای الکتروسیکلی 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 زیپ می‌کنند. این جاذبه آنقدر هست که رشته‌ها از هم نگسلد، اما به حد کافی ضعیف نیز هست تا در فرایند رونویسی از هم گسیخته گردد.

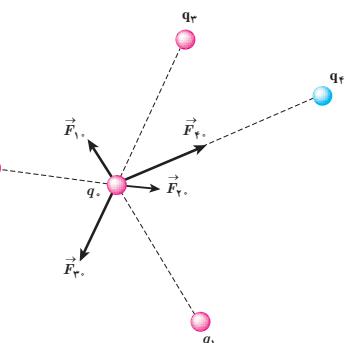
**برهم‌نهی نیروهای الکتروستاتیکی:** اگر به جای دو ذره باردار، تعدادی بار نقطه‌ای داشته باشیم، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره باردار چگونه تعیین می‌شود؟ تجربه نشان می‌دهد که در این وضعیت، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برایند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر در غیاب سایر ذره‌ها، بر آن ذره وارد می‌کند. این موضوع که از آزمایش نتیجه شده است را **اصل برهم‌نهی نیروهای الکتروستاتیکی** می‌گویند.

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 :

$$\vec{F}_{T_q} = \vec{F}_{1q} + \vec{F}_{2q} + \dots + \vec{F}_{nq}$$

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  $\vec{F}_{Tq} = \vec{F}_{1q} + \vec{F}_{2q} + \vec{F}_{3q} + \vec{F}_{4q}$ .

### پرسش ۱-۲

سه ذره باردار مانند شکل رو به رو، 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؟

۱- بررسی حالت‌هایی که نیروها هم راستا و یا عمود برهم نیستند، خارج از برنامه درسی این کتاب بوده و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

## مثال ۱-۳



سه ذره با بارهای  $q_1 = +2/5 \mu C$ ،  $q_2 = -1/0 \mu C$  و  $q_3 = +4/0 \mu C$  در نقطه‌های A، B و C مطابق شکل رو به رو ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار  $q_2$  را محاسبه کنید.

**پاسخ:** نیروی الکتریکی خالصی که بر بار  $q_2$  وارد می‌شود، برایند 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  $q_2$ ، برایند 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 :

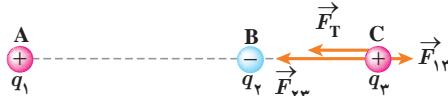
$$F_{12} = k \frac{|q_1||q_2|}{r_{12}^2} = (9/0 \times 1.0^9 N.m^2/C^2) \frac{(2/5 \times 1.0^{-9} C)(4/0 \times 1.0^{-9} C)}{(6/0 m)^2} \\ = 2/0 \times 1.0^{-3} N$$

$$F_{23} = k \frac{|q_2||q_3|}{r_{23}^2} = (9/0 \times 1.0^9 N.m^2/C^2) \frac{(1/0 \times 1.0^{-9} C)(4/0 \times 1.0^{-9} C)}{(2/0 m)^2} \\ = 9/0 \times 1.0^{-3} N$$

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

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

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



بنابراین، اندازه نیروی برایند برابر با تفاضل اندازه آنهاست :

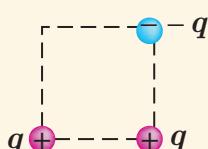
$$F_T = F_{23} - F_{12} = 6/0 \times 1.0^{-3} N$$

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 :

$$\vec{F}_T = (-6/0 \times 1.0^{-3} N) \vec{i}$$

## تمرین ۱-۲

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

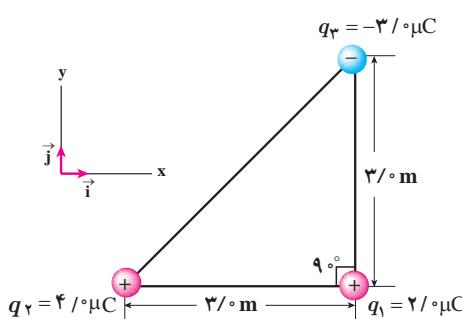


سه ذره با دار مطابق شکل رو به رو، در سه گوشی یک مرع قرار دارند.

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 رو به رو در سه رأس مثلث قائم الزاویه ای ثابت شده اند. نیروی الکتریکی خالص وارد بر ذره واقع در رأس قائم را بدست 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 :

$$F_{21} = k \frac{|q_2||q_1|}{r_{21}^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4.0 \times 10^{-6} \text{ C})(2.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3.0 \text{ m})^2} = 8.0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده،  $\vec{F}_{21}$  در جهت مثبت محور  $x$  است. بنابراین،  $\vec{i} (\vec{F}_{21}) = (8.0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$  می شود.  
به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای  $q_1$  و  $q_3$  داریم :

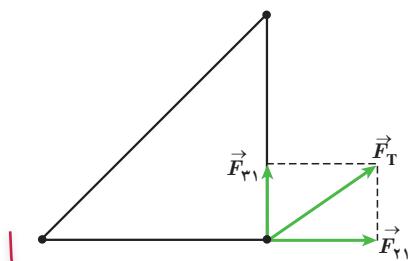
$$F_{31} = k \frac{|q_3||q_1|}{r_{31}^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(3.0 \times 10^{-6} \text{ C})(2.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3.0 \text{ m})^2} = 6.0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده،  $\vec{F}_{31}$  در جهت مثبت محور  $y$  است. بنابراین،  $\vec{j} (\vec{F}_{31}) = (6.0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$  می شود.  
پس برایند نیروهای الکتریکی وارد بر بار  $q_1$  برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} = (8.0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (6.0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

و بزرگی آن با استفاده از رابطه فیثاغورس، چنین بدست می آید :

$$F_T = \sqrt{F_{21}^2 + F_{31}^2} = \sqrt{(8.0 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (6.0 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ N}$$



## تمرین ۱-۳

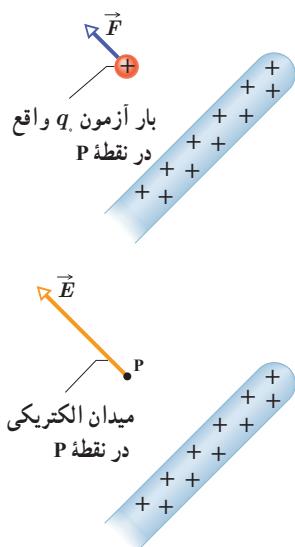
در مثال ۱-۴ الف) اگر علامت بار  $q_1$  تغییر کند جهت نیروی برایند وارد بر بار  $q_1$  چگونه خواهد شد؟

ب) اگر علامت بار  $q_1$  تغییر کند، جهت نیروی برایند وارد بر بار  $q_1$  چگونه خواهد شد؟

پ) آیا اندازه نیروی برایند وارد بر بار  $q_1$  در قسمت های الف و ب با مقدار به دست آمده در مثال ۱-۴ متفاوت است؟

## ۱-۴ میدان الکتریکی

در بخش ۱-۱ دیدیم که دو بار الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله ای از یکدیگر قرار دارند، برهم نیروی الکتریکی وارد می کنند. ولی این پرسش مطرح می شود که بارهای  $q_1$  و  $q_2$  چطور حضور یکدیگر را حس می کنند؟ به عبارت دیگر، این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ در فیزیک پاسخ این پرسش این گونه است که بار  $q_1$  خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می کند که به آن اصطلاحاً **میدان الکتریکی** بار  $q_1$  گفته می شود. وقتی بار  $q_2$  را در نقطه ای از فضای پیرامون بار  $q_1$  قرار دهیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی ای قرار می گیرد که بار  $q_1$  پیش تر 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 می کند.



**شكل ۱-۱۰** میله باردار میدانی الکتریکی ایجاد می‌کند و به وسیله این میدان بر آن آزمون 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  $q$  موسوم به **بار آزمون**<sup>۱</sup> را در آن نقطه قرار می‌دهیم و سپس نیروی الکتریکی  $\vec{F}$  وارد بر آن را اندازه می‌گیریم. آن گاه میدان الکتریکی  $\vec{E}$  ناشی از جسم باردار در آن نقطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (3-1)$$

بنا به تعریف میدان الکتریکی (رابطه ۳-۱)، میدان الکتریکی کمیتی برداری است که اندازه آن برابر  $E = \frac{F}{q}$  و جهت آن همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون است. مثلاً شکل ۱-۱۰ قسمتی از میله بارداری 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 ۱-۳ یکای میدان الکتریکی ( $\vec{E}$ ), نیوتون بر کولن (N/C) است. بزرگی برحی از میدان‌های الکتریکی در جدول ۱-۲ داده شده است.

جدول ۱-۲ بزرگی برحی از مقادیر میدان‌های الکتریکی

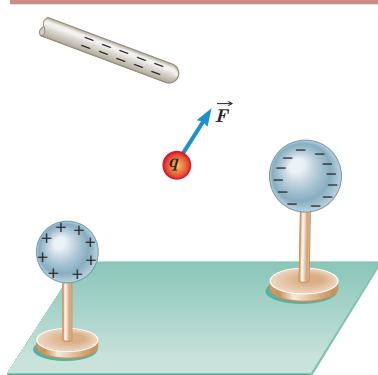
بزرگی میدان (N/C)	چشم	بزرگی میدان (N/C)	چشم
$\approx 10^3$	در تزدیکی شانه باردار	$10^{-3}$	سیم کشی‌های داخل منزل
$7 \times 10^3$	در تزدیکی فرستنده رادار	$\approx 10^{-1}$	امواج رادیویی
$10^4$	جو (نوافان تندری)	$35 - 50$	گوشی همراه
$2 \times 10^6$	در تزدیکی سطح کلاهک مولد و اندوگراف	$90$	۳۰ سانتی‌متری از یک دستگاه پخش صوت
$3 \times 10^6$	فرو ریزش الکتریکی در هوای	$\approx 150$	جو (هوای آرام)
$2 \times 10^{11}$	در سطح هسته اورانیم	$10^3$	آفتاب (متوسط)

### مثال ۱-۵

بار آزمون نشان داده شده در شکل  $C = +3.0 \times 10^{-8} C$  است و از سوی دو گوی و یک میله باردار نیرویی برابر با  $F = 6.0 \times 10^{-5} N$  در جهت نشان داده شده بر آن وارد می‌شود.

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

(ب) اگر بار  $C = +1.2 \times 10^{-8}$  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 برهمنمود.

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

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

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

ب) دوباره با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم :

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

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 پیاشد، قطره‌های آب باردار می‌شوند. معمولاً قطره‌های بزرگ‌تر، دارای بار مثبت و قطره‌های کوچک‌تر، دارای بار منفی می‌شوند. قطره‌های بزرگ‌تر نسبتاً سریع فرو می‌افتد و قطره‌های کوچک‌تر که دارای بار منفی‌اند بیشتر در هوا می‌مانند. اگر تهویه هوا کم باشد، تعداد قطره‌های موجود در هوا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و بدین ترتیب، یک میدان الکتریکی بزرگ (حدود  $N/C = 80$ ) ایجاد می‌شود؛ این وضعیتی است که معمولاً در حمام رخت می‌دهد. به همین ترتیب، در حین تمیزکردن مخازن کشتی‌های نفت‌کش، وقتی قطره‌های آب به صورت افشاره 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 آب‌فشار شیلنگ جرقه بزنند. اگر مخزن محتوای بخار نفت خام باشد، این جرقه‌ها می‌توانند بخار را مشتعل کنند و باعث افجار مخزن گردند. برای رفع این خطر، پیش از تمیز کردن مخزن، یک گاز بی‌اثربودن آن پمپ می‌شود تا اسکیشن موجود به اندازه‌ای کاهش یابد که از بروز انفجار جلوگیری کند.

### ۱-۵ 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 قرار دارد (شکل ۱-۱۱)، محاسبه کنیم. برای این محاسبه از رابطه ۱-۳ استفاده می‌کنیم. اگر بار آزمون  $q$  در نقطه A قرار گیرد، بار  $q$  به آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌کند. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی  $F$  را محاسبه می‌کنیم و با جای گذاری در رابطه  $E = F/q$ ، 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 :

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad (۴-۱)$$

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 مرعی 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 به طور 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 بر روی یک کلاهک توالی فلزی جمع می‌کند. فرض کنید کلاهک این مولد، کره‌ای با شعاع  $1\text{ m}$  است و باری به بزرگی  $C = 1\text{ m}^2$  روی آن جمع می‌شود. با فرض آنکه همه این بار در مرکز کره قرار داشته باشد، بزرگی میدان الکتریکی این بار را در فاصله‌های  $1\text{ m}$ ،  $2\text{ m}$ ،  $2.5\text{ m}$  و  $4\text{ m}$  از مرکز کره به دست آورید و سپس با نقطه‌یابی، نمودار بزرگی میدان الکتریکی را بر حسب فاصله از مرکز کره رسم کنید.

**پاسخ:** با استفاده از رابطه  $E = k \frac{|q|}{r^2}$  بزرگی میدان را در نقطه‌های مورد نظر به دست می‌آوریم :

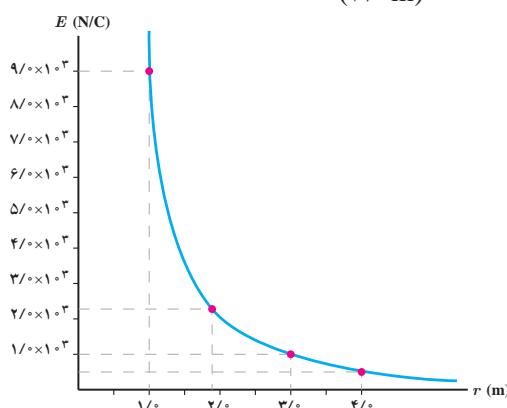
$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

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

$$E_2 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2.3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_3 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 1.0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_4 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 0.5625 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 0.56 \times 10^3 \text{ N/C}$$



با استفاده از این نتایج نمودار  $E$  بر حسب  $r$ ، مانند نمودار روبرو خواهد شد.

برای مشاهده 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 شعله شمع نزدیک‌تر به سمت کلاهک کشیده شده است، در حالی که شعله شمع دورتر تغییر چندانی نکرده است. دلیل آن است که کلاهک مولد وان دوگراف بار منفی بزرگی دارد که یون‌های مثبت شعله شمع نزدیک‌تر را به سمت خود می‌کشد، در حالی که شمع دیگر در فاصله دوری از کلاهک قرار گرفته است که تحت تأثیر میدان الکتریکی ضعیف‌تری قرار می‌گیرد.



۱—Van de Graaff generator

## تمرین ۴

طبق مدل بور برای اتم هیدروژن، در حالت پایه فاصله الکترون از پروتون هسته برابر با  $m^{-1} \times 10^{11} \text{ m}$  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  $10^1 \text{ m}$  از مرکز کلاهک آن است؟

**برهم نهی میدان‌های الکتریکی:** اگر چند بار الکتریکی ذره‌ای داشته باشیم، میدان الکتریکی ناشی از این بارها، در نقطه‌ای از فضا چگونه تعیین می‌شود؟ در بخش ۴-۱ دیدیم اگر چند بار نقطه‌ای مانند  $q_1, q_2, \dots$  داشته باشیم نیروی الکتریکی برایند حاصل از این بارها برابر آزمون  $q_0$  با استفاده از اصل برهم نهی نیروهای کولنی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} + \dots$$

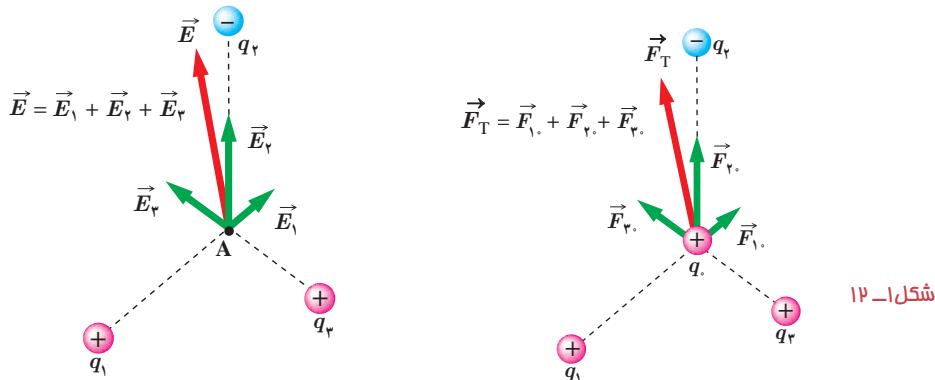
حال اگر بخواهیم میدان الکتریکی را در محل بار آزمون به دست آوریم، با استفاده از تعریف میدان

الکتریکی ( $\vec{E} = \vec{F}/q_0$ ) دو طرف معادله بالا را بر  $q_0$  تقسیم می‌کنیم. آن‌گاه خواهیم داشت:

$$\frac{\vec{F}_T}{q_0} = \frac{\vec{F}_{10}}{q_0} + \frac{\vec{F}_{20}}{q_0} + \dots$$

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

این رابطه که موسوم به **اصل برهم نهی میدان‌های الکتریکی** است، نشان می‌دهد که میدان الکتریکی ناشی از چند بار الکتریکی در نقطه‌ای از فضا، برابر مجموع میدان‌هایی است که هر بار در نبود سایر بارها در آن نقطه از فضا ایجاد می‌کند؛ یعنی 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. مثلاً شکل ۱۲-۱-ب میدان الکتریکی خالص در محل بار آزمون 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

ب) میدان الکتریکی  $\vec{E}$  در محل بار آزمون، جمع برداری میدان‌های  $\vec{E}_1, \vec{E}_2$  و  $\vec{E}_3$  در محل این بار است.

الف) نیروی  $\vec{F}_T$ ، نیروی برآیند وارد بر بار آزمون  $q_0$  است.

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

## مثال ۱-۷

مطابق شکل، دو ذره با بارهای  $q_1 = +4 \mu C$  و  $q_2 = -6 \mu C$  در فاصله  $16\text{ m}$  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  $8\text{ m}$  از بار  $q_1$  و  $16\text{ m}$  از بار  $q_2$ .

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

بنابر اصل برهم‌نهی میدان‌های الکتریکی داریم:

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

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

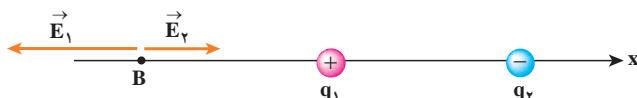
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-9} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 2/25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2/3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6 \times 10^{-9} \text{ C})}{(16 \text{ m})^2} = 3/375 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 3/4 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین:

$$\vec{E}_A \approx (2/3 \times 10^3 \text{ N/C}) \hat{i} + (3/4 \times 10^3 \text{ N/C}) \hat{i} = (5/7 \times 10^3 \text{ N/C}) \hat{i}$$

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



با استفاده از اصل برهم‌نهی میدان‌های الکتریکی داریم:

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

که در آن  $E_1$  و  $E_2$  برابرند با

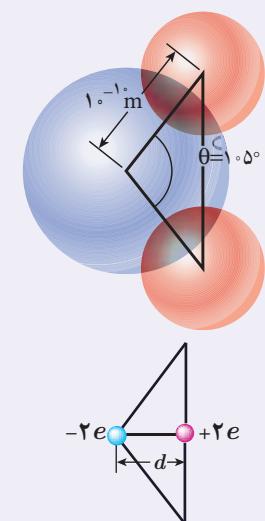
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-9} \text{ C})}{(8 \text{ m})^2} = 5/625 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 5/6 \times 10^2 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6 \times 10^{-9} \text{ C})}{(16 \text{ m})^2} = 2/109 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 2/1 \times 10^2 \text{ N/C}$$

بنابراین:

$$\vec{E}_B \approx (-5/6 \times 10^2 \text{ N/C}) \hat{i} + (2/1 \times 10^2 \text{ N/C}) \hat{i} = (-3/5 \times 10^2 \text{ N/C}) \hat{i}$$

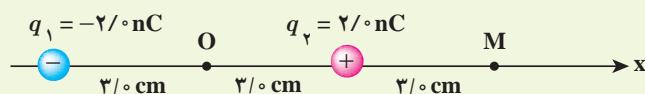
## خوب است بدانید



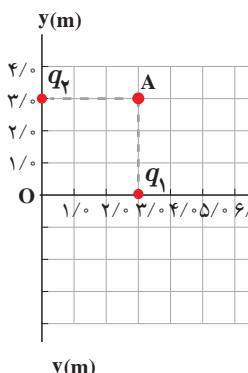
**دوقطبی الکتریکی** آرایشی از بارهای الکتریکی است که در آن دو ذره با بزرگی بار  $q$  و  $-q$  یکسان و علامت مخالف در فاصله  $d$  از هم روی محوری که به آن محور دوقطبی گفته می‌شود قرار گرفته‌اند. مولکول آب ( $H_2O$ ) از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن ساخته شده است. اتم اکسیژن الکترون‌های دو اتم هیدروژن 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 وصل کننده 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 هماندازه و غیرهمنام (دوقطبی الکتریکی) را نشان می‌دهد که در آن فاصله دو بار از  $6.0\text{ cm}$  است. میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های  $O$  و  $M$  به دست آورید.



## مثال ۱-۶



شکل روبرو، 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. ( $q_1 = q_2 = 5.0 \mu C$ )

**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 :

$$E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{r^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(5.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3.0 \text{ m})^2} = 5.0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_1 = (-5.0 \times 10^3 \text{ N/C}) \hat{i} \quad \text{و} \quad \vec{E}_2 = (-5.0 \times 10^3 \text{ N/C}) \hat{j}$$

در نتیجه میدان الکتریکی خالص برابر است با

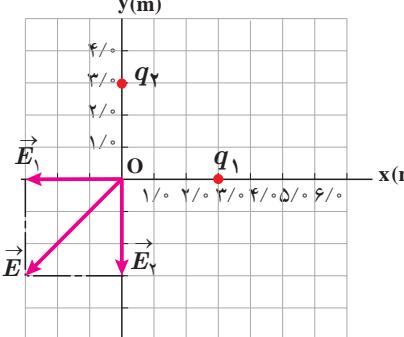
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$\vec{E} = (-5.0 \times 10^3 \text{ N/C}) \hat{i} + (-5.0 \times 10^3 \text{ N/C}) \hat{j}$$

و از آنجا اندازه میدان الکتریکی خالص چنین می‌شود :

$$E = \sqrt{(-5.0 \times 10^3 \text{ N/C})^2 + (-5.0 \times 10^3 \text{ N/C})^2}$$

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

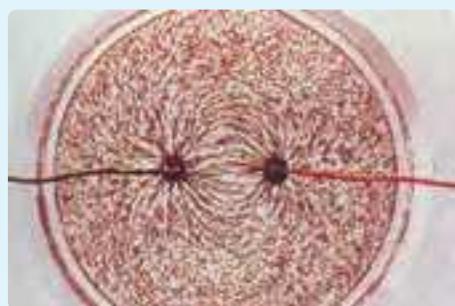


**تمرین ۱-۶**

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

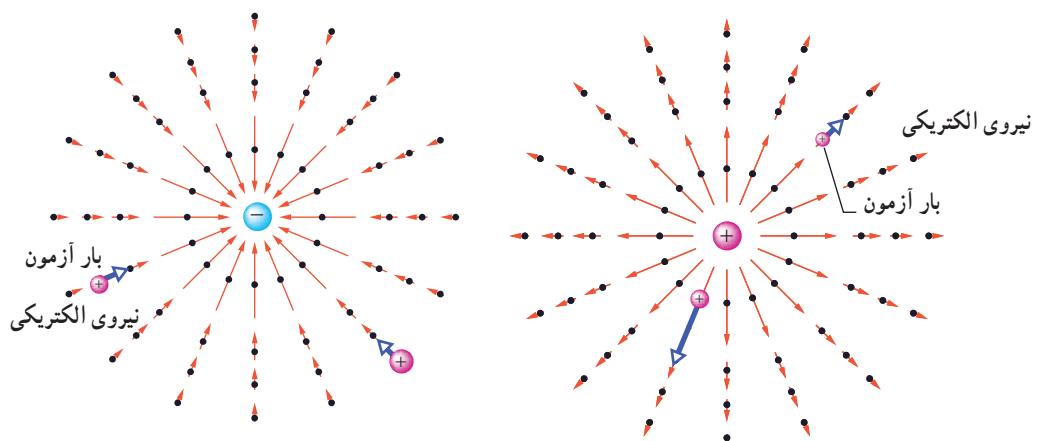
**۱-۶ خطوط میدان الکتریکی**

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 تعجب کنید؟ مایکل فاراده نخستین بار در میانه قرن نوزدهم میلادی روشی را برای تعجب 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 ۱-۳ (کاردکلاس)**

درون یک ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی با عمق کم، مقداری پارافین مایع یا روغن کرچک به عمق حدود  $5\text{ cm}$  بزیید و داخل آن دو الکترود نقطه‌ای قرار دهید. الکترودها را با سیم به پایانه‌های مثبت و منفی یک مولد ولتاژ بالا، مانند مولد واندوگراف وصل کنید. روی سطح پارافین، مقدار کمی بذر چمن یا خاکشیر پاشید. مولد را روشن کنید. اکنون به سمت‌گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکترود توجه کنید. شکل سمت‌گیری دانه‌ها در این فضا را رسم کنید.

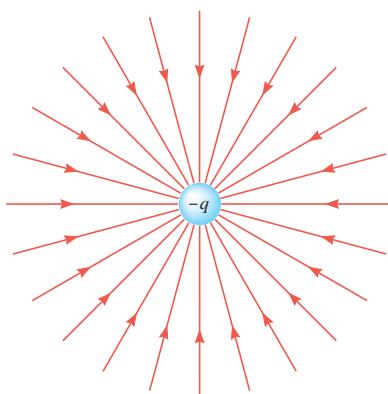
اگر یک بار آزمون را در تزدیکی یک ذره باردار مثبت یا منفی قرار دهیم، بسته به نوع بار، نیروی الکتریکی وارد به بار آزمون در جهت دور شدن از ذره (شکل ۱۳-۱الف) و یا در جهت نزدیک شدن به آن (شکل ۱۳-۱ب) خواهد بود.



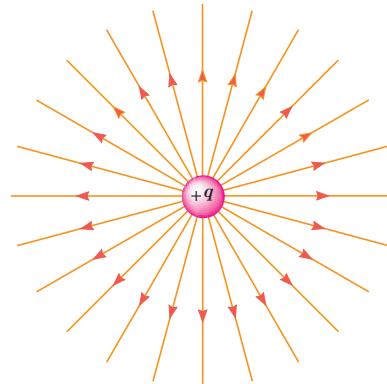
الف) میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار مثبت ساکن.      ب) میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار منفی ساکن.

شکل ۱-۱۳

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



ب) خطوط میدان الکتریکی به سمت  
ذره باردار  $+q$ - است.



الف) خطوط میدان الکتریکی در جهت  
دور شدن از ذره باردار  $-q$ - است.

شکل ۱۴

بنابراین، طرحی که از سمت‌گیری دانه‌ها در فعالیت ۱-۳ دیدید، در واقع طرحی از خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو الکترون بوده است.

قاعده‌های رسم خطوط میدان الکتریکی عبارت اند از :

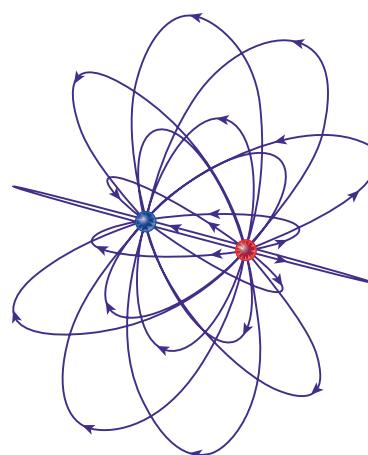
۱- در هر نقطه، بردار میدان الکتریکی باید مماس بر خط میدان الکتریکی عبوری از آن نقطه و در همان جهت باشد (شکل ۱۵-۱).

۲- میزان تراکم خطوط میدان در هر ناحیه از فضانشانده‌نده اندازه میدان در آن ناحیه است؛ هرجا خطوط میدان متراکم‌تر باشد، اندازه میدان بیشتر است (شکل ۱۶-۱).

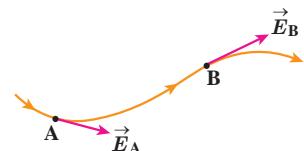
۳- در آرایشی از بارها خطوط میدان الکتریکی از بارهای مثبت شروع و به بارهای منفی ختم می‌شوند.

۴- خطوط میدان برایند هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند (شکل ۱۷-۱) یعنی از هر نقطه فضای فقط یک خط میدان الکتریکی می‌گذرد.

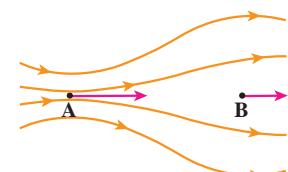
تجسم واقعی خطوط میدان، در فضاست، و بنابراین طرحی سه‌بعدی دارد (شکل ۱۸-۱).



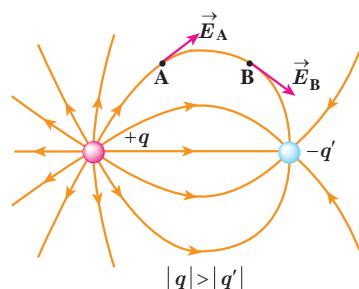
شکل ۱۸ نمایش سه‌بعدی خطوط  
میدان برای یک دوقطبی الکتریکی



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



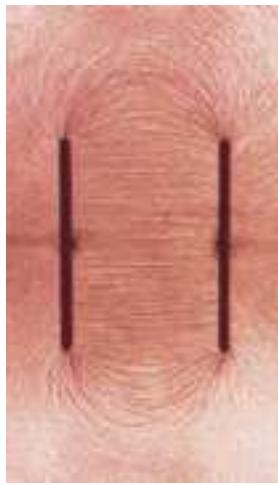
شکل ۱۶ اطراف نقطه A خطوط میدان  
متراکم‌تر از اطراف نقطه B است. بنابراین،  
بزرگی میدان در نقطه A بیشتر از نقطه B است.



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

## پرسش ۴-۱

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



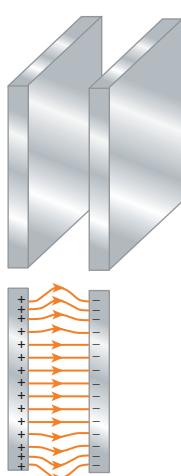
شکل ۱-۱۹ سمت‌گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکترود صفحه‌ای موازی

**میدان الکتریکی یکنواخت:** اگر دوباره اسباب فعالیت ۳-۱ را سوار کنید و این بار الکترودهای نقطه‌ای را با دو صفحهٔ فلزی موازی جایگزین کنید و دوباره به سمت‌گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکترود توجه کنید، طرحی از خطوط میدان الکتریکی را مشاهده می‌کنید که در شکل ۱-۹ 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).

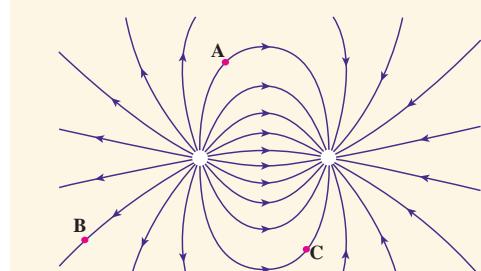
**نیروی الکتریکی وارد بر بار الکتریکی در یک میدان الکتریکی:** گرچه برای تعریف میدان الکتریکی یک جسم باردار از بار آزمون مثبت استفاده کردیم، ولی وجود این میدان مستقل از بار آزمون است. بنابراین، اگر بار الکتریکی  $q$  در میدان الکتریکی  $\vec{E}$  ناشی از اجسام باردار دیگری قرار گیرد، این میدان بر آن نیروی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

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (۶-۱)$$

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 ۱-۲۰ طرحی از خطوط میدان یکنواخت بین دو صفحهٔ رسانایی موازی با بارهای هم اندازه و ناهمتاً



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

## پرسش ۴-۲

## فعالیت ۴-۱

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.

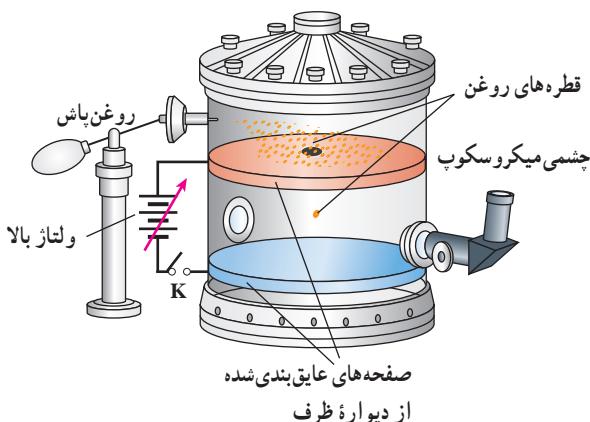


## مثال ۹- آزمایش قطره - روغن میلیکان



روبرت اندر و میلیکان<sup>۱</sup> (۱۸۶۸-۱۹۵۳)<sup>۲</sup>  
فیزیک دان خبره آمریکایی که در سال  
۱۹۲۳ میلادی به خاطر کار خود در تعیین  
بار الکترون و نیز اثر فوتولکتریک برنده  
جاایزه نوبل گردید.

همان طور که پیش تر دیدیم بار الکتریکی با هر مقداری ظاهر نمی شود؛ بلکه همواره مضرب درستی از بار بنیادی  $e$  است ( $q = \pm ne$ ). آزمایش کلاسیک فیزیک دان آمریکایی رابرт میلیکان به توضیح این امر می پردازد. این آزمایش اکنون به نام آزمایش قطره - روغن میلیکان<sup>۱</sup> معروف است. میلیکان بین دو ورقه فلزی موازی و افقی میدان الکتریکی قائم یکنواخت  $E$  را توسط یک منبع ولتاژ بالا ایجاد کرد (که می توانست آن را قطع و وصل کند). او در مرکز ورقه بالایی چندین روزنه کوچک ایجاد کرده بود که از طریق آنها قطره های روغن حاصل از یک روغن پاش به ناحیه بین دو ورقه می پاشید. بیشتر این قطره ها در اثر مالش با دهانه خروجی روغن پاش، باردار می شدند. میلیکان با تعییر دادن میدان الکتریکی بین صفحات به حرکت قطره های روغن در این فضای توجه کرد و با تحلیل این حرکت و با در نظر گرفتن مقاومت هوا، نیروی الکتریکی وارد بر هر قطره را محاسبه کرد و از آنجا بار الکتریکی هر قطره را تعیین کرد. میلیکان با تکرار آزمایش قطره - روغن به دفعات زیاد و با قطره - روغن های متفاوت دریافت که بار قطره ها برابر بار بنیادی  $e$  یا مضرب درستی از این مقدار است. شکل زیر اسباب واقعی آزمایش اولیه میلیکان و طرحی از آن اسباب را نشان می دهد.



اسباب آزمایش اولیه میلیکان و طرحی از آن

اکنون وضعیتی را در نظر بگیرید که قطره روغن در فضای بین دو صفحه معلق است. اگر جرم این قطره روغن  $8/2 \times 10^{-15} \text{ kg}$  و میدان الکتریکی دارای بزرگی  $C/10^5 \text{ N/C}$  و رو به پایین باشد، تعداد الکترون هایی که قطره جذب کرده یا از دست داده است، چقدر است؟

**پاسخ:** چون قطره روغن در میدان الکتریکی معلق است و وزن همواره رو به پایین اثر می کند، بنابراین، نیروی الکتریکی باید مطابق شکل رو به بالا بر قطره روغن اثر کند. چون جهت نیروی الکتریکی رو به بالا و جهت میدان الکتریکی رو به پایین است، نتیجه می گیریم که بار قطره روغن باید منفی باشد؛ یعنی باید قطره روغن الکترون به دست آورده باشد. حال به دنبال تعداد الکترون هایی هستیم که این قطره به دست آورده است. از شرط تعادل نیروها داریم :

$$\text{وزن} = \text{نیروی الکتریکی} \Rightarrow |q|E = mg$$

نیروی الکتریکی

و در نتیجه



$$|q| = \frac{mg}{E} = \frac{(8/2 \times 10^{-15} \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg})}{1/0 \times 10^5 \text{ N/C}} = 8/0 \times 10^{-19} \text{ C}$$

از طرفی می‌دانیم  $ne = |q|$  است. در نتیجه

$$n = \frac{8/0 \times 10^{-19} \text{ C}}{1/6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 5$$

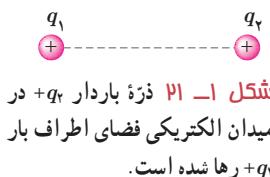
بنابراین، قطره روغن ۵ الکترون به دست آورده است.

**تمرین ۱-۴**

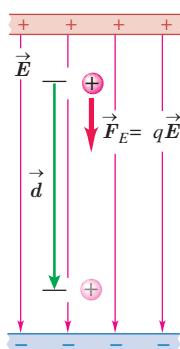
روی سطح بادکنکی به جرم  $10/0 \text{ g}$  ۲۰۰ بار الکتریکی  $nC$ -ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی قرار می‌دهیم. بزرگی وجهت این میدان الکتریکی را در صورتی که بادکنک معلق بماند، تعیین کنید. از نیروی شناوری وارد به بادکنک چشم‌بوشی کنید.

**فعالیت ۱-۵**

رسوب دهنده الکتروستاتیکی (ESP)<sup>۱</sup> دود و غبار را از گازهای زائدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌آید جدا می‌سازد. رسوب دهنده‌ها انواع مختلفی دارند. در مورد اساس کار این رسوب دهنده‌ها تحقیق کنید. شکل‌های رو به رو تأثیر رسوب دهنده را در کاهش آلودگی هوای ناشی از یک دودکش نشان می‌دهد.

**۱-۶ انرژی پتانسیل الکتریکی**

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



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

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 همان‌طور 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 ۲۲-۱ 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 چشم‌بوشی از گرانش)، به طرف صفحه منفی شروع به حرکت می‌کند و به تدریج تنددی 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 جایه جایی مشخص برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی در همان جایه جایی 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 جایه جایی  $d$  را موازی میدان الکتریکی، انجام می‌دهد (شکل ۱-۲۲). طبق تعریف کار که در سال قبل دیدیم، کار انجام شده توسط

نیروی الکتریکی ثابت  $\vec{F}_E$  در طی جایه جایی  $d$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

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

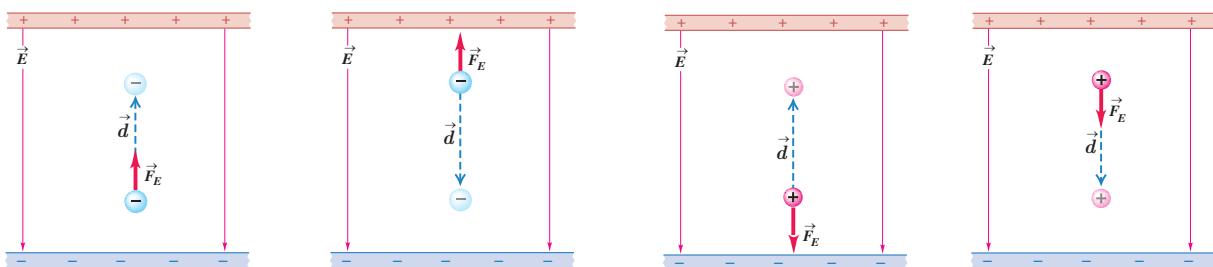
با توجه به اینکه  $F_E = |q| E$  است، این رابطه به صورت زیر می‌شود:

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

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 جایه جایی  $d$  است. (در این کتاب، در استفاده از رابطه ۸-۱، صرفاً با جایه جایی‌های هم‌راستا با میدان الکتریکی و یا عمود بر میدان الکتریکی سروکار خواهیم داشت.) در این رابطه، بار الکتریکی ( $q$ ) بر حسب کولن (C)، بزرگی میدان الکتریکی ( $E$ ) بر حسب نیوتون بر کولن (N/C)، اندازه جایه جایی ( $d$ ) بر حسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی ( $\Delta U_E$ ) بر حسب رول (J) است. توجه کنید که این رابطه چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است.



ت) بار منفی را در خلاف جهت میدان الکتریکی  $\vec{E}$  جایه جایی کنیم:

میدان الکتریکی کار مثبت  $W_E$  را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی  $U_E$  کاهش می‌یابد.

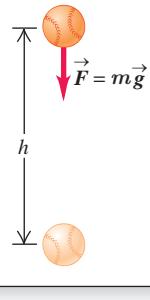
پ) بار منفی را در خلاف جهت میدان الکتریکی  $\vec{E}$  جایه جایی کنیم:

میدان الکتریکی کار منفی  $W_E$  را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی  $U_E$  افزایش می‌یابد.

الف) بار مثبت را در جهت میدان الکتریکی  $\vec{E}$  جایه جایی کنیم:

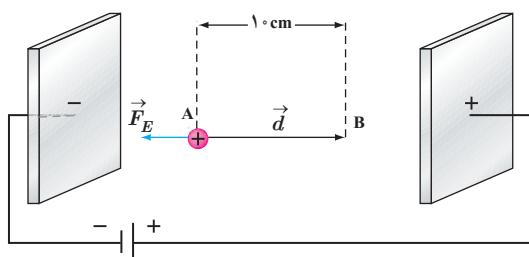
میدان الکتریکی کار مثبت  $W_E$  را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی  $U_E$  کاهش می‌یابد.

شکل ۱-۲۴



شکل ۱-۲۵ جسم در میدان گرانشی یکنواخت زمین رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.

## مثال ۱۰



در یک میدان الکتریکی یکنواخت  $E = 2.0 \times 10^3 \text{ N/C}$ ، بروتونی از نقطه A با سرعت  $\vec{v}$  در خلاف جهت میدان الکتریکی پرتاب شده است. پروتون سرانجام در نقطه B متوقف می‌شود. بار بروتون  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و جرم آن  $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  است.

(الف) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بروتون در این جایه‌جایی چقدر است؟

(ب) تندی پرتاب بروتون را پیدا کنید (از وزن بروتون و مقاومت هوا چشم‌پوشی شود).

پاسخ:

(الف) با توجه به رابطه ۸-۱ 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 :

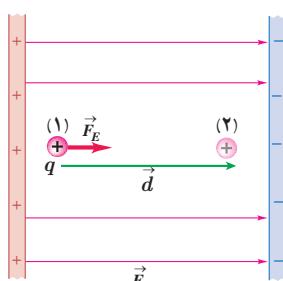
$$W_E = \Delta K \Rightarrow -\Delta U_E = \frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2)$$

$$-3.2 \times 10^{-17} \text{ J} = \frac{1}{2}(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(-v_i^2) \Rightarrow v_i = 1.96 \times 10^5 \text{ m/s} \approx 2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$$

## تمرین ۸-۱

در مثال ۱۰ اگر جای قطب‌های باتری عوض شود و بروتون را در نقطه A از حالت سکون رها کنیم، بروتون با چه تندی‌ای به نقطه B می‌رسد؟

## ۱-۸ پتانسیل الکتریکی



در بخش قبل دیدیم تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک ذره باردار به بار الکتریکی آن بستگی دارد؛ مثلاً با دوباره شدن بار ذره، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز دوباره می‌شود. بنابراین، نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار ذره، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است. به این نسبت، اختلاف پتانسیل الکتریکی  $\Delta V$  نویسید که ذره میان آنها جایه‌جا شده است (شکل ۲۵-۱) و آن را با نمایش می‌دهیم :

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{\Delta U_E}{q} \quad (9-1)$$

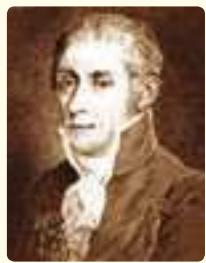
شکل ۲۵-۱ نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است.

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 ( $\Delta V$ ) بر حسب زول 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 ۱-۳ برخی از اختلاف پتانسیل‌ها (ولتاژ‌های) متناول را نشان می‌دهد.

در شابه 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:

$$V = \frac{U_E}{q} \quad (1-1)$$



الساندرو ولتا (۱۷۴۵–۱۸۲۷)

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 پارما به استادی فیزیک برگزیده شد. در آنجا وظیفه داشت علاوه بر تدریس، آزمایشگاهی نیز دایر کرد. وقتی در دانشگاه تدریس می‌کرد دستگاهی به نام الکتروفور را اختراع کرد و سرح جزئیات دستگاه را برای جوزف پرسنتی فرستاد. ولتا با استفاده از این دستگاه قوانین فیزیکی زیادی را کشف کرد، در سال ۱۷۹۱ لوئیجی گالوانی استاد زیست‌شناسی و فیزیولوژی داشتگاه بولونگا موقعي که سرگرم شریح قورباغه‌ای در آزمایشگاهش بود، یک گیره برقی را در نخاع جانور قرار داد و متوجه شد که پس از برخورد ماهیچه پای قورباغه با چاقوی جراحی، خصوصاً وقتی قسمت بالای چاقو با گیره تماس پیدا کند، ماهیچه بهشدت منقبض می‌شود و عمل انقباض ماهیچه پای قورباغه را الکتریسیته‌ای پندشت 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 پیلی توضیح داد که امروزه پیل ولتا خوانده می‌شود. پیل ولتا از تعدادی صفحات نقره، مقوای آگشته به یک محلول الکرولیت 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.

جدول ۱-۳ برخی از ولتاژ‌های متناول

۶۰–۹۰ mV	پتانسیل استراحت نورون
۱/۵V	باتری قلمی
۱۲V	باتری اتومبیل
۱۱۰–۱۲۰V	برق خانگی در برخی از کشورها
۲۲۰–۲۴۰V	برق خانگی در ایران و اغلب کشورها
۲۴۰۰۰V	مولد نیروگاه برق
۱۰۴–۱۰۶V	خطوط انتقال برق ولتاژ بالا
۱۰۸–۱۰۹V	آذرخش

## مثال ۱۱-۱

در نتیجه برخورد پرتوهای کیهانی با مولکول‌های هوا، الکترون‌هایی از این مولکول‌ها کنده می‌شوند. در تزدیکی سطح زمین، میدان الکتریکی با بزرگی  $15.0 \text{ N/C}$  و جهت رو به پایین وجود دارد. (الف) اگر یکی از این الکترون‌ها، تحت تأثیر این میدان  $5.0 \times 10^{-19} \text{ C}$  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 ۱-۸ برای تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون داریم

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|E d \cos\theta = -(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})(15.0 \text{ N/C})(5.0 \times 10^{-19} \text{ m}) \cos 90^\circ = -1/20 \times 10^{-14} \text{ J}$$

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

$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = \frac{-1/20 \times 10^{-14} \text{ J}}{-1/60 \times 10^{-19} \text{ C}} = 7/50 \times 10^4 \text{ V} = 75/\text{kV}$$

## 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 نظری چراغ قوه یا گوشی تلفن همراه از آنها استفاده می‌شود (شکل ۹-۱) 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 فرارداد، اختلاف پتانسیل الکتریکی دو سر باتری برابر با پتانسیل پایانه مثبت منهاج پتانسیل پایانه منفی است. اگر پتانسیل پایانه منفی را با  $V_+$  و پتانسیل پایانه مثبت را با  $V_-$  نشان دهیم، داریم:

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



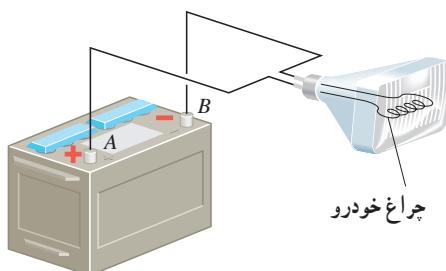
شکل ۹-۱ برحی از  
باتری‌های متدائل

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 ۴۷ فرض کنیم، پتانسیل پایانه مثبت برابر  $+8V$  خواهد شد. می‌توان پایانه منفی را مرجع پتانسیل درنظر گرفت؛ در این صورت، پتانسیل پایانه مثبت برابر  $+12V$  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 می‌سنجدند. نقطه زمین را در مدارهای الکتریکی با نماد  $\underline{\underline{}}^{\circ}$  نشان می‌دهند.

## تمرین ۹-۲

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

## مثال ۹-۱



اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر  $7\text{V}$  است. اگر بار الکتریکی  $-5\text{C}$  کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟

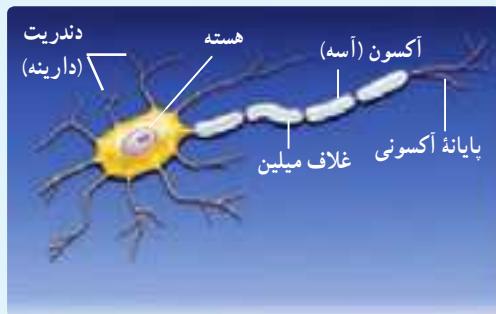
**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۹-۱ داریم:

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

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_+ - V_-) = (-5\text{C})(+12\text{V}) = -60\text{J}$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه  $-60\text{J}$  کاهش یافته است.

## فعالیت ۱-۶



عمل مغز اساساً بر مبنای کنش‌ها و فعالیت‌های الکتریکی است. سیگنال‌های عصبی چیزی جز عبور جریان‌های الکتریکی نیست. مغز این سیگنال‌های 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 الکتروشیمیابی 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 گفته‌یم اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه از میدان الکتریکی، مستقل از نوع و اندازه بار جابه‌جا شده بین دو نقطه است. بنابراین، می‌توانیم فرض کنیم بار جابه‌جا شده بین دو نقطه مثبت است. همچنین فرض کنید این بار مثبت را در میدان الکتریکی یکنواخت  $\vec{E}$  هم‌جهت با خطوط میدان به اندازه  $d$  جابه‌جا کنیم. بنا به رابطه ۱-۸ و با توجه به مثبت بودن  $q$  و صفر بودن زاویه  $\theta$  داریم

$$\Delta U_E = -|q|Ed \cos^{\circ} = -qEd$$

از طرفی با استفاده از رابطه ۱-۹ داریم

$$\Delta U_E = q\Delta V$$

با برابر قرار دادن دو رابطه بالا به رابطه زیر می‌رسیم

$$\Delta V = -Ed$$

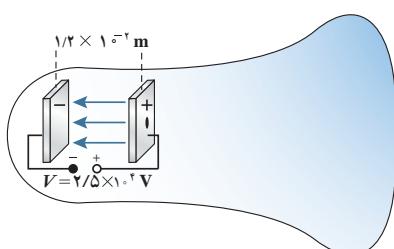
توجه کنید که این رابطه را برای حرکت در جهت میدان الکتریکی به دست آوردیم. اگر در خلاف جهت میدان حرکت می‌کردیم به رابطه  $\Delta V = Ed$  می‌رسیدیم. پس در هر دو حالت می‌توان گفت:

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

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

## مثال ۱-۱۳

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 ۱-۱ داریم:

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

کار انجام شده توسط نیروی خارجی : فرض کنید در یک میدان الکتریکی یکنواخت، ذره‌ای با بار  $q$  را با اعمال نیرویی از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر جابه‌جا کنیم (شکل ۱-۲۷). در حین این حرکت، نیروی خارجی ما کار خارجی  $W$  را روی بار انجام می‌دهد، درحالی که نیروی الکتریکی نیز کار  $W_E$  را روی آن انجام داده است. با استفاده از قضیه کار – انرژی جنبشی، تغییر انرژی جنبشی بار  $q$  چنین می‌شود :

$$\Delta K = W - W_E = W_{\text{خارجی}} - q\Delta V \quad (12-1)$$

که در آن از رابطه‌های  $W_E = -\Delta U_E$  و  $\Delta U_E = q\Delta V$  استفاده کرده‌ایم. حال فرض کنید که تندی بار  $q$  در ابتدا و انتهای این جابه‌جایی یکسان باشد (عنی  $\Delta K = 0$ ). آنگاه معادله بالا به صورت زیر در می‌آید :

$$W_{\text{خارجی}} = -W_E = q\Delta V \quad (\text{برای } \Delta K = 0) \quad (13-1)$$

شکل ۱-۲۷ نیروی دست، بار  $q$  را در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه‌جا می‌کند.

در این حالت خاص، بسته به علامت و بزرگی  $q$  و  $V$ ، کار خارجی  $W$  می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد.

## تمرین ۱-۱۱

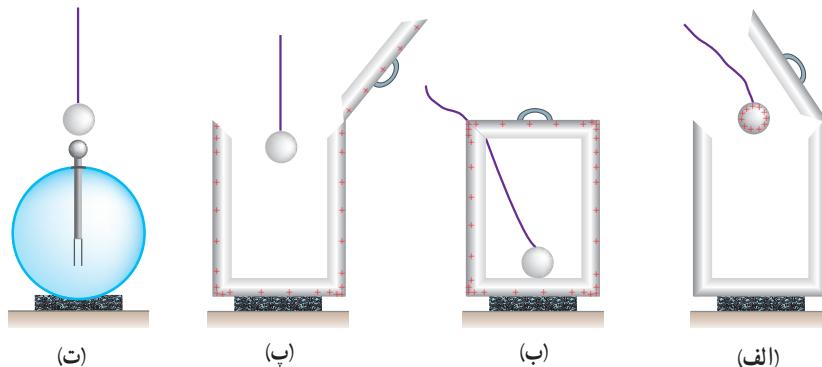
- در شکل ۱-۲۷ (الف) با فرض آنکه بار  $q+$  در ابتدا و انتهای جابه‌جایی ساکن باشد، آیا کار نیروی دست، مثبت است یا منفی؟  
ب) آیا بار  $q+$  به نقطه‌ای با پتانسیل بیشتر حرکت کرده است یا به نقطه‌ای با پتانسیل کمتر؟ توضیح دهید.

## ۱-۹ میدان الکتریکی در داخل رساناها

جسم رسانایی را در نظر بگیرید. به نظر شما اگر باری اضافی به این جسم داده شود، چگونه در آن توزیع می‌شود؟ اگر این جسم در میدان الکتریکی خارجی قرار گیرد، توزیع میدان در داخل و خارج آن چگونه می‌شود؟ در ادامه به توضیح آزمایشی می‌پردازیم که به قسمتی از این پرسش‌ها پاسخ می‌دهد. توزیع بار الکتریکی در رسانا – آزمایش فاراده : نخستین بار بینایمین فرانکلین برای بدن به اینکه بار الکتریکی داده شده به رسانای خنثی چگونه در آن توزیع می‌شود، آزمایشی را در سال ۱۷۵۵ میلادی انجام داد. تقریباً ۸۰ سال بعد (۱۸۳۶ میلادی) این آزمایش توسط مایکل فاراده انگلیسی به گونه‌ای دیگر تکرار شد. در ادامه به توضیح نوعی از آزمایش فاراده می‌پردازیم که اندکی با آزمایش اصلی او متفاوت است.

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 باردار و سپس وارد ظرف می‌کنیم (شکل ۱-۲۸ (الف)). اکنون گوی را با کف ظرف تماس می‌دهیم و سپس درپوش فلزی را می‌بندیم (شکل ۱-۲۸ (ب)). آنگاه درپوش فلزی را با دسته عایقش برمی‌داریم (شکل ۱-۲۸ (پ)).





شکل ۱-۲۸ شرحی تصویری از آزمایش فاراده

پس از خارج کردن گوی فلزی از طرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ تزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود عقرهٔ الکتروسکوپ تکان نمی‌خورد (شکل ۱-۲۸-ت). همچنین اگر طرف را به الکتروسکوپ تزدیک کنیم، مشاهده می‌شود که عقره‌های الکتروسکوپ از هم فاصله می‌گیرند.

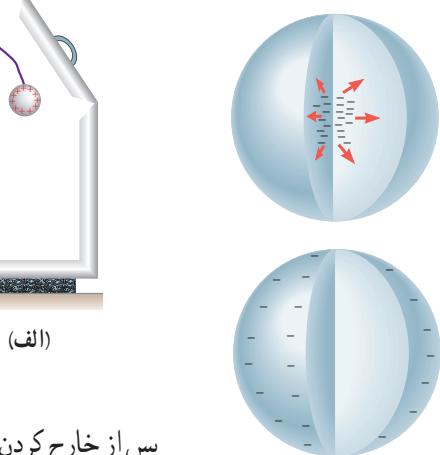
از این آزمایش نتیجه می‌گیریم که بار اضافی داده شده به یک رسانا روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود. شکل ۱-۲۹-۱ طرحی از توزیع بار اضافی داده شده در سطح خارجی یک رسانا را نشان می‌دهد. بررسی‌های دقیق نشان می‌دهند پس از مدت زمان کوتاهی از دادن بار به رسانا (کمتر از  $10^{-5}$  س)، بار در سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود و نحوه توزیع بار در رسانا به گونه‌ای است که میدان الکتریکی در داخل رسانا صفر شود. به عبارت دیگر در شرایط الکتروستاتیکی، میدان الکتریکی در داخل رسانا نمی‌تواند صفر نباشد؛ زیرا اگر این میدان صفر نباشد، بر الکترون‌های آزاد داخل رسانا نیروی الکتریکی (طبق رابطه  $\vec{F} = q\vec{E}$ ) وارد می‌کند و سبب ایجاد جریان الکتریکی در داخل رسانا می‌شود که این بدین معناست که بارها در تعادل الکتروستاتیکی قرار ندارند.

رسانای خنثی در میدان الکتریکی : در علوم هشتم با پدیده القا آشنا شدیم. در شکل ۱-۳۰ رسانای خنثی در میدان الکتریکی که بر روی آن بار القا می‌شود در میدان الکتریکی خارجی میله قرار گرفته است. جسم رسانای خنثی که بر روی آن بار القا می‌شود در میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، باز هم در مدت زمان کوتاهی (کمتر از  $10^{-5}$  س) الکترون‌های آزاد تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی، طوری روی سطح خارجی توزیع می‌شوند (القا می‌شوند) که میدان الکتریکی ناشی از آنها اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی کند و بدین ترتیب میدان الکتریکی خالص درون رسانا صفر شود. شکل ۱-۳۱-۱ یک گوی رسانا را نشان می‌دهد که در میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است. نحوه توزیع بار روی گوی به گونه‌ای است که میدان الکتریکی در داخل رسانا صفر شده است.

چون میدان الکتریکی درون رسانایی که در تعادل الکتروستاتیکی است برابر با صفر است، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره باردار در داخل رسانا نیز صفر می‌شود. بنابراین، کار نیروی الکتریکی در هر جا به جای دلخواهی در داخل رسانا صفر می‌شود. در نتیجه همه نقاط رسانا پتانسیل یکسانی دارند. به عبارت دیگر :

$$F_E = 0 \Rightarrow \Delta U_E = -W_E = 0$$

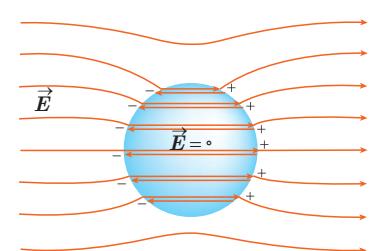
$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = 0 \Rightarrow V_2 - V_1 = 0 \Rightarrow V_1 = V_2$$



شکل ۱-۲۹-۱ بار اضافی داده شده به یک رسانا در سطح خارجی آن توزیع می‌شود.



شکل ۱-۳۰ نزدیک کردن میله باردار منفی به گوی فلزی خنثی که روی پایه عایقی قرار گرفته است، موجب ایجاد بارهای القایی مثبت و منفی در دو طرف گوی فلزی می‌شود.



شکل ۱-۳۱-۱ یک گوی رسانای خنثی در میدان الکتریکی خارجی. میدان الکتریکی خارجی باعث جدا شدن بارهای مثبت و منفی در دو وجه رسانا شده است، به طوری که میدان حاصل از این بارها، میدان خارجی در داخل رسانا را خنثی می‌کند. (توجه کنید که دو خط هر جفت خطوط میدان نشان داده شده در داخل رسانا متنطبق برهم آند و برای آنکه دیده شوند، با فاصله اندکی از هم رسم شده‌اند).

و در نتیجه

## فعالیت ۱-۷



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.

## فناوری و کاربرد

یکی از کاربردهای صنعتی پدیده القای بار الکتریکی، رنگ‌پاشی الکتروستاتیکی است (شکل ۱-۳۲-الف). در نوعی از این روش رنگ‌پاشی، سطح فلزی ای که قرار است رنگ شود به زمین متصل می‌شود. از طرفی قطره‌های رنگ هنگام خروج از دهانه رنگ‌پاش باردار می‌شوند. با تزدیک شدن قطره‌های رنگ به هدف فلزی، بارهای القایی با علامت مخالف بر روی فلز ظاهر می‌شوند و به این ترتیب، قطره‌ها را به سطح فلز جذب می‌کنند (شکل ۱-۳۲-ب). این روش رنگ‌پاشی، پاسخیده شدن رنگ از افشاگری قطره‌ها را کاهش می‌دهد و رنگ یکنواختی بر سطح جسم فلزی ایجاد می‌کند.



ب) اساس این رنگ‌پاشی مبتنی بر پدیده القای بار الکتریکی است.

الف) تصویری از رنگ‌پاشی الکتروستاتیکی

شکل ۱-۳۲

**چگالی سطحی بار الکتریکی رسانا :** برای اینکه بتوانیم تراکم بار الکتریکی در بخش‌های مختلف سطح یک جسم را با هم مقایسه کنیم کمیتی به نام **چگالی سطحی بار** را تعریف می‌کنیم. اگر مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده است برابر  $A$  و بار الکتریکی موجود در آن سطح برابر  $Q$  باشد چگالی سطحی بار که با نماد  $\sigma$  نشان داده می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید :

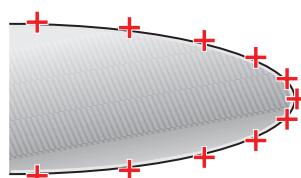
$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (14-11)$$

در این رابطه **چگالی سطحی بار** ( $\sigma$ ) برحسب کولن بر مترمربع ( $C/m^2$ ) می‌شود. اکنون می‌خواهیم **چگالی سطحی بار الکتریکی** در رسانا را بررسی کنیم. دیدیم که بار الکتریکی روی

سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود. برای اینکه درایام بار الکتریکی داده شده به یک رسانا چگونه روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود از تعریف چگالی سطحی بار استفاده می‌کیم. به این منظور آزمایش زیر را در نظر بگیرید که اسباب آن در شکل ۳۳-۱ نشان داده شده است. یک جسم رسانای دوکی شکل را روی پایه عایق قرار دهید و آن را با تماس با کلاهک مولد و اندوگراف باردار کنید. گلوهای فلزی را به که به دستهای عایق متصل است با بخش پهن دوک تماس داده و سپس گلوه را به سر الکتروسکوپ تماس دهید. همین آزمایش را پس از خنثی کردن الکتروسکوپ و گوی فلزی با تماس با دستان، با نوک تیز دوک انجام دهید. خواهد دید، انحراف صفحه‌های الکتروسکوپ با نوک تیز دوک بیشتر از انحراف صفحه‌ها با بخش پهن آن است. آزمایش‌هایی از این دست نشان می‌دهد تراکم بار و چگالی سطحی بار در نقاط تیز سطح جسم رسانای باردار از نقاط دیگر آن بیشتر است (شکل ۳۴-۱). همچنین می‌توان نشان داد که خطوط میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز چنین رسانایی متراکم‌تر و در نتیجه میدان الکتریکی در تزدیکی این نقاط، قوی‌تر است.



شکل ۳۳-۱ اسباب آزمایش چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی یک جسم رسانای باردار



شکل ۳۴-۱ چگالی بار در نقاط تیزتر سطح یک جسم رسانای باردار بیشتر است.

### فعالیت ۱

دو قطعه ورقه آلومینیمی نازک به ابعاد  $3\text{cm} \times 4\text{cm}$  را مچاله کنید و به سرها دو تکه نخ هم اندازه به طول  $30\text{cm}$  وصل کنید. پس از آنکه جسم فلزی دوکی شکل را با مولد و اندوگراف باردار کردید، یکی از آونگ‌ها را مقابل نوک تیز و دیگری را مقابل بخش پهن دوک بیاویزید. چه مشاهده می‌کنید؟ مشاهده خود را توجیه کنید.



### مثال ۱۴

سطح فلزی بزرگ بارداری را در نظر بگیرید که بار الکتریکی در سطح آن و دور از لبه‌ها به طور یکنواخت توزیع شده است. اگر چگالی بار روی این سطح  $C/m^2$  باشد، در بخشی از این سطح به شکل مربعی به ضلع  $10\text{mm}$  چقدر بار قرار گرفته است؟

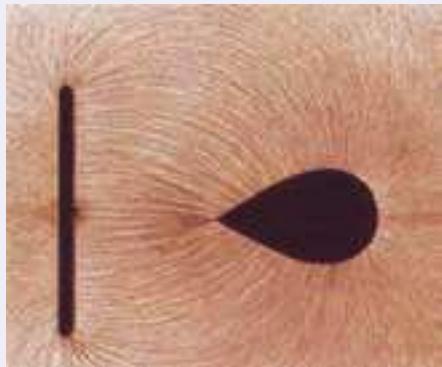
**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۱۴-۱ و تبدیل یکاهای SI، خواهیم داشت :

$$Q = \sigma A = (2.0 \times 10^{-6} C/m^2)(1.0 \times 10^{-3} m \times 1.0 \times 10^{-3} m) = 2.0 \times 10^{-12} C = 2.0 pC$$



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



(الف) اسباب آزمایش فعالیت ۱-۳ 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.

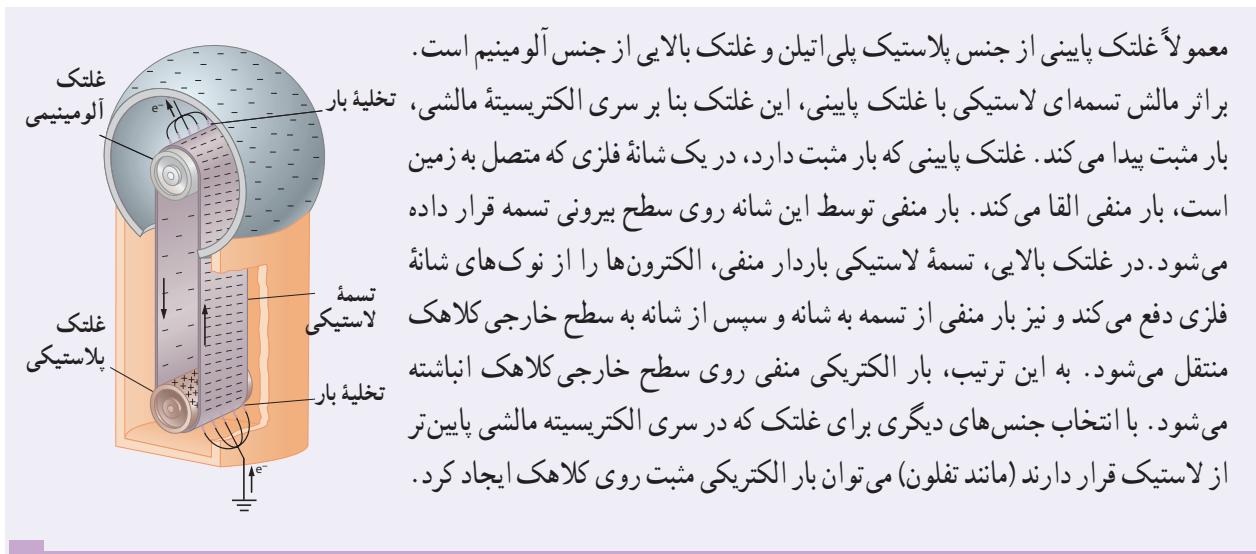


(ب) تخلیه هاله‌ای

همان‌طور که دیدیم در قسمت‌های نوک تیز اجسام رسانا، چگالی سطحی بار الکتریکی بیشتر است. با اسباب آزمایش فعالیت ۱-۳ می‌توان نشان داد که خطوط میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز متراکم‌تر و در نتیجه میدان الکتریکی قوی‌تر است (شکل الف). اگر بزرگی این میدان از یک مقدار حدّی فراتر برود، این میدان شدید می‌تواند الکترون‌ها را از مولکول‌های هوا بکند و به آنها شتاب دهد. برخورد این الکترون‌ها با مولکول‌های دیگر موجب برانگیختنگی 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 چیزی و لیز و هیس مانندی 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 آشن سنت المو<sup>۲</sup> گفته می‌شود.

### خوب است بدانید: مولّد وان دوگراف

مولّد وان دوگراف، دستگاهی است که بار الکتریکی روی کلاهک فلزی آن انباشته می‌شود. اگر یک جسم رسانا با کلاهک این دستگاه تماس پیدا کند و یا در نزدیکی آن قرار گیرد می‌تواند دارای بار الکتریکی شود. در نمونه ساده مولّد وان دوگراف، غلتک پایینی توسط یک موتور الکتریکی می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود.



## ۱۰-۱ 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 ۳۵-۱). باتری‌ها معمولاً می‌توانند انرژی را فقط با آهنگ نسبتاً کمی به مدار بدنهند 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 ۳۶-۱ چند خازن را در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۳۷-۱ اجزای اصلی یک خازن معمولی را نشان می‌دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. این رساناها را صفحه‌های خازن می‌نامیم.

شکل ۳۸-۱ 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 (شکل ۴۰) مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن‌ها با هر شکلی استفاده می‌شود. خازن‌ها به طور گسترده‌ای در مدارهای الکترونیکی و سایلی مانند رادیو، تلویزیون، رایانه، گوشی همراه و... به کار می‌روند؛ مثلاً شکل ۳۹-۱ مدار یک تقویت‌کننده (آمپلی‌فایر) را نشان می‌دهد که در آن چندین خازن به کار رفته است. برخی از این خازن‌ها با پیکان‌هایی مشخص شده‌اند.

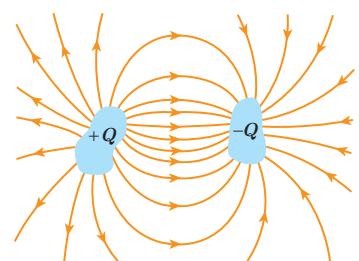
باردار (شارژ) کردن خازن: روش ساده و مرسوم برای باردار کردن خازن قرار دادن آن در مدار الکتریکی ساده‌ای است که یک باتری دارد (شکل ۴۰-الف). وقتی کلید K بسته (وصل) شود بار از طریق سیم‌های رسانا جریان می‌یابد. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحه خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایه 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،



شکل ۳۵-۱ انرژی فلاش دوربین در یک خازن ذخیره شده است.

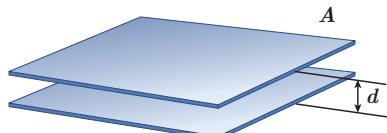


شکل ۳۶ تصویری از چند خازن مختلف



شکل ۳۷ اجزای اصلی یک خازن باردار

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

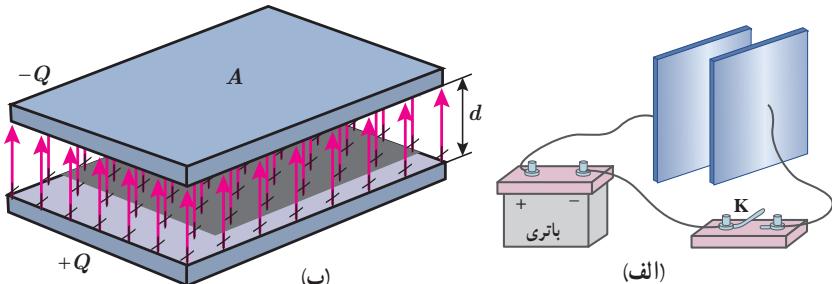


شکل ۱-۸ یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت  $A$  ساخته شده است که به فاصله  $d$  از هم قرار گرفته‌اند.



شکل ۱-۹ مدار یک تقویت‌کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن‌ها با پیکان مشخص شده‌اند.

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 ۱-۹-ب).



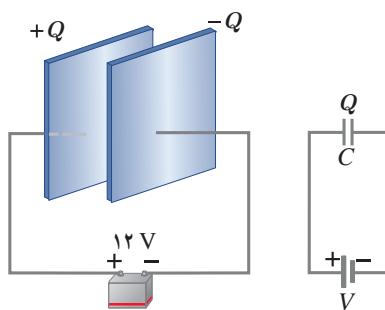
شکل ۱-۹ (الف) یک روش برای باردار کردن خازن، اتصال صفحه‌های آن به یک باتری است. (ب) صفحه‌های این خازن بارهای همان اندازه و با علامت مخالف پیدا می‌کنند. میدان الکتریکی از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است.

**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. بنابراین دلایل تاریخی، قدر مطلق اختلاف پتانسیل  $V$  بین دو صفحه خازن را با  $\Delta V$  نمایش می‌دهند. بنابراین:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (15-1)$$

در رابطه ۱۵-۱ 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 متدائل در محدوده پیکوفاراد ( $10^{-12} F$ ) تا میلی فاراد ( $10^{-3} F$ ) است. گرچه امروزه فناوری ساخت خازن‌ها، دستیابی به ظرفیت‌های بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

### مثال ۱۵



صفحه‌های خازنی را مطابق شکل به پایانه‌های یک باتری با اختلاف پتانسیل ۱۲V وصل می‌کنیم. اگر بار خازن  $C = 24\mu F$  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 ۱۵-۱ داریم :

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{24 \times 10^{-6} C}{12 V} = 2.0 \times 10^{-6} F = 2.0 \mu F$$

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

استفاده از رابطه ۱۵-۱ می توان نوشت :

$$Q = CV = (2.0 \times 10^{-6} F)(36 V) = 72 \times 10^{-6} C = 72 \mu C$$

### خوب است بدانید: بطری لیدن!



(ب)



(الف)

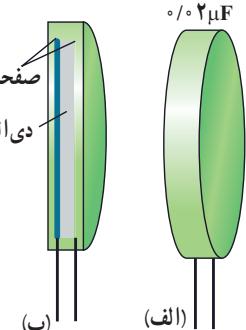
بطری لیدن، قدیمی ترین نوع خازن است که در میانه سده هجدهم در شهر لیدن که امروزه در هلند واقع شده است، ساخته شد. در یک نوع ابتدایی، این خازن از یک بطری شیشه‌ای ساخته شده است که سطح درونی و بیرونی آن با ورقه نازک قلع پوشیده شده است. ورقه درونی توسط سیم یا زنجیری فلزی به میله فلزی ثابت داخل بطری اتصال دارد (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 ویم چرست<sup>۲</sup> باردار می شود. ظرفیت یک بطری لیدن با اندازه متوسط از مرتبه  $1 nF$  است. آزمایش با بطری لیدن خطرناک است و باید تحت نظارت مربي یا دبیر محترم انجام شود.

### ۱۱- خازن با دی الکتریک

اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با ماده‌ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن دی الکتریک گفته می شود پُر کنیم (شکل ۱-۴۱) برای ظرفیت خازن چه پیش می آید؟ مایکل فاراده نخستین بار در سال ۱۸۳۷ میلادی، با استفاده از وسایل ساده‌ای دریافت که ظرفیت خازن با ضربی موسوم به ثابت دی الکتریک ماده عایق (که آن را با  $\kappa$ <sup>۳</sup> نشان می دهند) افزایش می یابد؛ یعنی اگر ظرفیت خازن بدون دی الکتریک را با  $C_0$  نمایش دهیم آن گاه ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر است با

$$C = \kappa C_0 \quad (16-1)$$



شکل ۱۶-۱ (الف) بیرون و (ب) درون یک خازن که بین صفحه‌های فلزی آن لایه عایقی قرار گرفته است.

جدول ۱-۴ ثابت دی الکتریک چند ماده عایق را نشان می دهد. فرض کنید خازنی را نخست توسط یک باتری باردار و سپس از باتری جدا کرده‌ایم. اکنون فضای داخل این خازن را با یک دی الکتریک پر می کنیم. توجه کنید که دی الکتریک‌ها بر دو نوع اند: قطبی و غیرقطبی. وقتی یک دی الکتریک قطبی (مانند آب،  $HCl$ ،  $NH_3$ ) در میدان الکتریکی بین دو صفحه

۱- Leyden jar

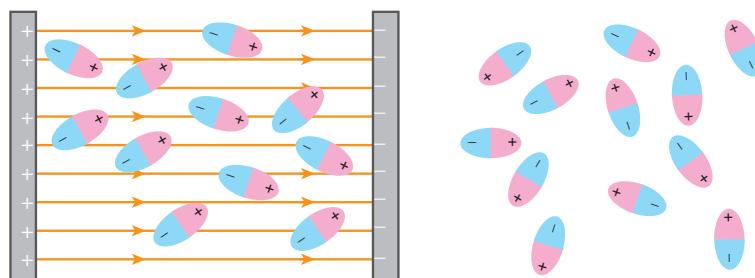
۲- Wimshurst Machine

۳- از حروف الفبا یونانی که کاپا خوانده می شود.

جدول ۱-۴- ثابت دی الکتریک  
برخی عایق ها در دمای  $20^{\circ}\text{C}$

ماده دی الکتریک	ثابت دی الکتریک
۱/۰۰۰۶	هوای ۱atm
۲/۱	تفلون
۲/۲	پارافین
۲/۶	پلی استیرن
۲/۱	میلار
۲/۴	بی وی سی
۲/۵	کاغذ
۴/۳	کوارتز
۵	شیشه پیرکس
۷	میکا
۸۰	آب خالص
۳۱۰	تیتانید استرانسیوم

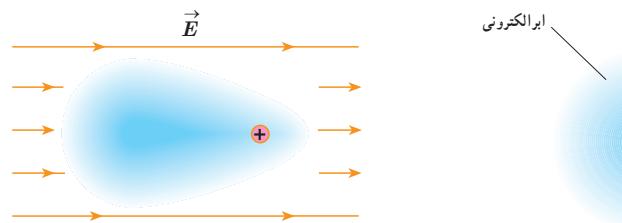
خازن قرار می گیرد، سر منفی مولکول های دوقطبی به طرف صفحه مثبت و سر مثبت آنها به طرف صفحه منفی کشیده می شود و در نتیجه این مولکول های دوقطبی می کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی بین دو صفحه خازن هم ردیف کنند (شکل ۱-۴۲).



الف) در نبود میدان الکتریکی، مولکول های دوقطبی می کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی خارجی هم ردیف کنند.  
ب) در حضور میدان الکتریکی، مولکول های دوقطبی می کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی اعمال شده باعث می شود که ابر الکترونی مولکول های دی الکتریک غیرقطبی می شود؛ یعنی میدان الکتریکی اعمال شده باعث می شود که ابر الکترونی مولکول های دی الکتریک در خلاف جهت میدان جایه جا شود (شکل ۱-۴۳) و به این ترتیب، مرکز بارهای مثبت و منفی مولکول ها از هم جدا شده و اصطلاحاً مولکول ها قطبیده شوند.

شکل ۱-۴۲

وقتی یک دی الکتریک غیرقطبی (مانند متان، بنز و...) در میدان بین دو صفحه خازن قرار می گیرد بر اثر القا قطبیده می شود؛ یعنی میدان الکتریکی اعمال شده باعث می شود که ابر الکترونی مولکول های دی الکتریک در خلاف جهت میدان جایه جا شود (شکل ۱-۴۳) و به این ترتیب، مرکز بارهای مثبت و منفی مولکول ها از هم جدا شده و اصطلاحاً مولکول ها قطبیده شوند.



الف) در نبود میدان الکتریکی، مرکز شوند و ابر الکترونی در خلاف جهت میدان جایه جا می شود.  
ب) در حضور میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا شده و منفی برهم منطبق اند.

شکل ۱-۴۳

می توان نشان داد این رفتار مولکول های دی الکتریک (قطبی یا غیرقطبی) در میدان الکتریکی بین صفحه های خازن، سبب افزایش ظرفیت خازن می شود.

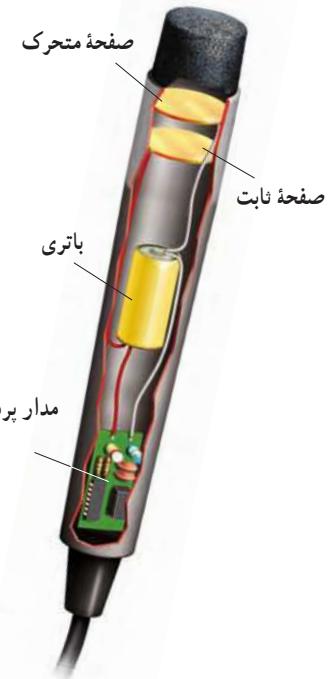
به عنوان مثالی از کاربرد دی الکتریک، خازن تختی را در نظر بگیرید. آزمایش و محاسبه نشان می دهد که ظرفیت یک خازن تخت با مساحت صفحه های A و فاصله جدابی صفحه های d، از رابطه زیر به دست می آید :

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (17-1)$$

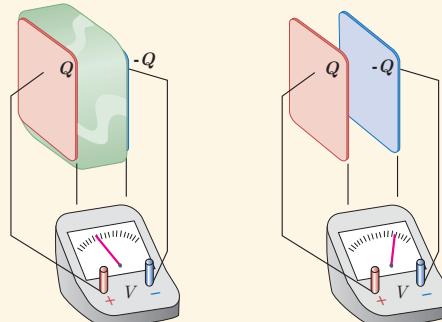
که در آن  $\epsilon_0$  همان ضریب گذرهای الکتریکی خلأ ( $=8/85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ) است. مثالی کاربردی از این رابطه، میکروفون خازنی است که بر اثر تغییر ظرفیت یک خازن تخت سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کند (شکل ۱۶-۱).

حال اگر فضای بین صفحه‌های این خازن را با یک دیالکتریک با ثابت دیالکتریک  $\kappa$  کاملاً پر کنیم، طبق رابطه ۱۶-۱ برای ظرفیت خازن جدید داریم:

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (16-1)$$



در شکل زیر صفحه‌های باردار یک خازن تخت را که بین آنها هواست، به ولتسنج وصل می‌کنیم. با وارد کردن دیالکتریک 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.)

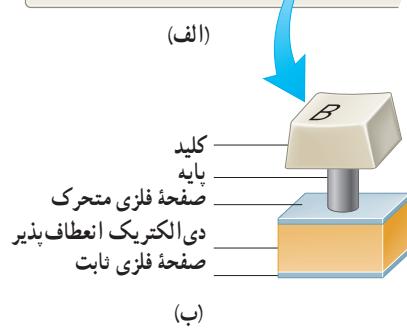


شکل ۱-۲ در یک میکروفون خازنی، با ارتعاش صفحه متحرک (دیافراگم) خازن بر اثر صدا، فاصله صفحه‌های خازن تغییر می‌کند بنابراین ظرفیت خازن تخت تغییر می‌کند که به ایجاد یک سیگنال الکتریکی می‌انجامد.

## مثال ۱-۱۶



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

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۱۸-۱ ظرفیت خازن پیش از فشار دادن کلید برابر است با

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} = 3/50 (8/85 \times 10^{-12} \text{ F/m}) \frac{(9/50 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}{(5/00 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

$$= 0.089 \times 10^{-12} \text{ F} = 0.089 \text{ pF}$$

پس از فشرده شدن کلید، فاصله بین صفحه ها به  $10^{-3} \text{ m} \times 10^{-3} \text{ m} / 0.05 \text{ m} = 10^{-12} \text{ F} = 10/6 \text{ pF}$  می رسد و با محاسبه ای مشابه به  $C = 10/6 \times 10^{-12} \text{ F} = 10/6 \text{ pF}$  می رسیم. بنابراین، تغییر ظرفیت خازن که به صورت سیگالی آشکار می شود از تفاضل دو مقدار بالا به دست می آید :

$$\Delta C = 10/6 \text{ pF} - 0.089 \text{ pF} = 10/0 \text{ pF}$$

## فعالیت ۱۰-۱



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

## خوب است بدانید: نیروی وان دروالس او چسبیدن مارمولک ها به دیوار



نیروی وان دروالس برای توصیف نیروی جاذبه الکتریکی بین مولکول ها استفاده می شود. دلیل این نامگذاری این است که وان دروالس در سال ۱۸۷۳ نخستین پیشنهاد را برای نیروهای الکتریکی بین ذره های سازنده گاز به منظور توصیف برخی از ویژگی های گازهای غیرآرامانی و مایعات ارائه کرد. منشأ نیروی وان دروالس برهم کنش الکتریکی بین دوقطبی های الکتریکی است. براساس نیروی وان دروالس می توان بسیاری از چسبندگی ها از جمله چسبندگی پای مارمولک روی دیوار را توضیح داد.

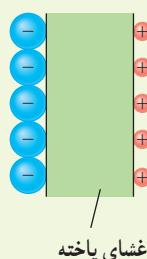
پای مارمولک تعداد بی شماری مو موسوم به سِتا دارد که هر موضعی برجستگی یا سرمشی دارد که به کاردک معروف اند. وقتی مارمولک یک مو را بر دیوار می فشارد تمام این کاردک ها توسط نیروی وان دروالس به دیوار می چسبند. این نیرو ناشی از برهم کنش الکتریکی دوقطبی های موجود در کاردک ها و دوقطبی هایی است که این کاردک ها بر سطح دیوار القا می کنند. وقتی مارمولک پای خود را بر دیوار قرار می دهد دوقطبی های موجود در دو سطح، یکدیگر را جذب می کنند. گرچه نیروی وان دروالس ضعیف است، اما مجموع این نیروهای بی شمار می تواند مارمولک را بر سطح دیوار نگه دارد.

**فروزیش 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 ۱۴۵) که سبب تخلیه خازن می‌گردد. به این پدیده **فروزیش الکتریکی**<sup>۲</sup> ماده دی الکتریک می‌گویند. فروزیش الکتریکی در عایق بین دو صفحه خازن‌ها معمولاً<sup>۳</sup> با ایجاد یک جرقه همراه است و در بیشتر مواقع خازن را می‌سوزاند. خازن‌ها معمولاً<sup>۴</sup> با مقدار ظرفیت آنها و اختلاف پتانسیل بیشینه‌ای که می‌توانند تحمل کنند مشخص می‌شوند (شکل ۱۴۶).



شکل ۱۴۵ نقش‌های لیچنبرگ. فروزیش الکتریکی باعث تشکیل مسیرهای رسانشی سرخس شکلی در دی الکتریک شده است.

شکل ۱۴۶ تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل بیشینه قابل تحمل نوشته شده است.



یک یاخته 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 روبرو). 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  $\kappa = 3/0$ ، ضخامت  $10/\text{nm}$  و مساحت سطح  $10^{-1}\text{m}^2$  است.

## تمرین ۱۱-۱

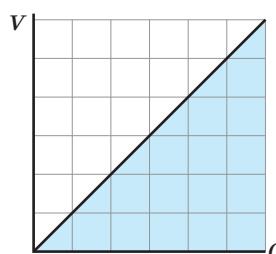
خازن‌ها انواع متعددی دارند؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند. درباره خازن‌های مختلف مانند خازن‌های ورقه‌ای، میکا، سرامیکی، الکترولیتی، خازن‌های متغیر، آبرخازن‌ها و ظرفیت آنها تحقیق کنید. هر گروه می‌تواند روی یک نوع خازن تحقیق کند.

## ۱۲-۱ انرژی خازن

وقتی صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شوند در خازن انرژی ذخیره می‌شود. برای اینکه انرژی ذخیره شده در خازن را مشاهده کنیم، کافی است دو سر یک خازن پرشده را به دو سر یک لامپ کوچک وصل کنیم. به شرط آنکه ظرفیت و اختلاف پتانسیل خازن به اندازه کافی زیاد باشد، لامپ برای مدتی روشن و سپس خاموش می‌شود. درهنگام شارژ شدن خازن توسط باتری، دائمًا باری جزئی از یک صفحه خازن جدا و به همان اندازه به صفحه دیگر منتقل می‌شود. در این فرایند، طبق رابطه ۱۳-۱

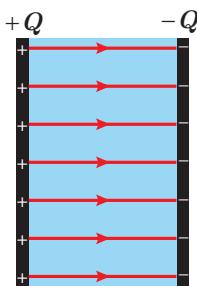
۱- موسوم به نقش‌های لیچنبرگ (Lichtenberg)

۲- Electrical Breakdown



شکل ۱۴۷-۱ نمودار ولتاژ بر حسب بار برای خازنی که توسط یک باتری باردار می شود.

$V = \frac{Q}{C}$ ، باتری روی این بار کار انتقال بار، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن نیز به آهستگی افزایش می یابد. بنابراین، برای انتقال بارهای بعدی به کار بیشتری نیاز است. بنابراین  $V = Q/C$  و با توجه به اینکه در این فرایند ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن تابعی خطی از بار ذخیره شده در آن می شود که به طور یکنواخت از صفر تا  $V$  افزایش می یابد (شکل ۱۴۷-۱). بنابراین، در هنگام باردار شدن خازن می توان اختلاف پتانسیل متوسطی را به صورت  $\bar{V} = \frac{V+0}{2} = \frac{V}{2}$  برای دو صفحه خازن در نظر گرفت. آن گاه با استفاده از رابطه ۱۳-۱ کار انجام شده برای باردار شدن کامل خازن برابر با حاصل ضرب کل بارهای جزئی منتقل شده ( $Q$ ) در اختلاف پتانسیل متوسط است :



$$W = Q\bar{V} = Q\left(\frac{V}{2}\right) = \frac{1}{2}QV$$

این کار به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی فضای بین صفحه های خازن ذخیره می شود (شکل ۱۴۸-۱) :

$$U_{خازن} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} \quad (19-11)$$

شکل ۱۴۸-۱ انرژی در میدان الکتریکی بین صفحات خازن ذخیره می شود.

که در آن انرژی پتانسیل الکتریکی خازن ( $U_{خازن}$ ) بر حسب زول (J)، بار خازن ( $Q$ ) بر حسب کولن (C)، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن ( $V$ ) بر حسب ولت (V) و ظرفیت خازن ( $C$ ) بر حسب فاراد (F) است.

## مثال ۱۸-۱



مدار یک فلاش عکاسی، انرژی را با ولتاژ  $33^{\circ}V$ ، در یک خازن  $66\text{ }\mu F$ ، ذخیره می کند. الف) چه مقدار انرژی الکتریکی در این خازن ذخیره می شود؟ ب) اگر تقریباً همه این انرژی در مدت  $1/0\text{ ms}$  آزاد شود، توان متوسط خروجی فلاش چقدر است؟

پاسخ : با توجه به رابطه ۱۹-۱ داریم

$$U = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}(66\text{ }\mu F)(33^{\circ}V)^2 = 35/9\text{ J}$$

با توجه به تعریف توان داریم :

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

که این در تأیید گفته ای است که در ابتدای بخش ۱۰ در مورد خازن بیان کردیم و گفتیم یک خازن باردار می تواند انرژی را با آهنگ بسیار بیشتری از یک باتری برای فلاش دوربین مهیا کند.

## مثال ۱۹- دستگاه رفع لرزش فامنظام قلب (دفیریلاتور)



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، انساط و اقباض ناهمانگ قلب باعث می‌شود خون به درستی به مغز فرستاده نشود. در این دستگاه یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود  $6\text{ kV}$  باردار می‌کند. صفحه‌های رابط (کفشهای) روی قفسه سینه بیمار قرار داده می‌شوند و خازن بخشی از انرژی ذخیره شده خود را از طریق کفشهای به بدن بیمار منتقل می‌کند. هدف از این کار این است که قلب به‌طور موقت از کار بیفتد و پس از آن با آهنگ منظم و طبیعی خود به کار افتد.

اگر ظرفیت خازن این دستگاه  $11/\mu\text{F}$  باشد و با ولتاژ  $6/0\text{ V}$  شارژ شود و سپس تمام انرژی آن از طریق کفشهای به 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  $2/\text{ms}$  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 ۱۹-۱ به‌دست می‌آید :

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (11/\mu\text{F}) (6/0\text{V})^2 = 198\text{J}$$

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

(ب) با اولیه روی صفحات خازن برابر است با

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

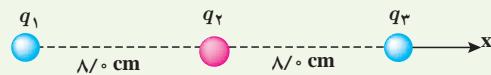
با توجه به فرض مسئله، این همان باری است که از بدن بیمار عبور کرده است.

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

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



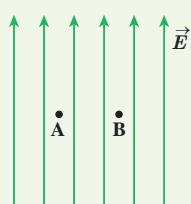
**۶** بارهای الکتریکی نقطه‌ای  $q_1 = +5 \mu C$ ،  $q_2 = -4 \mu C$ ،  $q_3 = -4 \mu C$  مطابق شکل، در جای خود ثابت شده‌اند. نیروی خالص الکتریکی وارد بر هر یک از بارهای  $q_2$  و  $q_3$  را محاسبه کنید.



**۷** در شکل رو به رو، دو گوی مشابه به جرم  $2/5 g$  و بار یکسان مثبت  $q$  در فاصله  $10 \text{ cm}$  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؟

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

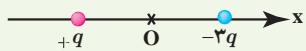
**۸** یک ذره باردار را یکبار در نقطه A و بار دیگر در نقطه B قرار می‌دهیم. نیرویی که از طرف میدان الکتریکی بر این ذره باردار در این دو نقطه وارد می‌شود را مقایسه کنید.



**۹** هسته اتم آهن شعاعی در حدود  $4 \times 10^{-15} \text{ m}$  دارد و تعداد پروتون‌های آن ۲۶ عدد است. الف) بزرگی نیروی دافعه بین دو پروتون این هسته که به فاصله  $4 \times 10^{-15} \text{ m}$  از هم قرار دارند چقدر است؟ ب) اندازه میدان الکتریکی ناشی از هسته در فاصله  $10^{-10} \text{ m}$  از مرکز هسته چقدر است؟

**۱۰** 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 بی‌نهایت) نقطه‌ای وجود دارد که در آنجا میدان الکتریکی برایند برابر با صفر است؟ (ب) بزرگی و جهت میدان الکتریکی برایند در مبدأ مختصات را بیابید.



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

- چگونه توسط یک الکتروسکوپ می‌توانیم تشخیص دهیم که:  
 الف) یک میله باردار است یا نه؟  
 ب) میله رساناست یا عایق؟  
 پ) نوع بار میله باردار چیست؟



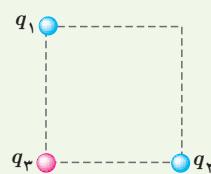
یک میله پلاستیکی را با پارچه پشمی مالش می‌دهیم. پس از مالش، بار الکتریکی میله پلاستیکی  $12/8 \mu C$  می‌شود.  
 الف) بار الکتریکی ایجاد شده در پارچه پشمی چقدر است؟  
 ب) تعداد الکترون‌های منتقل شده از پارچه پشمی به میله پلاستیکی را محاسبه کنید.

**۱۲** الف) بار الکتریکی اتم و هسته اتم کربن ( $C^{12}$ ) چند کولن است؟  
 ب) بار الکتریکی اتم کربن یک بار یوننده ( $C^+$ ) چقدر است؟

### ۱-۳ قانون کول

**۱۴** دو گوی رسانا، کوچک و یکسان به بارهای  $q_1 = 4 \mu C$  و  $q_2 = -6 \mu C$  را با هم تماس می‌دهیم و سپس تا فاصله  $r = 30 \text{ cm}$  از هم دور می‌کیم. نیروی برهمنش الکتریکی بین دو گوی را محاسبه کنید. این نیرو رانشی است یا رباشی؟

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



**۱۵** دو بار الکتریکی نقطه‌ای غیرهمنام  $q_1 = +1.0 \text{ nC}$  و  $q_2 = -1.0 \text{ nC}$  مطابق شکل زیر به فاصله  $6.0 \text{ cm}$  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؟



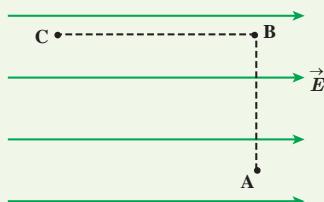
## ۷-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی و پتانسیل الکتریکی

**۱۶** مطابق شکل زیر، بار  $q = +5.0 \text{ nC}$  را در میدان الکتریکی یکنواخت  $C = 1.0 \times 10^5 \text{ N/C}$  از نقطه A تا نقطه B و سپس تا نقطه C جابه‌جا می‌کنیم. اگر  $AB = 0.20 \text{ m}$  و  $BC = 0.40 \text{ m}$  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.



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



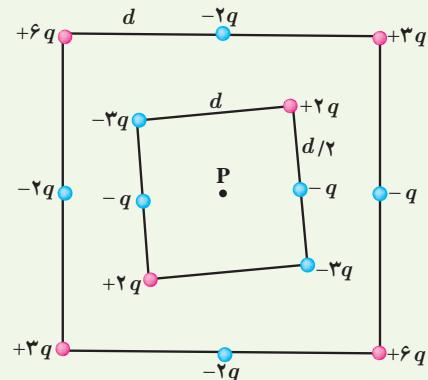
• B

+

• A

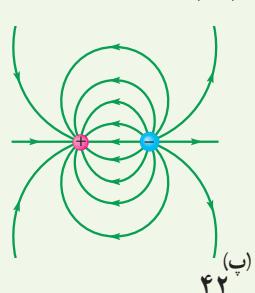
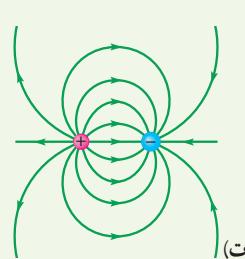
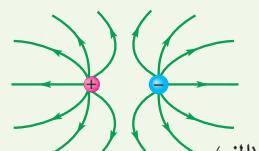
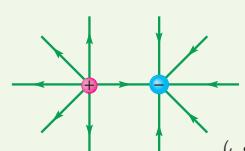
**۱۱** در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی  $5.0 \times 10^5 \text{ N/C}$  که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره بارداری به جرم  $g = 2.0 \text{ g}$  معلق و به حال سکون قرار دارد. اگر  $g = 1.0 \text{ N/kg}$  باشد، اندازه نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.

**۱۲** شکل زیر دو آرایه مربعی از ذرات باردار را نشان می‌دهد. مربع‌ها که در نقطه P هم مرکزند، همدیف نیستند. ذره‌ها روی محیط مربع به فاصله  $d/2$  از هم قرار گرفته‌اند. بزرگی و جهت میدان الکتریکی برایند در نقطه P چیست؟



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

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



۲۲ یک صفحه پلاستیکی باردار (تلق یا ورق باردار) را به براده‌های ریز آلومینیمی بدون بار تزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود که براده‌ها به طرف صفحه پلاستیکی، جذب می‌شوند. علت این پدیده را توضیح دهید.

۲۳ وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای اطراف زمین باردار می‌شود. این بارها ممکن است موجب آسیب‌رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شود. فرض کنید ماهواره‌ای در اثر عبور از یکی از لایه‌های جو دارای بار الکتریکی  $q = 2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$  شود. این ماهواره، مکعبی به ضلع  $4.0 \text{ cm}$  است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود.)

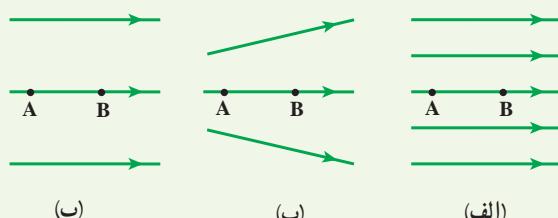


### ۱۰-۱ خازن

۲۴ اگر ساختمان یک خازن را تغییر ندهیم، در هر یک از شرایط زیر ظرفیت خازن چگونه تغییر می‌کند؟  
الف) بار آن دو برابر شود.  
ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌های آن سه برابر شود.

۲۵ اختلاف پتانسیل میان دو صفحه یک خازن را از  $28 \text{ V}$  به  $40 \text{ V}$  افزایش می‌دهیم. اگر با این کار  $15 \text{ μC}$  میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

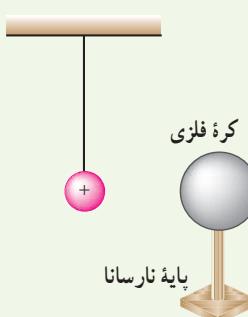
۱۸ شکل زیر سه آرایش خطوط میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. در هر آرایش، یک پروتون از حالت سکون در نقطه A رها می‌شود و سپس توسط میدان الکتریکی تا نقطه B شتاب می‌گیرد. نقطه‌های A و B در هر سه آرایش در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. در کدام شکل سرعت پروتون در نقطه B بیشتر است؟ توضیح دهید.



۱۹ دو صفحه رسانا با فاصله  $2.0 \text{ cm}$  را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را به اختلاف پتانسیل  $10 \text{ V}$  وصل می‌کیم. درنتیجه، 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 میان دو صفحه توضیح دهید که کدام یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیشتری دارد.

۲۰ بار الکتریکی  $q = -4.0 \text{ nC}$  از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی  $V_1 = -4.0 \text{ V}$  تا نقطه‌ای با پتانسیل  $V_2 = -10 \text{ V}$  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.

### ۱-۱ میدان الکتریکی در داخل رساناها



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

**۲۹** 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.

**۳۰** مساحت هریک از صفحه‌های خازن تختی،  $1/۰۰\text{ m}^۲$  و فاصله دو صفحه از هم،  $۵/۰\text{ mm}$  است. عایقی با ثابت دیالکتریک  $۴/۹$  بین دو صفحه قرار داده شده است. ظرفیت خازن را تعیین کنید.

## ۱۲-۱ انرژی خازن

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

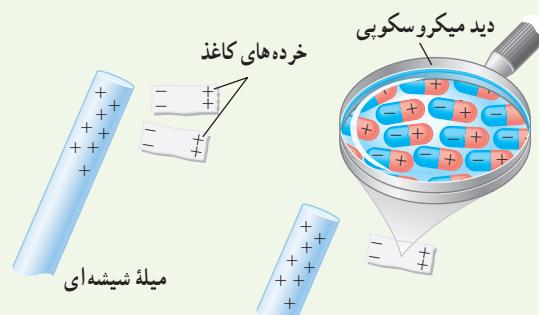
**۳۲** ظرفیت خازنی  $۱۲\text{ میکروفاراد}$  و بارالکتریکی آن  $۶\text{ nC}$  است. اگر  $۳/۰\text{ mC}^{+}$  بارالکتریکی را از صفحه منفی جدا کرده و به صفحه مثبت منتقل کنیم، انرژی ذخیره شده در خازن به اندازه  $۸/۰\text{ J}$  زیاد می‌شود.  $q$  را محاسبه کنید.

## ۱۱-۱ خازن با دیالکتریک

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



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



**۲۸** ظرفیت یک خازن تخت با فاصله صفحات  $۱/۰\text{ mm}$  که بین صفحه‌های آن هوا قرار دارد، برابر  $۱/۰\text{ F}$  است. مساحت صفحه‌های این خازن چقدر است؟ از این مسئله چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



# جريان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



پژوهش‌های زیادی در این بحث بهبود کیفیت باتری فودروهای الکتریکی و هیبریدی (که در آنها از موتورهای درون سوزن بنزینی و الکتریکی با هم استفاده می‌شود) در حال انجام است. یک نوع از این باتری‌ها، باتری لیتیم است که یکی از قطب‌های آن لیتیم و قطب دیگر آن کربن است. مسافتی که یک فودروی الکتریکی با هر بار شارژ شدن طی می‌کند، عامل مهمی است. برخلاف فودروهای بنزینی که سوخت‌گیری آنها پند دقیقه‌ای بیشتر طول نمی‌کشد، شارژ کردن باتری این فودروها به پند ساعت زمان نیاز دارد. از همین و دانشمندان در تلاش اند زمان شارژ این باتری‌ها را کاهش دهند. یکی از این راه‌ها استفاده از منبعهای نیروی مهارکه است که از این فازنها استفاده می‌کند. با استفاده از این فناوری ممکن است بتوان فودروهای الکتریکی را در مدت کوتاهی شارژ کرد.

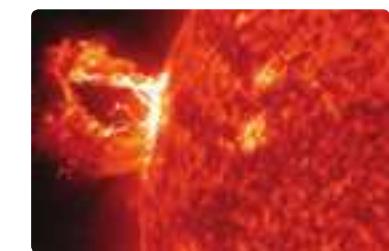
در فصل پیش با بار و میدان الکتریکی و همچنین اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در میدان الکتریکی آشنا شدیم و به بررسی برهم کنش بارهای الکتریکی در حالت سکون پرداختیم. در این فصل به بررسی و مطالعه جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم می‌پردازیم.

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

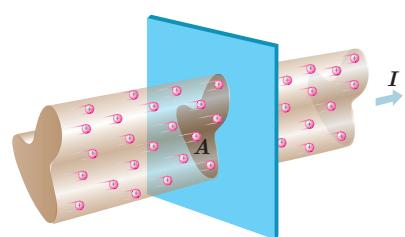


شکل ۱-۲ انرژی از باتری به صفحه نمایشگر تلفن، از طریق سیم‌های رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان اند، منتقل می‌شود.

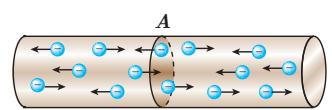
اکنون با این پرسش شروع می‌کنیم که چرا هر مجموعه‌ای از بارهای متحرک لزوماً جریان الکتریکی ایجاد نمی‌کنند؟ در واقع برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم، باید یک انتقال خالص بار از یک سطح مقطع معین رخ دهد (شکل ۲-۲) که به این منظور نیاز به ابزاری مانند باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را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



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



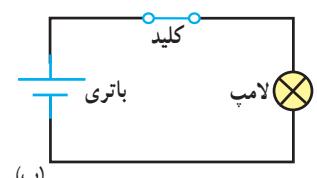
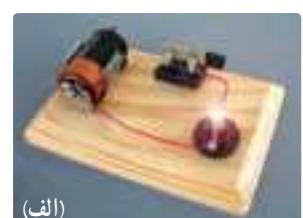
شکل ۲-۳ باریکه‌ای از بارهای مشتب از سطح مقطع A می‌گذرند و جریان I را ایجاد می‌کنند.



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

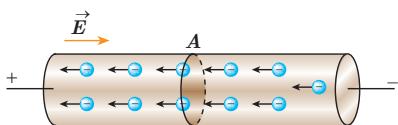
## ۱-۲ جریان الکتریکی

جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همه بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. برای داشتن جریان الکتریکی باید یک شارش خالص بار از یک سطح مقطع معین داشته باشیم. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. الکترون‌های آزاد در طول این سیم با تندهایی از مرتبه  $10^6 \text{ m/s}$  در حرکت اند، ولی این حرکت به طور 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 ۶-۲) به طوری که می‌تواند لامپ مدار ۵-۲ 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**<sup>۱</sup> در خلاف جهت میدان به طور بسیار آهسته‌ای سوق پیدا می‌کنند که این موجب



شکل ۵-۵ (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.

<sup>۱</sup>drift velocity



شکل ۷-۶ در حضور اختلاف پتانسیل، شارش بار خالص از مقطع A سیم، دیگر برابر صفر نیست.

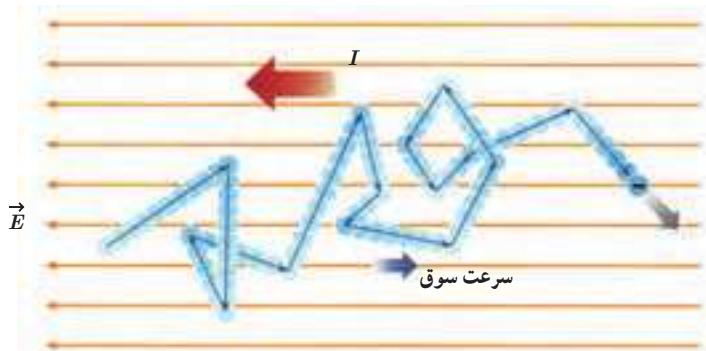


آندره ماری آمپر (۱۸۳۶-۱۷۷۵ م)

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 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 دالامپر و ژوزف لالاند که تحت تأثیر بونو 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 پلی‌تکنیک مشغول به کار شود. در سال ۱۸۰۹ به سمت استاد ریاضی و مکانیک این کالج برگزیده شد. در سال ۱۸۱۹ دانشمند دانمارکی، یوهان اُرستن کشف کرد که عقره مغناطیسی در اثر عبور جریان از یک سیم رساناً 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 رساناهای یکسان باشد یکدیگر را جذب می‌کنند و چنان که جهت جریان‌ها برعکس باشد هم‌دیگر را دفع می‌کنند. خلاصه‌ای از این تجربیات بعداً تحت عنوان کتابی به نام «مغناطیس و الکتریسیته» از آمپر به جا رسانید.

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

برقراری جریان الکتریکی در رسانا می‌شود (شکل ۷-۲). اندازه سرعت سوق در یک رسانای فلزی بسیار کم و مثلاً در سیم‌های سیمی از مرتبه بزرگی  $10^{-5} \text{ m/s}$  یا  $10^{-6} \text{ m/s}$  است. توجه کنید که جهت قراردادی جریان الکتریکی  $I$ ، برخلاف جهت سوق الکترون‌هاست.



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

## فعالیت ۱-۲

سرعت سوق الکترون‌های آزاد در یک رسانا می‌تواند به کندي سرعت حرکت یک حلقه باشد. اگر سرعت سوق الکترون‌ها این قدر کم است، پس چرا وقتی کلید برق را می‌زنیم چراغ‌های خانه به سرعت روشن می‌شوند؟ (رهنمایی: شیلنگ شفافی را در نظر بگیرید. وقتی شیلر را باز می‌کنید، هنگامی که شیلنگ بر از آب است، آب بالاصله 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 ( $\Delta q$ ) بر حسب کولن (C)، مدت زمان ( $\Delta t$ ) بر حسب ثانیه (s) و جریان ( $I$ ) بر حسب آمپر (A) است. برخی از مقادیر تقریبی جریان‌های متداول عبارت‌اند از ۱A برای لامپ حبابی  $200 \text{ mA}$ ،  $20 \text{ mA}$  برای استارت خودرو،  $1 \text{ mA}$  برای تأمین انرژی نمایشگر گوشی همراه،  $1 \text{nA}$  برای جریان نورون‌های مغزی،  $10 \text{ kA}$  در یک یورش آذرخش نوعی، و  $1 \text{ GA}$  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 شده است.  
۲- به خاطر سیردن این مقادیر ضرورتی ندارد.

**مثال ۱-۲**

ولتاژ باتری یک نوع ماشین حساب  $V = 3/2$  است. وقتی ماشین حساب روشن است، این باتری باعث عبور جریان  $I = 17\text{mA}$  در آن می‌شود. اگر این ماشین حساب یک ساعت روشن باشد:

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

**پاسخ:** (الف) باری که در یک ساعت از مدار می‌گذرد، با استفاده از رابطه  $q = I \Delta t$  برابر است با

$$\Delta q = I(\Delta t) = (0.017 \times 10^{-3} \text{ A})(3/6 \times 10^3 \text{ s}) = 0.061 \text{ C}$$

(ب) انرژی ای که باتری به مدار می‌دهد، بنابراین  $W = qV$  (جایی  $W$  = خارجی) چنین می‌شود:

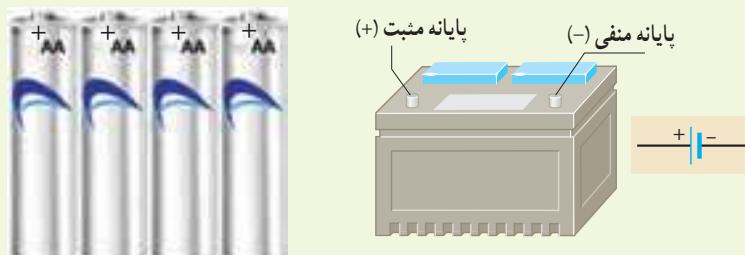
$$q \Delta V = q \Delta V = 0.061 \text{ C} (3/2 \text{ V}) = 0.0915 \text{ J}$$

**تمرین ۱-۲**

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

(الف) باتری استاندارد خودرویی، Ah = 5 است. اگر این باتری جریان متوسط  $A = 5/100$  را فراهم سازد، چقدر طول می‌کشد تا خالی شود؟

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

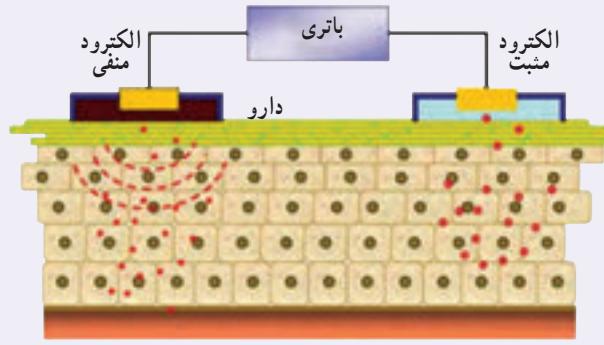
**خوب است بدانید: یون رانی**

برای درمان التهاب سه روش وجود دارد. روش نخست که بدون درد است، خوردن دارو است. در این روش مقدار کمی دارو، از مرتبه  $1 \mu\text{g}$ ، به بافت آسیب دیده می‌رسد. روش دوم تزریق آمپول است. این روش دردناک است، ولی می‌تواند داروی زیادی، از مرتبه  $10 \text{ mg}$  را به بافت آسیب دیده برساند، یعنی  $10000 \text{ }\mu\text{g}$  برابر بیش از روش خوردن دارو. اما از دهه ۹۰ میلادی روش سومی نیز مطرح شده است که بدون درد است، ولی می‌تواند مقدار دارویی از مرتبه  $100 \mu\text{g}$  را به بافت آسیب دیده برساند. این روش که موسوم به یون رانی است، دارو را با استفاده از جریان‌های الکتریکی بسیار ضعیف به بافت آسیب دیده می‌رساند. یک وسیله یون رانی 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 (معمولًاً دگزامتازان) 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 حداقل  $1/7\text{cm}$  می‌رساند (شکل الف). اگر پرستاری بخواهد مثلاً  $80\text{mA}$  دارو را با جریان متداول  $14\text{mA}$  به پای آسیب‌دیده برساند (شکل ب)، محاسبه نشان می‌دهد که این عمل ۱۵ دقیقه به طول خواهد انجامید.



(ب)



(الف)



جورج سیمون اهم (۱۸۵۴-۱۷۸۷)

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

## ۲-۲ مقاومت الكتریکی و قانون اهم

همان طور که در بخش قبل دیدیم وقتی در مداری الكتریکی 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 روبرو هستند. اصطلاحاً می‌گوییم رسانا دارای **مقاومت الكتریکی**<sup>۱</sup> است. از اینجا می‌توان پیش‌بینی کرد که مقاومت الكتریکی به ابعاد هندسی رسانا، یعنی طول و سطح مقطع رسانا بستگی دارد. همچنین جنس ماده رسانا و دمای آن بر مقاومت الكتریکی اثر می‌گذارد.

تحت یک اختلاف پتانسیل یکسان، دو سیم با مقاومت الكتریکی 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 الكتریکی بین دو نقطه‌ای یک رسانا را به صورت زیر تعریف کرد:

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

در این رابطه مقاومت الكتریکی ( $R$ ) بر حسب ولت بر آمپر ( $V/A$ ) می‌شود که به پاس خدمات علمی جُرج سیمون اهم به نام **اهم** نام‌گذاری شده است و با نماد  $\Omega$ <sup>۲</sup> نشان داده می‌شود. رسانایی را که دارای مقاومت الكتریکی است، اصطلاحاً **مقاومت**<sup>۳</sup> می‌نامند و آن را در مدارهای الكتریکی با نماد  $\sim\!\!\sim$  نمایش می‌دهند.

۱-Resistance

۲- از حروف الفبای یونانی که امکاً خوانده می‌شود.

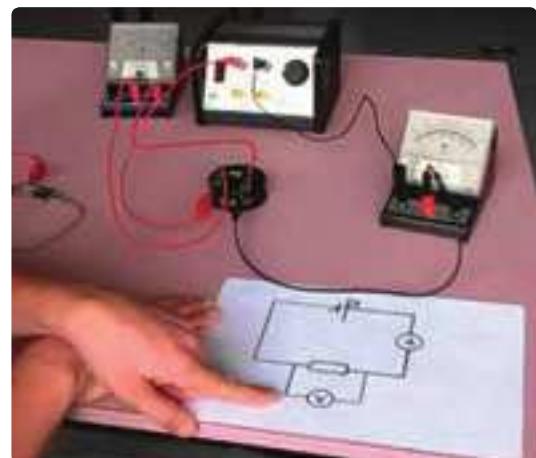
۳-Resistor

وسیله‌هایی 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 دهد 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 ۸-۲ 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 برقار کرد و آن را تغییر داد) می‌بنديم. 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)، مقادیر 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 ۱-۲ مقادیر اندازه گیری شده برای جریان و اختلاف پتانسیل یک مقاومت را نشان می‌دهد که از قانون اهم پیروی می‌کند. همان‌طور که نمودار شکل ۹-۲ نشان می‌دهد جریان با ولتاژ برای این وسیله به‌طور خطی افزایش می‌یابد.

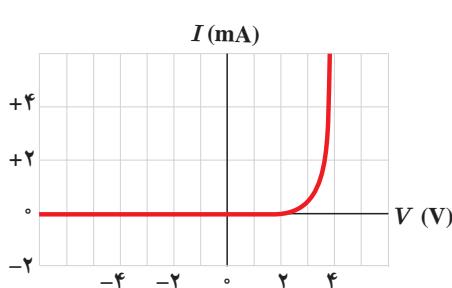
با این حال وسیله‌های زیادی نیز یافت می‌شود که از این قانون پیروی نمی‌کنند. یکی از این وسیله‌های غیر اهمی، دیود نورگسیل (LED) است که با آن بعداً آشنا می‌شویم. نمودار جریان بر حسب اختلاف پتانسیل چنین دیودی تقریباً شبیه شکل ۱۰-۲ است.



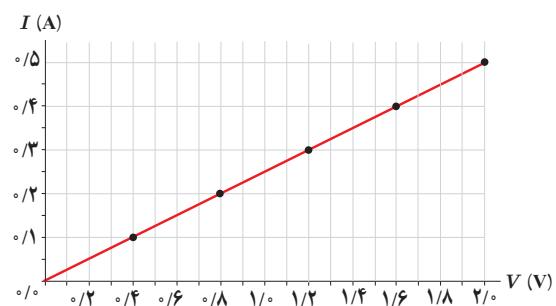
شکل ۸-۲ اسباب تحقیق قانون اهم. توجه کنید که آمپرسنج در مدار به صورت متواالی و ولتسنج به صورت موازی بسته شده است.

جدول ۱-۲ مقادیری نوعی برای یک رسانای اهمی

$R (\Omega)$ مقاومت	$I (A)$ جریان	$V (V)$
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 ۱۰-۱ نمودار جریان بر حسب اختلاف پتانسیل برای یک دیود نورگسیل



شکل ۱۰-۲ نمودار جریان بر حسب اختلاف پتانسیل نشان می‌دهد که برای این رسانای اهمی، جریان به‌طور مستقیم با ولتاژ افزایش می‌یابد.

## مثال ۲-۲

یک لامپ چراغ قوه کوچک از یک باتری  $1/5\text{V}$ ، جریانی برابر  $A/3^{\circ}$  می‌کشد. با فرض آنکه رشتہ لامپ، یک رسانای اهمی باشد، (الف) مقاومت آن چقدر است؟ (ب) اگر باتری ضعیف شود و ولتاژ به  $1/2\text{V}$  افت کند، جریان چقدر می‌شود؟

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

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1/5\text{V}}{A/3^{\circ}} = 5/\text{Ω}$$

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

چنین می‌شود:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1/2\text{V}}{5/\text{Ω}} = 0.24\text{A}$$

## ۳-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

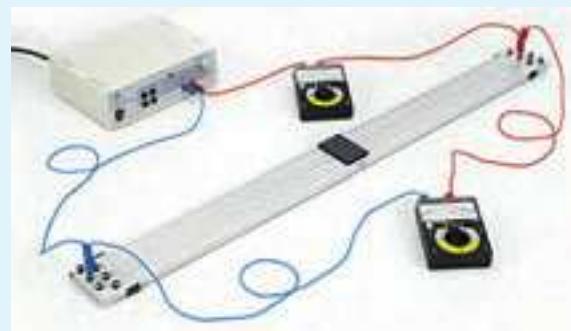
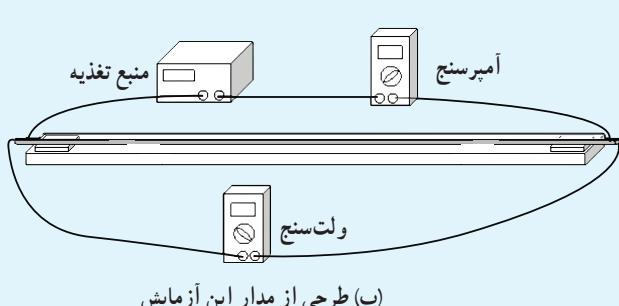
در بخش قبل پیش‌بینی کردیم که مقاومت الکتریکی به طول و سطح مقطع رسانا و نیز ترکیب و ساختار آن بستگی دارد. در اینجا می‌خواهیم با تدارک آزمایشی این پیش‌بینی خود را بیازماییم.

## فعالیت ۲-۲

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

- ۱- قطعه سیم‌هایی از جنس یکسان، مثلاً کنستانتان (یا نیکروم) با قطر برابر ولی طول‌های متفاوت را در مدار قرار دهید و با استفاده از تعریف مقاومت، مقاومت هر کدام از سیم‌های را با استفاده از عددی که آمپرسنج و ولتسنج نشان می‌دهند محاسبه و نتایج خود را در جدولی ثبت کنید. به نظر شما چه رابطه‌ای بین مقاومت سیم‌ها و طول آنها وجود دارد؟
- ۲- آزمایش را با سیم‌هایی از جنس یکسان با طول برابر، ولی قطرهای متفاوت انجام دهید و نتایج خود را در جدولی ثبت کنید. به نظر شما چه رابطه‌ای بین مقاومت سیم‌ها و سطح مقطع آنها وجود دارد؟

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



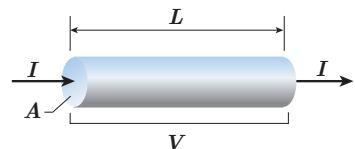
با انجام فعالیت بالا در می‌یابیم که مقاومت جسم در دمای ثابت به طول، مساحت مقطع، و جنس آن بستگی دارد. این آزمایش‌ها که با محاسبات نظری نیز تأیید شده‌اند نشان می‌دهد اگر سطح مقطع جسم در تمام طول آن یکسان باشد (شکل ۲-۱۱)، مقاومت آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

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

که در آن طول رسانا ( $L$ ) بحسب متر (m)، مساحت مقطع جسم ( $A$ ) بحسب متر مربع ( $m^2$ )، و مقاومت جسم ( $R$ ) بحسب  $\Omega$  است، و بنابراین، کمیت  $\rho$  که به آن **مقاومت ویژه** گفته می‌شود بحسب  $\Omega \cdot m$  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 برخورددهای 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 شبیه 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. رساناها الکتریکی خوب مقاومت ویژه بسیار کم و عایق‌های خوب مقاومت ویژه بسیار زیادی دارند. جدول ۲-۲ مقاومت ویژه برخی مواد را در دمای  $20^\circ C$  نشان می‌دهد. همان‌طور که این جدول نشان می‌دهد دسته‌ای از مواد مانند ژرمانیم و سیلیسیم نیز وجود دارند که مقاومت ویژه آنها بین مقاومت ویژه رساناها و نارساناهاست. به این دسته از مواد، **نیمرسانا** می‌گویند.

**تغییر مقاومت ویژه با دما :** اگر یک رسانای فلزی داشته باشیم، با افزایش دمای آن، تعداد حامل‌های بار (اینجا الکترون‌های آزاد) تقریباً ثابت می‌ماند، ولی ارتعاشات کاتورهای اتم‌ها و بون‌های آن افزایش می‌یابد. این عامل موجب افزایش برخورد حامل‌های بار با شبکه اتمی رسانای فلزی می‌شود (شکل ۲-۱۲) و به این ترتیب، مقاومت رسانا در برابر



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

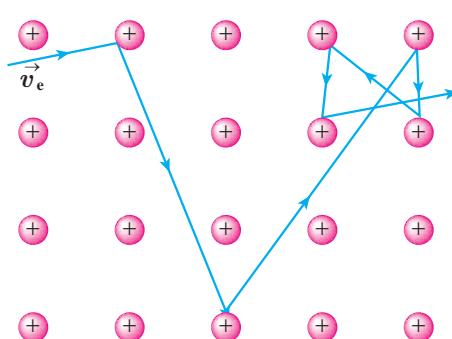
جدول ۲-۲ مقاومت ویژه در دمای  $20^\circ C$  و ضریب دمایی مقاومت ویژه از رساناها و نیمرساناها

رسانای فلزی	ماده	مقادیم مقاومت ویژه ( $\Omega \cdot m$ )	ضریب دمایی مقاومت ویژه ( $K^{-1}$ )
-------------	------	---	-------------------------------------

نقره	$1/6 \times 10^{-8}$	$4/1 \times 10^{-3}$
مس	$1/7 \times 10^{-8}$	$4/3 \times 10^{-3}$
طلاء	$2/4 \times 10^{-8}$	$3/4 \times 10^{-3}$
آلومینیم	$2/8 \times 10^{-8}$	$4/4 \times 10^{-3}$
تنگستن	$5/5 \times 10^{-8}$	$4/5 \times 10^{-3}$
آهن	$9/7 \times 10^{-8}$	$6/5 \times 10^{-3}$
پلاتین	$10 \times 10^{-8}$	$2/9 \times 10^{-3}$
سرپ	$22 \times 10^{-8}$	$4/3 \times 10^{-3}$
کُستانتنان <sup>۱</sup>	$44 \times 10^{-8}$	$2/0 \times 10^{-6}$
نیکروم <sup>۲</sup>	$100 \times 10^{-8}$	$4/0 \times 10^{-3}$

نیمرسانا		
گرافیت	$3/5 \times 10^{-5}$	$-5 \times 10^{-4}$
ژرمانیم	$0/46$	$-5 \times 10^{-2}$
سیلیسیم خالص	$2/5 \times 10^{-3}$	$-7 \times 10^{-2}$

عایق		
انواع شیشه	$10^{10} - 10^{14}$	$10^{-4}$
لاستیک سخت	$10^{13}$	$-5 \times 10^{-2}$
کوارتز (ذوب شده)	$10^{16}$	$-7 \times 10^{-2}$



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

۱- درصد مس،  $40^\circ C$  درصد نیکل

۲- درصد مس،  $23^\circ C$  درصد نیکل،  $16^\circ C$  درصد کرم و ...

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

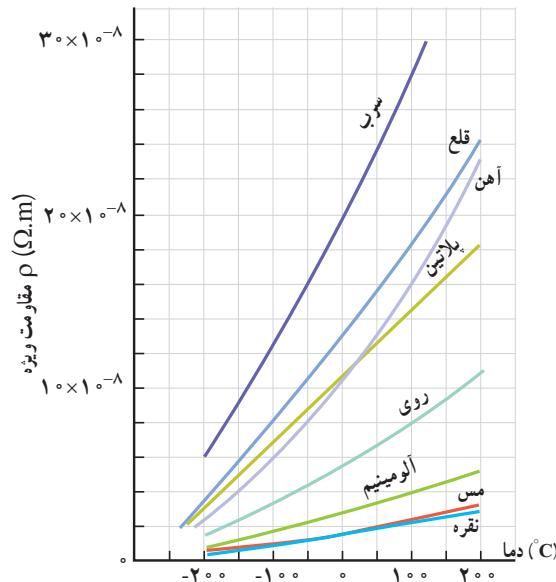


$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (14-2)$$

شکل ۱۴-۲ عبور جریان از رشته (فیلامن) تنگستنی موجب درخشش لامپ حبابی شده است.

که در آن  $T$  دمای مرجع و  $\rho_0$  مقاومت ویژه در آن دماس است (معمولاً  $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293\text{K}$  می‌گیرند) و  $\alpha$  ثابتی موسوم به ضریب دمایی مقاومت ویژه و  $T$  دمای رسانا (برحسب  $^\circ\text{C}$ ) است. یکای  $\alpha$  در این رابطه  $\text{K}^{-1}$  (یا  $^\circ\text{C}^{-1}$ ) است.

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



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

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

**مثال ۲-۲**

$A = ۳/۱ \times ۱۰^{-۶} \text{ m}^۲$       غلاف فلزی  
  
 یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

شکل رو به رو، المنت یک اجاق برقی را نشان می‌دهد. این المنت شامل سیمی به طول  $۱/۱ \text{ m}$  و سطح مقطع  $۳/۱ \times ۱۰^{-۶} \text{ m}^۲$  است که داخل ماده عایقی قرار گرفته است که خود، درون یک غلاف فلزی است. با عبور جریان، المنت داغ می‌شود. مقاومت ویژه ماده سازنده سیم در دمای  $T_0 = ۳۲^\circ \text{ C}$  برابر با  $\rho_0 = ۶/۸ \times ۱۰^{-۵} \Omega \cdot \text{m}$  است و ضریب دمایی مقاومت ویژه آن  $\alpha = ۲/۰ \times ۱۰^{-۳} \text{ K}^{-۱}$  است. مقاومت سیم در دمای  $۴۲^\circ \text{ C}$  چقدر است؟

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

$$\begin{aligned} R &= \rho [1 + \alpha(T - T_0)] = (6/8 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}) [1 + (2/0 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1})(42^\circ \text{ K})] \\ &= ۸/۲ \times ۱۰^{-۵} \Omega \cdot \text{m} \end{aligned}$$

حال از رابطه ۲-۲ مقاومت سیم در دمای  $۴۲^\circ \text{ C}$  برابر است با

$$R = \rho \frac{L}{A} = (8/2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}) \frac{(1/1 \text{ m})}{(3/1 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} = ۲۹ \Omega$$

**مثال ۲-۳: دماسنجد مقاومت پلاتینی**

همان‌طور که در کتاب فیزیک ۱ دیدید دماسنجد مقاومت پلاتینی یکی از سه دماسنجد معیار برای اندازه‌گیری دماس است. از دماسنجد مقاومت پلاتینی می‌توان برای اندازه‌گیری دقیق دما در گستره دمایی حدوداً از  $۱۴ \text{ K}$  تا  $۱۲۳۵ \text{ K}$  استفاده کرد. اساس کار دماسنجد های مقاومت پلاتینی مبتنی بر تغییر مقاومت الکتریکی بادماس است. در این دماسنجد ها از پلاتین استفاده می‌کنند که تقریباً دچار خوردگی نمی‌شود و نقطه ذوب بالایی دارد.

فرض کنید در دمای  $۲۰^\circ \text{ C}$  مقاومت پلاتین یک دماسنجد برابر با  $۱۶۴ \Omega$  باشد.

وقتی این دماسنجد در محلول خاصی قرار گیرد، مقاومت آن  $۱۸۷ \Omega$  می‌شود. دمای این محلول چقدر است؟ (مقدار دقیق  $\alpha$  برای پلاتین برابر  $۳/۹۲ \times ۱۰^{-۳} \text{ C}^{-1}$  است).

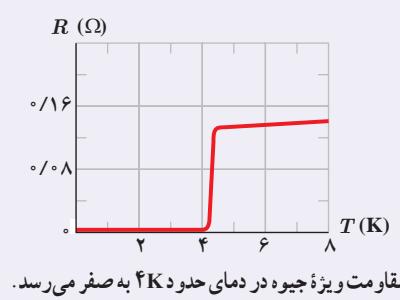
**پاسخ:** چون مقاومت  $R$  رابطه مستقیمی با مقاومت ویژه  $\rho$  دارد ( $R = \rho L / A$ )، آن‌گاه از رابطه ۲-۴ نتیجه می‌گیریم :

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

که در آن  $R_0 = \rho_0 \frac{L}{A}$  مقاومت سیم در دمای  $T_0 = ۲۰^\circ \text{ C}$  است. با جایگذاری مقادیر معلوم در معادله بالا خواهیم داشت :

$$187 \Omega = (164 \Omega) [1 + (3/92 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1})(T - 20^\circ \text{ C})] \Rightarrow T = ۵۵/۸^\circ \text{ C}$$

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

خوب است بدانید: آبرو سازایی<sup>۱</sup>

عنصر	دمای بحرانی (K)
تنگستن	۰/۰۱۵۴
بریلیم	۰/۰۲۶
تیتانیم	۰/۳۹
کادمیم	۰/۵۲
اُسمیم	۰/۶۵۵
مولبیدن	۰/۹۱۶
گالیم	۱/۰۸۳۳
آلومینیم	۱/۱۷۵
پروتاکنیم	۱/۴
ایندیم	۲/۴۰۵
قلع	۲/۷۲۱
جیوه	۴/۱۵۴
تانتال	۴/۴۷
سرب	۷/۲۳
نیوبیم	۹/۲۵

در اوایل قرن بیستم میلادی پدیده شکفت انگیزی برای برخی از فلزات در دمای خیلی پایین مشاهده شد و دریافتند با کاهش دما، مقاومت ویژه این فلزات در دمای خاصی موسوم به دمای بحرانی<sup>۲</sup>، ناگهان به صفر افت می‌کند و از آن دما پایین‌تر همچنان صفر باقی می‌ماند. به این پدیده ابررسانایی می‌گویند. فیزیکدان هلندی کامرلینگ/ووتر<sup>۳</sup> در سال ۱۹۱۱ برای نخستین بار، این پدیده را برای جیوه مشاهده کرد و دریافت که در دمای حدود ۴K مقاومت ویژه جیوه به طور ناگهانی صفر می‌شود (شکل را ببینید). دمای بحرانی برای فلزات ابررسانای مختلف، متفاوت است، ولی برای اغلب آنها نزدیک به صفر کلوین است. مثلاً همان‌طور که جدول رویه رو نشان می‌دهد این دما برای آلومینیم ۱/۱۷۵K و برای قلع ۲/۷۲۱K است. البته در سال ۱۹۸۶ میلادی در یک نمونهٔ غیر فلزی سرامیک که از باریم، لاتانیم، مس و اکسیژن ساخته شده بود این پدیده در دمای ۲۵K مشاهده شد. در اوایل ۱۹۸۷ میلادی فیزیکدان‌ها سرامیک دیگری با دمای بحرانی ۹۸K و در سال ۱۹۸۸ میلادی سرامیکی با دمای بحرانی ۱۲۵K ساختند.

برای اینکه به درکی از پدیده ابررسانایی برسید شارش یک مایع معمولی با چسبندگی ناچیز را در یک لوله تصور کنید. اگر از چنین مایعی استفاده کنید، دیگر نیاز نیست برای تداوم شارش مایع از یک منبع نیروی حرکت شاره استفاده کنید؛ زیرا اگر اصطکاکی نباشد برای ادامه حرکت یکنواخت نیاز به هیچ نیروی خارجی‌ای نخواهد بود. مثلاً اگر این شاره را در لوله دایره‌ای با تکانی سریع به حرکت اندازیم، شاره با وجود اینکه فشار در تمام نقاط لوله یکسان است، به مدت نامحدودی در لوله جریان خواهد داشت. جالب است که چنین شاره‌ای را به دست آورده‌اند. کاپیتر<sup>۴</sup> فیزیکدان روسی در سال ۱۹۳۷ میلادی مشاهده کرد که هلیم مایع اگر تا زیر ۲/۱۲K سرد شده باشد، چسبندگی بسیار ناچیزی خواهد داشت و در قیاس با ابررساناهای این هلیم ابرشاره گفته می‌شود. پس شارش مایع بدون چسبندگی، مانند جریان الکتریکی در ابررساناهاست. به همین ترتیب اگر در یک حلقه ابررسانا جریان الکتریکی ایجاد کنیم، پس از حذف نیروی حرکت الکتریکی جریان متوقف نخواهد شد و برای مدتی طولانی ادامه خواهد یافت. فیزیکدانی به نام کالنیز<sup>۵</sup> در سال ۱۹۵۶ میلادی توانست

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

<sup>۱</sup>\_Super-Conductivity<sup>۲</sup>\_P. L. Kapitza<sup>۳</sup>\_Critical Temperature<sup>۴</sup>\_T. Collins<sup>۵</sup>\_Kamerlingh Onnes

## خوب است بدانید: نمره‌بندی سیم‌ها

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

در صنعت تولید سیم، سیم‌ها را با ضخامت‌های معیتی می‌سازند و معلوم می‌کنند هر سیم چه جربان بیشینه‌ای را می‌تواند تحمل کند. بدینهی است هر چه ضخامت سیم بزرگ‌تر باشد، جربان بیشتری را می‌تواند تحمل کند. به هر سیم با ضخامت معین گُدد (نمره) مشخصی را اختصاص می‌دهند. جدول رو به رو، برخی از این نمره‌بندی‌ها با جربان مجاز بیشینه چند سیم را براساس استاندارد بین‌المللی SWG<sup>۱</sup> و استاندارد آمریکایی AWG<sup>۲</sup> نشان می‌دهد.

### مثال ۲

سیم‌کشی خانه‌ها معمولاً با سیم‌های مسی نمره ۱۴ براساس استاندارد SWG صورت می‌گیرد که قطری برابر با ۲/۰ ۳۲ mm دارد. مقاومت ۱۰۰ m از این سیم‌ها در دمای اتاق چقدر است؟

**پاسخ:** مساحت مقطع این سیم برابر است با

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

از طرفی مقاومت ویژه سیم مسی در دمای C<sup>۰</sup> با استفاده از جدول ۲-۲، برابر  $1/69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  و طول سیم مسی ۱۰۰ m است. بنابراین، با استفاده از رابطه  $R = \rho L/A$  برای مقاومت سیم مسی خواهیم داشت :

$$R = \rho \frac{L}{A} = (1/69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \frac{(100 \text{m})}{(3/24 \times 10^{-6} \text{m}^2)} = 0/522 \Omega$$

انواع مقاومت‌ها و کدگذاری رنگی مقاومت‌های کربنی : در بسیاری از مدارها به خصوص در وسایل الکترونیکی مقاومت‌ها برای کنترل جربان و ولتاژ استفاده می‌شود. انواع اصلی مقاومت‌ها بر دو نوع اند.

#### ۱- مقاومت‌های پیچه‌ای<sup>۳</sup> شامل پیچه‌ای از یک سیم نازک اند که معمولاً جنس آنها از آلیاژهای مانند

۱- Standard Wire Gauge

۲- American Wire Gauge

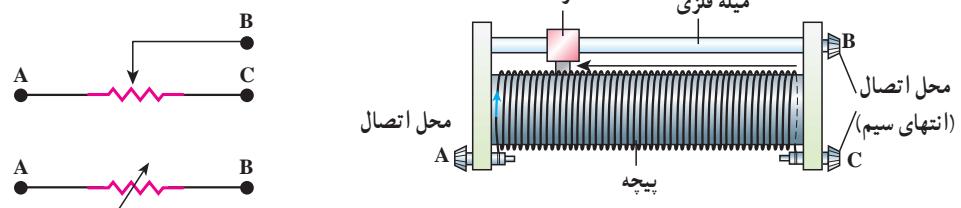
۳- wire به این مقاومت‌ها در صنعت مقاومت آجری نیز می‌گویند.



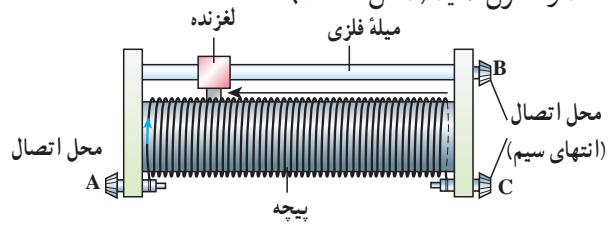
شکل ۱۵-۲

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

یکی از انواع مشهور مقاومت‌های پیچه‌ای، **رئوستا**<sup>۳</sup> نام دارد که یک نوع مقاومت متغیر است. در مدارهای الکترونیکی وسیله‌ای به نام **پتانسیومتر**<sup>۴</sup> به نوعی همان نقش را انجام می‌دهد. این نوع مقاومت‌ها، متغیرند. یک رئوستا از سیمی با مقاومت ویژه نسبتاً زیاد ساخته شده است. در یکی از انواع رئوستا (رئوستای خطی)، این سیم روی استوانه‌ای نارسانا پیچیده شده و با استفاده از دکمه‌ای لغزنده که روی ریلی در بالای استوانه قرار دارد و انتهای آن با سیم در تماس است می‌تواند قسمت دلخواهی از سیم را در مسیر جریان قرار دهد، و بنابراین مقدار مقاومت را تغییر داده و جریان را در مدار کنترل نماید (شکل ۱۶-۲).

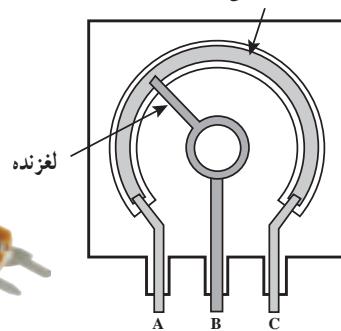


ب) نماد یک رئوستا یا پتانسیومتر  
در مدار الکتریکی



الف) طرحی از ساختار یک رئوستای خطی

ماده مقاومتی



ث) طرحی از یک پتانسیومتر  
پتانسیومتر



پ) تصویر واقعی یک رئوستای خطی

شکل ۱۶-۲

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

جدول ۳-۲- کدرنگی مقاومت‌ها			
رنگ	عدد	ضریب	تلرانس
سیاه	۰	۱	
قهوه‌ای	۱	۱۰۱	
قرمز	۲	۱۰۲	
نارنجی	۳	۱۰۳	
زرد	۴	۱۰۴	
سبز	۵	۱۰۵	
آبی	۶	۱۰۶	
بنفش	۷	۱۰۷	
حکستری	۸	۱۰۸	
سفید	۹	۱۰۹	
طلایی		۱۰-۱	%۵
نقره‌ای		۱۰-۰	%۱۰
بی‌رنگ			%۲۰

۱-Nichrome (آلیاژ نیکل و منگنز)

۲-Rheostat (آلیاژ مس، نیکل و منگنز)

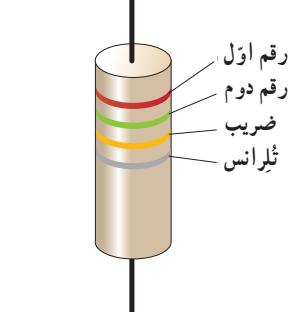
۳-Potentiometer. پتانسیومتر می‌تواند نقش پتانسیل‌سنجی نیز در مدارها داشته باشد که در آن صورت به آن پتانسیل‌سنج گفته می‌شود. این موضوع خارج از موضوع درسی این کتاب است.

۴-composition resistors

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 ضربی است به صورت  $10^n$  که در ستون سوم جدول مشخص شده است. حلقه چهارم یک حلقه طلایی یا نقره‌ای رنگ است که ترانس<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت را بر حسب درصد مشخص می‌کند (شکل ۱۸-۲). نبود نوار چهارم به معنای آن است که ترانس ۰ درصد است. برای خواندن حلقه‌های رنگی، مقاومت را طوری به دست می‌گیریم که حلقه ترانس در سمت راست قرار گیرد و بقیه حلقه‌ها را از سمت چپ به راست می‌خوانیم.



شکل ۱۷-۲ تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی



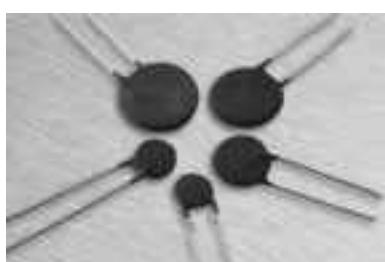
شکل ۱۸-۲ مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل ۲۵kΩ با ترانس ۰ درصد است.

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

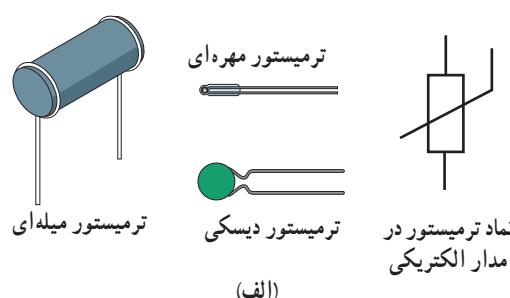
۱۰

#### مقاومت‌های خاص و دیویدها :

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 دمایپاها و نیز در دماسنجه استفاده می‌شود. ترمیستورها در ابعاد کوچکی ساخته می‌شوند و شکل‌های مختلفی دارند که رایج‌ترین آنها دیسکی، مهره‌ای، و میله‌ای است (شکل ۱۹-۲).



(ب)



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

<sup>۱</sup>-tolerance

<sup>۲</sup>-Thermal Sensitive Resistor، برگفته از عبارت Thermistor به معنای مقاومت حساس به دما.

## ۲-۲ فعالیت

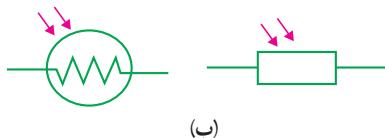
ترمیسورةها به دو نوع PTC و NTC تقسیم‌بندی می‌شوند. در مورد ساختار و کارکرد آنها تحقیق کرده و به کلاس گزارش دهید.

**۲- مقاومت‌های نوری<sup>۱</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، بر تعداد حامل‌های بار الکتریکی آنها افزوده شده و در نتیجه از مقاومت آنها کاسته می‌شود. مثلاً **شکل ۲-۲** مقاومت الکتریکی چنین LDRهایی را بر حسب روشنایی<sup>۲</sup> (که با یکای LUX سنجیده می‌شود) نشان می‌دهد. **شکل ۲-۳** الف تصویری از چند LDR و **شکل ۲-۴** ب دو نماد این مقاومت‌ها در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد.

برای اینکه به درکی از ساز و کار این مقاومت‌ها برسید، **شکل ۲-۵** 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 ترتیبی که LDR در معرض نور بیشتری قرار گیرد، شدت نور لامپ LED بیشتر می‌شود. از این ویژگی LDR‌ها در تجهیزات گوناگونی از جمله چشم‌های الکترونیکی، دزدگیرها، کنترل کننده‌های خودکار، و چراغ‌های روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شود.

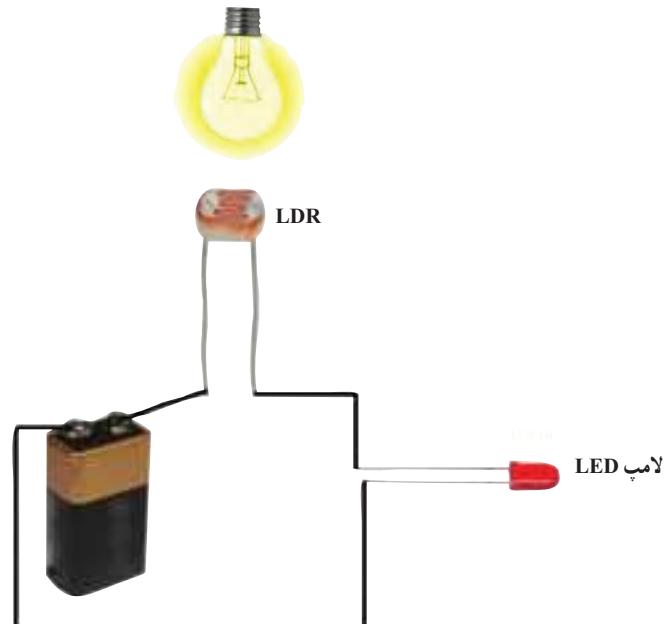


(الف)



شکل ۲-۴ الف) تصویری از چند LDR

ب) نماد LDR در دو استاندارد متفاوت



شکل ۲-۵ یک مدار ساده متشکل از یک LDR، یک باتری، و یک لامپ LED. با روشن شدن چراغ روشنایی لامپ LED روشن می‌شود.

## فناوری و کاربرد



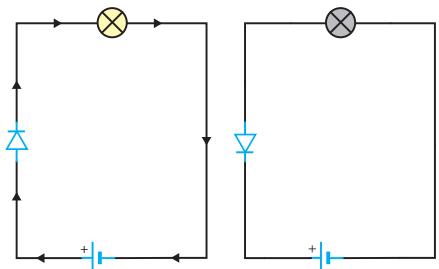
**شکل ۲۳-۲** اجزای داخلی یک مدار کنترل کننده

نوری، که در نوعی از چراغ‌های روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شود.

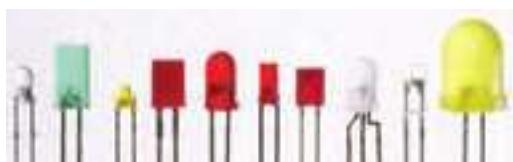
در یک نوع از چراغ‌های روشنایی، اساس کار به این ترتیب است که با تابش نور به LDR و ایجاد جریان در آن، یک گرم کن الکتریکی فعال شده و با استفاده از یک دمایا، اتصال لامپ‌های روشنایی به منبع اصلی جریان را قطع می‌کند. در شب که نوری به LDR برخورد نمی‌کند، گرم کن خاموش می‌ماند و بدین ترتیب، اتصال لامپ‌های روشنایی قطع نمی‌شود و لامپ‌ها روشن می‌مانند (شکل ۲۳-۲).

**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 در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهند. پیکان در این نماد جهتی را نشان می‌دهد که جریان می‌تواند از دیود عبور کند. مثلاً مدارهای ساده شکل ۲۴-۲ 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 که در فصل ۴ با آن آشنا می‌شویم.

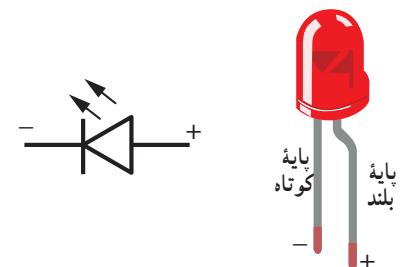
دیودها انواع متفاوتی دارند که یکی از معروف‌ترین آنها دیودهای نورگسیل یا LED<sup>۲</sup> است (شکل ۲۵-۲). شکل ۲۶-۲ تصویری واضح از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد. در این دیودها از نیمرساناهایی استفاده می‌شود که با عبور جریان از آنها LED از خود نورگسیل می‌کند و بنابراین، مقداری از انرژی الکتریکی به نور تبدیل می‌شود. بسته به نوع نیمرسانایی به کاررفته، رنگ نورگسیل شده از LED می‌تواند از فروسرخ تا فرابنفش باشد. نخستین LED‌های ساخته شده، قرمز و زرد بودند. فناوری LED در دهه ۹۰ میلادی با تولید LED‌هایی که قابلیت تولید نور آبی و سفید داشتند، دستخوش تحول بزرگی شد. در مقایسه با لامپ‌های روشنایی معمولی، توان الکتریکی کمی مصرف کرده و در عوض، نور قابل ملاحظه‌ای تولید می‌کند. به همین دلیل از آنها در چراغ خودروها، روشنایی منازل، تابلوهای تبلیغاتی، نمایشگرهای LED و ... استفاده می‌شود. LED‌ها در مقایسه با لامپ‌های رشته‌ای عمر طولانی‌تری دارند و به دلیل نداشتن رشته به هنگام تولید نور انرژی گرمایی زیادی تولید نمی‌کنند.



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

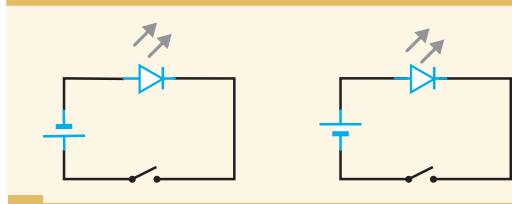


**شکل ۲۵-۲** تصویری از چند دیود نورگسیل



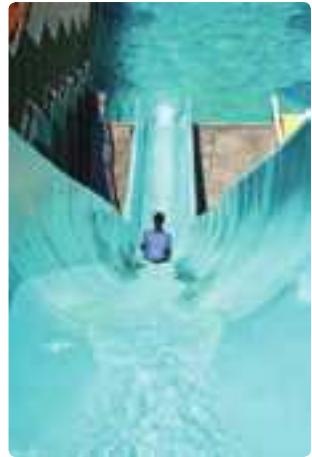
**شکل ۲۶-۲** تصویری از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی

## پوشن ۲-۱



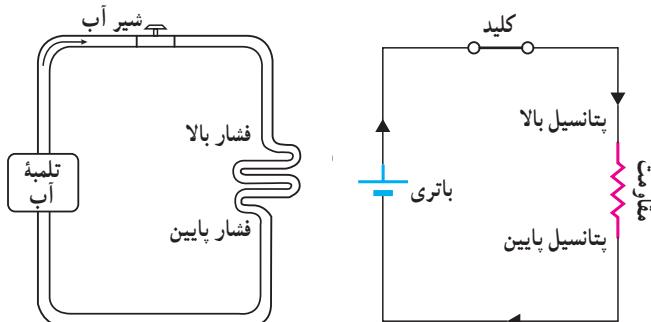
در کدام شکل با بستن کلید، LED روشن می‌شود؟

## ۴-۲ نیروی حرکه الکتریکی و مدارها

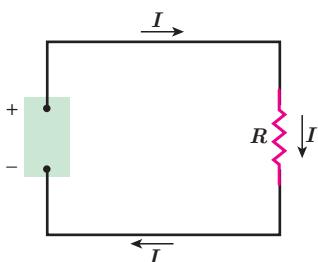


برای بالا بردن آب از سطح زمین به یک تلمبه آب نیاز است تا آب را به ارتفاع معینی برساند. بدین ترتیب، آب انژی پتانسیل گرانشی لازم برای جریان یافتن و انجام کار معینی را کسب می‌کند (شکل ۲۷-۲). برای اینکه بارهای الکتریکی را نیز از یک مقاومت الکتریکی عبور دهیم تا جریان ثابتی برقرار شود، لازم است بین دو سر مقاومت اختلاف پتانسیلی برقرار کنیم. این کار می‌تواند توسط وسیله‌هایی مانند باتری انجام شود. به چنین وسیله‌هایی که با انجام کار روی بار الکتریکی، جریان ثابتی از بارهای الکتریکی در یک مدار ایجاد می‌کند، منبع نیروی حرکه الکتریکی گفته می‌شود. منبع‌های نیروی حرکه الکتریکی (مانند باتری‌ها) بارهای الکتریکی مثبت را در خلاف جهت میدان الکتریکی از پتانسیل پایین‌تر به پتانسیل بالاتر می‌برند و با افزایش انژی پتانسیل آنها، جریان ثابتی را در مدار برقرار می‌کنند (شکل ۲۸-۲).

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



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



**شکل ۲۹** یک مدار ساده الکتریکی شامل مقاومت  $R$ . منبع نیروی حرکه الکتریکی  $E$  و سیم‌های رابط

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

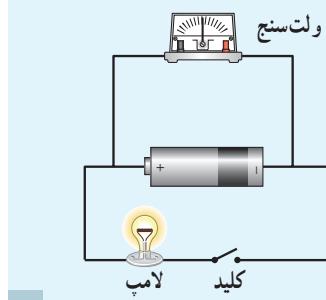
مدار ساده الکتریکی شکل ۲-۲ را در نظر بگیرید. منبع نیروی حرکه هنگام عبور بار  $q$  از منبع کاری به اندازه  $\Delta W$  روی آن انجام می‌دهد تا آن را در مدار به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی حرکه الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا آن را از پایانه با پتانسیل کمتر به پایانه با

پتانسیل بیشتر بیرد، اصطلاحاً نیروی محرکه الکتریکی ( $\text{emf}$ ) نامیده و با رابطه زیر تعریف می‌شود<sup>۱</sup> :

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta W}{\Delta q} \quad (5-2)$$

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.

#### فعالیت ۴



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

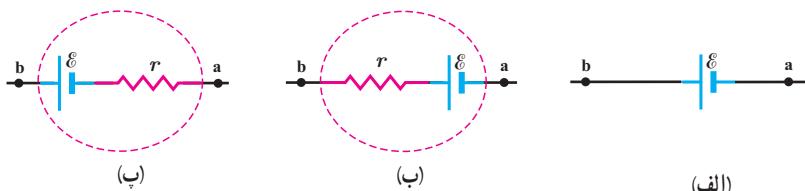
منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی، یا آرمانی هستند و یا واقعی. اگر پایانه‌های منفی و مثبت یک منبع نیروی محرکه را به ترتیب با a و b نمایش دهیم، اختلاف پتانسیل میان این دو پایانه برای یک منبع آرمانی برابر با نیروی محرکه الکتریکی  $\mathcal{E}$  آن است :

$$V_b - V_a = \mathcal{E} \quad (6-2)$$

#### فعالیت ۵

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

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



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

#### ۱-Electromotive Force

- 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 بونانی می‌باشد.

## خوب است بدانید: ماهی الکتریکی



ماهی های عظیم الجثة الکتریکی مانند تورپدو در اقیانوس اطلس شمالی و ماهی الکتروفوروس در آمازون می توانند جربانی کافی برای کشتن یا بی حس کردن طعمه، یا حتی بی حس کردن یک انسان تولید کنند. مثلاً ماهی تورپدو این کار را با یک تپ (پالس) ۵۰ آمپر و حدوداً ۶۰ ولت انجام می دهد. در زمان های دور، گاهی از ماهی های الکتریکی برای مقاصد درمانی استفاده می شد که این نخستین نوع شوک درمانی بود. ولتاژ این شوک ناشی از سلول های زیستی پولکی شکلی موسوم به الکتروپلاک است که در واقع مانند یک باتری عمل می کنند. شکل، تصویر ماهی الکتریکی تورپدو را نشان می دهد. در زیر بالجهه های این ماهی، انبوهی از الکتروپلاک ها کنار هم قرار گرفته اند.

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

اثر جریان های الکتریکی بر بدن	
اثر	جریان
جریان حس نمی شود.	کمتر از ۱A / ۰۰۰۰۱A
احساس سوزش یا گرما	۰/۰۰۰۱A
انقباض غیرعادی عضله ها، احساس درد	۰/۰۱A تا ۰/۰۰۰۱A
از دست رفتن کنترل عضله ها	۰/۰۱۵A
اگر از قلب بگذرد، سبب اختلال جدی می شود.	۰/۰۷A
برش عضله بطنی قلب	۰/۱۰A تا ۰/۰۵A
ایست قلی، اگر جریان سریع قطع شود، قلب مجدداً به کار می افتد.	۰/۵A تا چند آمپر
ایست قلی، قطع تنفس، سوختگی.	بیشتر از چند آمپر

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

دستگاه مرکزی اعصاب انسان در مقابل شوک های الکتریکی بسیار آسیب پذیر است. اگر جربانی که در یک شوک الکتریکی از مغز می گذرد بزرگ باشد، ممکن است به بیهوشی کامل بینجامد و حتی در برخی موارد، موجب فراموشی شود. به طوری که بیمار زمان های قبل از وقوع حادثه را نیز به یاد نمی آورد. معمولاً مرگ در اثر شوک الکتریکی به سبب ایست قلبي یا تنفسی روی می دهد. جدول بالا اثر برخی از جریان های الکتریکی بر بدن را نشان می دهد.

مدار تک حلقه‌ای و افت پتانسیل در مقاومت : مدار ساده تک حلقه‌ای شکل ۲-۳۱ را در نظر بگیرید. این مدار شامل باتری آرمانی B با نیروی محرکه  $\mathcal{E}$ ، مقاومت  $R$ ، و دو سیم رابط است. فرض کنید می خواهیم از نقطه دلخواهی شروع کنیم و مدار را به طور ذهنی در یک جهت دور بزنیم و هرجا با اختلاف پتانسیل ها مواجه شدیم، آنها را به طور جبری جمع کنیم. اگر از نقطه a مثلاً به طور ساعتگرد شروع کنیم، نخست با باتری B مواجه می شویم. همان طور که دیدیم با حرکت از پایانه منفی باتری به سمت پایانه مثبت آن پتانسیل الکتریکی به اندازه  $\mathcal{E}$  افزایش می یابد. وقتی در طول سیم بالایی حرکت می کنیم، هیچ تغییر پتانسیل وجود ندارد؛ زیرا در بستن مدارها فرض کرده ایم از سیم‌های رابط با مقاومت ناچیز استفاده شده است. وقتی از مقاومت می گذریم پتانسیل طبق رابطه  $\Delta V = IR$  تغییر می کند، ولی توجه کنید پتانسیل باید کاهش بابد؛ زیرا ما از طرف پتانسیل بالاتر به سمت پتانسیل پایین تر حرکت کرده ایم (شکل ۲-۳۲). بنابراین، در شکل ما تغییر پتانسیل هنگام عبور از مقاومت برابر با  $-IR$  است؛ یعنی اصطلاحاً در مقاومت افت پتانسیلی رخ می دهد. اگر با حرکت در طول سیم پایین به نقطه a باز گردیم چون مقاومت این سیم نیز ناچیز فرض شده است باز تغییر پتانسیل نخواهیم داشت. با بازگشت به نقطه a، پتانسیل دوباره برابر با پتانسیل نقطه a می شود؛ یعنی می توان نوشت :

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

و با حذف  $V_a$  از دو طرف معادله بالا به رابطه زیر می رسیم :

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

این رابطه نشان می دهد که جمع جبری اختلاف پتانسیل ها در مدار ما برابر با صفر است. توجه کنید که اگر حلقه را در خلاف جهت نشان داده شده در شکل دور می زدیم به رابطه  $\mathcal{E} + IR = 0$  رسیدیم که همان رابطه بالاست. در حالت کلی جمع جبری اختلاف پتانسیل ها در هر حلقه صفر است. به این قاعده، **قاعده حلقه** می گویند. قاعده حلقه یا قانون ولتاژها بیان می دارد : در هر دور زدن کامل حلقه‌ای از مدار، جمع جبری اختلاف پتانسیل های اجزای مدار صفر است.

نشان داده می شود که قاعده حلقه چیزی جز پایستگی انرژی نیست (تمرین ۲-۴ را بینید).

اکنون اگر باتری آرمانی مدار شکل ۲-۳۱ را با یک باتری واقعی که مقاومت داخلی  $r$  دارد

جایگزین کیم (شکل ۲-۳۳)، با به کار بستن قاعده حلقه به رابطه زیر می رسیم :

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

همچنین می توانیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری را نیز به دست آوریم. اگر از نقطه a در جهت جریان

به سمت نقطه b حرکت کنیم، می توانیم با در نظر گرفتن اختلاف پتانسیل ها رابطه زیر را بنویسیم :

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

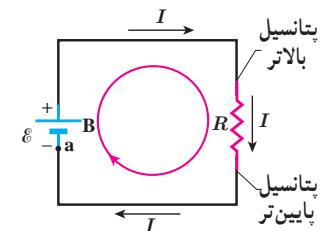
و یا

$$V_b - V_a = \mathcal{E} - Ir \quad (7-2)$$

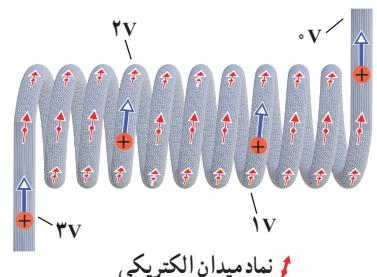
در حل مسئله های مدار تک حلقه‌ای همواره دو دستور العمل ساده زیر را به کار می بندیم :

۱- هرگاه در مدار در جهت جریان از مقاومت مثلاً  $R$  بگذریم، پتانسیل به اندازه  $IR$  کاهش می یابد و

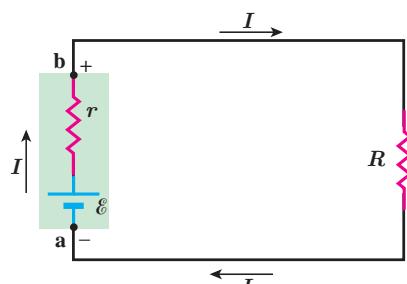
اگر در خلاف جهت جریان حرکت کنیم پتانسیل به همان اندازه افزایش می یابد.



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



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



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



گوستاو کیرشهوف (۱۸۲۴–۱۸۸۷)

گوستاو رابرت کیرشهوف<sup>۱</sup> در غرب آلمان کنونی به دنیا آمد. کیرشهوف سهمی اساسی در درک مدارهای الکتریکی، طیف‌نگاری، ترمودینامیک و تابش اجسام گرم داشته است. درواقع او نخستین کسی بود که واژه جسم سیاه را در سال ۱۸۶۲ به کار برد و دو قانون مهم در نظریه مدارهای الکتریکی (قاعده‌های حلقه و انشعاب) و ترمودینامیک به افتخار او نام‌گذاری شده است. کیرشهوف قانون مدارهای الکتریکی خود را در سال ۱۸۴۵ درحالی‌ی ریزی کرد که دانشجوی دانشگاه آلبانیوس بود. او قانون تابش گرمایی خود را در سال ۱۸۵۹ پیشنهاد داد و آن را در سال ۱۸۶۱ اثبات کرد. او سپس عازم دانشگاه هایلبرگ شد و در آنجا کارهای بدیعی در طیف‌نگاری به انجام رسانید. کیرشهوف سرانجام در سال ۱۸۸۷ میلادی در سن ۶۳ سالگی در برلین دریده از جهان فرو بست.

۲- هرگاه از پایانه منفی به طرف پایانه مثبت یک منبع نیروی محركه حرکت کنیم، پتانسیل به اندازه<sup>۶</sup> افزایش می‌یابد و اگر در خلاف این جهت (یعنی از پایانه مثبت به طرف پایانه منفی) حرکت کنیم پتانسیل به اندازه<sup>۶</sup> کاهش می‌یابد. در جدول ۲-۴ این دستورالعمل‌ها خلاصه شده‌اند.

جدول ۲-۴ جدول قرارداد تعیین علامت اختلاف پتانسیل‌ها در یک مدار

تک حلقه‌ای، شامل مقاومت و منبع نیروی محركه الکتریکی

عنصر مدار	جهت حرکت	تغییر پتانسیل	
مقاومت	در جهت جریان	-IR	جهت حرکت
مقاومت	در خلاف جهت جریان	+IR	جهت حرکت
منبع نیروی محركه	از پایانه منفی به پایانه مثبت	+E	جهت حرکت
منبع نیروی محركه	از پایانه مثبت به پایانه منفی	-E	جهت حرکت

## مثال ۲

در مدار شکل ۲-۳ فرض کنید  $V = 12V$ ,  $r = 2\Omega$ ,  $E = 4V$ . باشد.

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

**پاسخ:** الف) اگر مدار را در جهت جریان نشان داده شده دور بزنیم براساس آنچه گفته شد، در یک حلقة کامل با استفاده

از قاعده حلقه داریم :

$$E - Ir - IR = 0$$

و در نتیجه

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

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

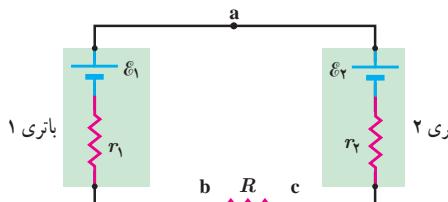
$$V_b - V_a = E - Ir = 12V - (2A)(2\Omega) = 8V$$

## تمرین ۲

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

## مثال ۲-۲

مدار شکل روبرو را در نظر بگیرید. مقادیر نیروهای محرکه الکتریکی و مقاومت‌های مدار عبارتند از:



$$E_1 = 8.0 \text{ V}, E_2 = 2.0 \text{ V}, r_1 = 2.0 \Omega, r_2 = 1.0 \Omega, R = 8.0 \Omega$$

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

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

**پاسخ :** (الف) با استفاده از دستورالعمل‌های حل مدارهای تک حلقه‌ای، مسئله را حل می‌کنیم. گرچه لازم نیست که جهت جریان  $I$  را بدانیم، ولی می‌توانیم آن را با مقایسه نیروهای محرکه الکتریکی دو باتری تعیین کنیم؛ چون  $E_2 > E_1$  است جهت جریان را باتری ۱ تعیین می‌کند. بنابراین، جهت جریان، ساعتگرد است. در نتیجه با حرکت پاد ساعتگرد از نقطه a داریم:

$$V_a - E_1 + Ir_1 + IR + Ir_2 + E_2 = V_a$$

و از آنجا

$$I = \frac{E_2 - E_1}{r_1 + R + r_2} = \frac{8.0 \text{ V} - 2.0 \text{ V}}{2.0 \Omega + 8.0 \Omega + 1.0 \Omega} = 0.5 \text{ A}$$

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

$$V_b - Ir_1 + E_1 = V_a$$

در نتیجه

$$V_a - V_b = E_1 - Ir_1 = 8.0 \text{ V} - (0.5 \text{ A})(2.0 \Omega) = 7.0 \text{ V}$$

که این نتیجه را می‌توانستیم به طور مستقیم از رابطه ۷-۲ نیز به دست آوریم. اما در مورد باتری ۲ که در آن جهت جریان از قطب مثبت وارد و از قطب منفی خارج می‌شود، نمی‌توانیم از این رابطه استفاده کنیم.

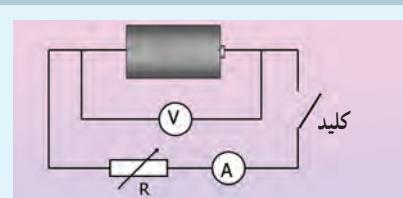
برای محاسبه اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ حتماً باید مسئله را از نو حل کرد. به این منظور، از نقطه c به سمت نقطه a حرکت می‌کنیم:

$$V_c + Ir_2 + E_2 = V_a$$

و در نتیجه:

$$V_a - V_c = E_2 + Ir_2 = 2.0 \text{ V} + (0.5 \text{ A})(1.0 \Omega) = 2.8 \text{ V}$$

## فعالیت ۲-۶ (کار در کلاس)



تفاوت یک باتری نو و فرسوده عمده 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 مشکل از یک باتری، یک کلید قطع و وصل، و یک مقاومت یا لامپ کوچک را سوار کنید. نخست در حالی که کلید

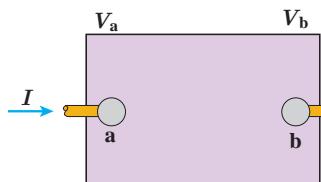
قطع است، ولتاژ دوسر باتری را با یک ولت‌سنج اندازه بگیرید و آن‌گاه پس از بستن کلید، دوباره ولتاژ دوسر باتری را اندازه بگیرید.

همچنین در این حالت، جریان عبوری از مدار را نیز باید به کمک یک آمپرسنج اندازه بگیرید. اکنون با استفاده از رابطه ۷-۲ 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.

## ۲-۵ توان در مدارهای الکتریکی



**شکل ۲-۴** یک جزء مدار که اختلاف پتانسیل  $P = I(V_b - V_a)$  بین دوسر آن برقرار است.

این جزء، به بقیه مدار انرژی می‌دهد  $\Rightarrow P > 0$ . اگر این جزء، از بقیه مدار انرژی می‌گیرد  $\Rightarrow P < 0$ .

اکنون می‌خواهیم رابطه‌هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به دست آوریم. جعبه شکل ۲-۴ 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  $V_b - V_a = \Delta V$  از پایانه a به پایانه b برود. در فصل پیش دیدیم کار نیروی خارجی برای چنین انتقالی برابر با  $W = q\Delta V$  است. از طرفی توان الکتریکی، آهنگ انجام این کار است:

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

$$P = I\Delta V \quad (۸-۲)$$

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

توان الکتریکی مصرفی در یک مقاومت: همان‌طور که گفتیم رابطه ۲-۲ برای مقاومت‌های الکتریکی نیز برقرار است. برای یک مقاومت، همان‌طور که پیش از این دیدیم  $\Delta V$  را با  $V$  نشان می‌دهیم. برای محاسبه مقدار توان مصرفی، کافی است در این رابطه به جای  $V$  از رابطه تعریف مقاومت ( $R = V/I$ ) استفاده کنیم:

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

در نتیجه:

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

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

## مثال ۲-۸

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  $3/0\text{h}$  در روز کار کند و قیمت برق مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت  $5\text{ تومان}$  باشد، هزینه یک ماه مصرف این بخاری چقدر می‌شود؟

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

$$P = I\Delta V = (10\text{A})(220\text{V}) = 2200\text{W} = 2/20\text{kW}$$

(ب) انرژی مصرفی بخاری برابر  $Pt$  می‌شود که بر حسب یکاهای SI،  $P$  بر حسب وات ( $W$ )،  $t$  بر حسب ثانیه (s) است و انرژی مصرفی بر حسب ژول (J) می‌شود. اما برای محاسبه مصرف برق،  $P$  را بر حسب کیلووات ( $\text{kW}$ ) و  $t$  را بر حسب ساعت ( $\text{h}$ ) می‌گیرند. بنابراین، انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت ( $\text{kWh}$ ) می‌شود ( $\text{kWh} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{3600\text{s}} = 10^{-3}\text{kW}\cdot\text{s}$ ).

پس از این مصرفی بخاری در یک ماه، برابر است با

$$U = Pt = (2/20 \text{ kW})(30 \times 300 \text{ h}) = 198 \text{ kWh}$$

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

$$\text{تومان} \cdot 990 = \left( \frac{\text{تومان}}{\text{kWh}} \right) (5 \cdot 198 \text{ kWh}) = \text{بها}$$

## فعالیت ۷-۲



قانون ژول بیان می‌دارد گرمای تولید شده توسط جریان  $I$  ای 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 ۸-۲



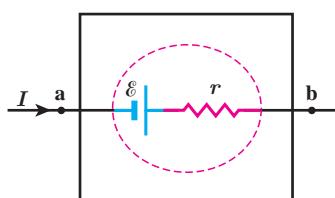
- (الف) همانند شکل با یک اهم‌متر، مقاومت رشته سیم داخل لامپ ۱۰۰ واتی را اندازه‌گیری کنید. سپس با استفاده از رابطه  $2 - 10 = \Omega$  و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. نتیجه محاسبه را با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه کنید و نتیجه را پس از گفت‌وگوی گروهی گزارش دهید.
- (ب) اکنون با استفاده از نتیجه به دست آمده، دمای رشته سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشته سیم لامپ از جنس تنگستن و ضریب دمایی مقاومت ویژه آن  $4/5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  است).

## پرسش ۲-۲



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

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



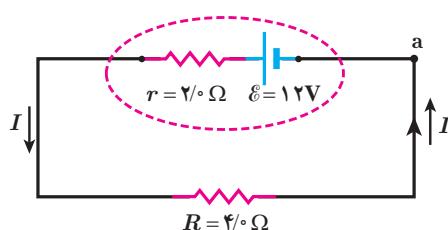
شکل ۱۱-۱ توان خروجی از باتری شکل، از رابطه  $P = (V_b - V_a)I$  به دست می‌آید.

توان خروجی یک منبع نیروی محرکه واقعی: در بخش پیش اختلاف پتانسیل  $V$  دو سر یک باتری واقعی را مانند شکل ۱۱-۲ به صورت  $Ir - \mathcal{E}$  به دست آوردیم. با قرار دادن این اختلاف پتانسیل در رابطه توان الکتریکی خواهیم داشت:

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

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

## مثال ۹-۲



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

**پاسخ:** (الف) نخست، جریان را با استفاده از قاعده حلقه به دست می‌آوریم:

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

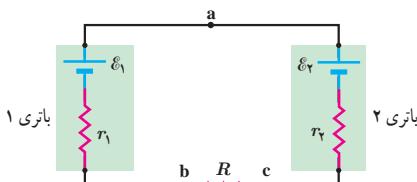
اکنون توان الکتریکی خروجی از باتری با استفاده از رابطه ۱۱-۱ چنین می‌شود:

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

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

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

## مثال ۱۰-۲



در مثال ۱۰-۲ توان هریک از اجزای مدار را محاسبه کنید.

**پاسخ:** توان مصرفی در مقاومت  $R = 8/5\Omega$  با استفاده از رابطه ۱۱-۱ چنین می‌شود:

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (8/5\Omega)(0.5A)^2 = 2W$$

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

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

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

اما توان باتری ۲ از رابطه ۱۱-۱ به دست نمی‌آید؛ زیرا همان‌طور که دیدیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ از رابطه  $V_a - V_c = \mathcal{E}_2 + Ir_2$  به دست می‌آید. اما طبق تعریف این کتاب، برای استفاده از رابطه ۱۱-۱ ( $P = I\Delta V$ )، باید اختلاف پتانسیل  $V_a - V_c$  را در نظر بگیریم که  $(\mathcal{E}_2 + Ir_2) - \mathcal{E}_1$  می‌شود. بنابراین، مقدار (قدر مطلق) توان ورودی به باتری ۲ چنین می‌شود:

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

$$= (2V)(0.5A) + (1/5\Omega)(0.5A)^2 = 1.4W$$



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

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

$$\text{توان خروجی باتری ۱} = \text{توان ورودی باتری ۲} + \text{توان مصرفی مقاومت } R$$

$$\frac{2}{1}\text{W} + \frac{1}{4}\text{W} = \frac{2}{5}\text{W}$$

## تمرین ۲-۲

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

## ۲-۶ ترکیب مقاومت‌ها

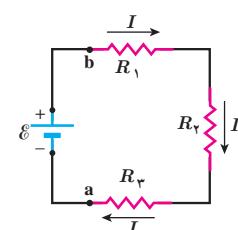
مقابومند ها در انواع وسایل الکتریکی دیده می‌شوند، از ساده‌ترین وسیله‌ها مانند بخاری‌های برقی و موخشک‌کن‌ها گرفته تا وسایل الکتریکی پیچیده‌تری مانند تلویزیون و رایانه‌ها. مدارهای این وسیله‌ها اغلب چندین مقاومت دارند؛ در نتیجه لازم است که ترکیبی از مقابومند ها را در نظر بگیریم. رشته‌ای از لامپ‌ها که در چراغانی‌ها به کار می‌رود، نمونه ساده‌ای از ترکیب مقابومند هاست که در آن هر لامپ به عنوان یک مقابومند عمل می‌کند و رشته لامپ‌ها از دیدگاه تحلیل مدار، ترکیبی است از مقابومند ها. ترکیب مقابومند ها ممکن است بسیار پیچیده باشد، اما کار کردن با دو نوع از این ترکیب ها بسیار ساده است: مقابومند های متواالی و مقابومند های موازی. وقتی مقابومند ها به طور متواالی، یا موازی یا ترکیبی از هر دو بسته شده باشند، آنها را می‌توانیم با یک مقابومند معادل جایگزین کنیم. در این بخش به این موضوع می‌پردازیم و اینکه چگونه می‌توان مقابومند معادل ترکیبی از مقابومند ها را تعیین کرد. به هم بستن متواالی مقابومند ها: شکل ۲-۲ سه مقابومند را نشان می‌دهد که به طور متواالی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکه الکتریکی  $\mathcal{E}$  بسته شده‌اند. توجه کنید واژه «متواالی» ربط چندانی به چگونگی رسم مقابومند ها ندارد. «متواالی» به معنای بسته شدن مقابومند ها یکی پس از دیگری است، به طوری که هیچ اشتعابی بین آنها وجود نداشته باشد و اختلاف پتانسیل  $V$  به دور این مجموعه از مقابومند ها اعمال شده باشد. در بستن متواالی مقابومند ها از همه مقابومند ها جریان یکسان  $I$  عبور می‌کند. به عبارتی اگر آمپرسنج‌هایی را در نقطه‌های مختلفی از این مدار قرار دهیم، همگی جریان یکسانی را نشان می‌دهند. مقابومند هایی را که به طور متواالی بسته شده‌اند می‌توان با یک مقابومند معادل  $R_{eq}$  جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دو سر مجموعه مقابومند ها و همان جریان  $I$  است.

با به کارگیری قاعده حلقه، مثلاً با حرکت در جهت جریان  $I$  و با شروع از نقطه a و بازگشت دوباره متواالی به یک باتری آرمانی متصل به آن، داریم:

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

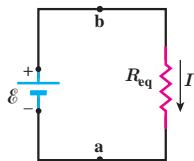
و در نتیجه

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



شکل ۲-۲ سه مقابومند که به طور متواالی به یک باتری آرمانی متصل شده‌اند.

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



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

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

با تعریف مقاومت معادل، به صورت

شکل ۳۶-۲ مدار معادل شکل ۲۶-۲

که در آن سه مقاومت با مقاومت  
جایگزین شده است.

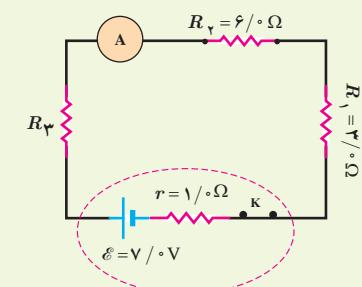
$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

مدار شکل ۲۶-۲ را می توان با مدار معادل شکل ۲۶-۲ جایگزین کرد. بدینهی است که اگر به جای سه مقاومت، n مقاومت متواالی داشته باشیم، مقاومت معادل آنها از رابطه زیر به دست می آید:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (12-2)$$

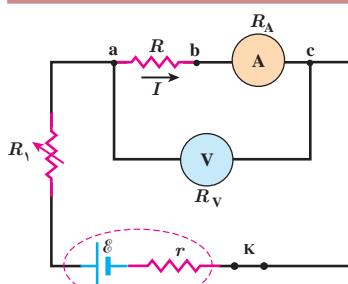
توجه کنید وقتی مقاومت ها به طور متواالی بسته شده اند، مقاومت معادل آنها بزرگ تر از مقاومت هر یک از آنهاست.

## تمرین ۲-۵



در شکل رو به رو، سه مقاومت به همراه یک آمپرسنج به صورت متواالی به یک باتری وصل شده اند و مقاومت آمپرسنج صفر است (آمپرسنج آرمانی). اگر مقاومت معادل مقاومت های  $R_1$ ،  $R_2$ ،  $R_3$  برابر با  $13\Omega$  باشد: (الف) مقاومت  $R_A$  چقدر است؟ (ب) جریانی را که آمپرسنج نشان می دهد به دست آورید. (پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان های مصرفی مقاومت های  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  در مدار برابر است.

## مثال ۱۱-۲



شکل رو به رو مداری را برای اندازه گیری مقاومت مجھول  $R$  نشان می دهد. فرض کنید در این مدار ولتسنج  $V = 24V$  و آمپرسنج  $A = 20A$  را نشان دهد. مقاومت ولتسنج  $R_V = 10\Omega$  و مقاومت آمپرسنج  $R_A = 10\Omega$  است. مقاومت  $R$  را به دست آورید.

**پاسخ:** مقاومت های  $R$  و  $R_A$  به طور متواالی به هم بسته شده اند و اختلاف پتانسیل دوسر آنها برابر با  $V = 24V$  است. با توجه به اینکه آمپرسنج جریان  $A = 20A$  را نشان می دهد و به طور متواالی به مقاومت  $R$  بسته شده است، جریان عبوری از این دو مقاومت نیز برابر  $A = 20A$  است:

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{24V}{20A} = 1.2\Omega$$

با توجه به اینکه  $R_A = 10\Omega$  و  $R_{eq} = 1.2\Omega$  است مقاومت مجھول برابر با  $R = 11.9\Omega$  می شود.

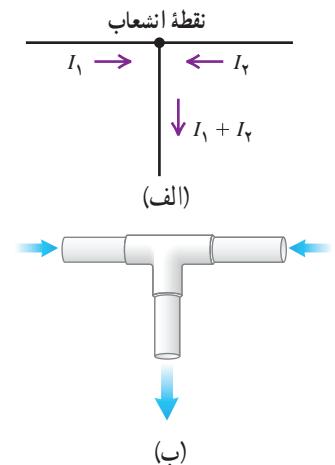
مقاومت یک ولتسنج باید خیلی بزرگ باشد تا قرار گرفتن آن در مدار، ولتاژ اجزای مدار را به طور محسوسی تغییر ندهد. همچنین مقاومت یک آمپرسنج باید خیلی ناچیز باشد تا قرار گرفتن آن در مدار به طور محسوسی جریان اجزای مدار را تغییر ندهد. همان طور که در مثال بالا ملاحظه شد، مقاومت های آمپرسنج و ولتسنج این ویژگی ها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

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

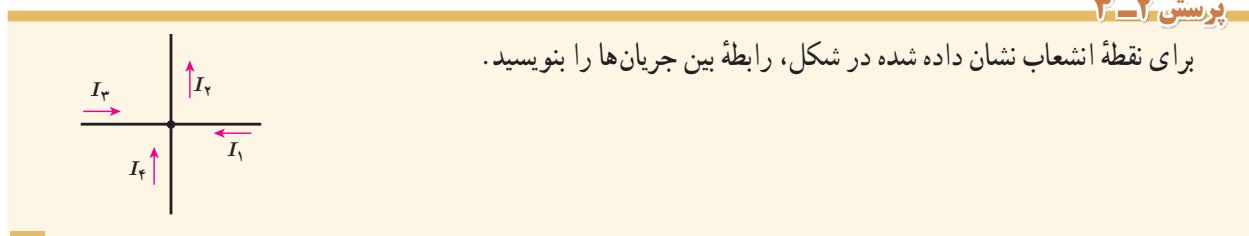
**مجموع جریان‌های که به هر نقطه انشعاب وارد می‌شود برابر با مجموع جریان‌هایی است که از آن**

**نقطه انشعاب خارج می‌شود.**

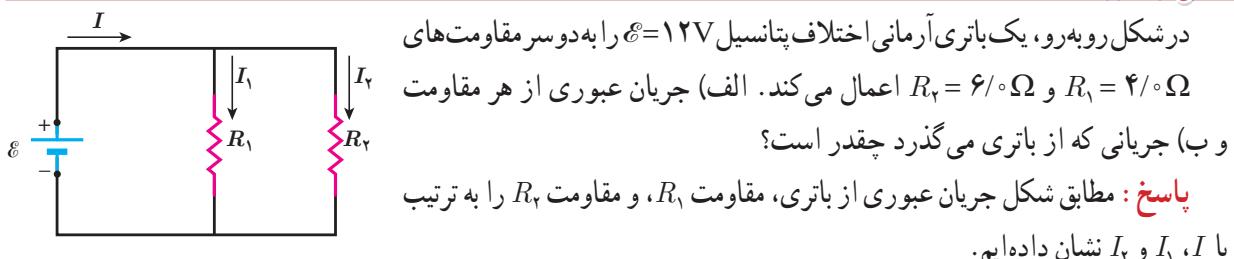
قاعده انشعاب در واقع مبتنی بر پایستگی بار الکتریکی است و اینکه هیچ باری نمی‌تواند در یک نقطه انشعاب جمع گردد. بنابراین، مجموع بار وارد شده به هر نقطه انشعاب در واحد زمان باید برابر با مجموع بار خارج شده از آن نقطه در واحد زمان باشد (شکل ۲-۳۸-الف). همان‌طور که می‌دانیم بار عبوری در واحد زمان همان جریان است. بنابراین، پایستگی بار، به قاعدۀ انشعاب جریان می‌انجامد. این مشابه یک اتصال سه‌راهی لوله‌های آب است (شکل ۲-۳۸-ب): اگر یک لیتر آب در هر دقیقه از سمت چپ، و یک لیتر آب در هر دقیقه از سمت راست وارد اتصال شود، واضح است که آب خارج شده در هر دقیقه برابر با ۲ لیتر است.



شکل ۲-۳۸ (الف) طرحی از قاعدۀ انشعاب.  
ب) مشابه‌سازی اتصال لوله آب برای قاعدۀ انشعاب



### \* مثال ۲-۱۲ \*



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

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

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

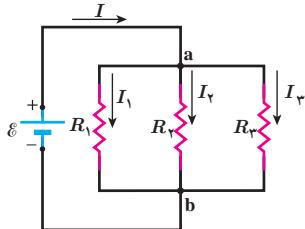
(ب) اکنون با استفاده از قاعدۀ انشعاب، جریان عبوری از باتری را می‌بایسیم:

$$I = I_1 + I_2 = 3A + 2A = 5A$$

\* حل مدارهای چندحلقه‌ای که در حلقه‌های مختلف از باتری استفاده می‌شود و همچنین سایر بهم بستن‌های مقاومت‌ها به‌غیر از بهم بستن متواالی و موازی جزء برنامه درسی این کتاب نبوده و نباید در آموزش و ارزشیابی ها مذکور قرار گیرد.

## ۹-۲ فعالیت

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



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

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

$$V = E = V_1 = V_2 = V_3$$

مجموعه مقاومت‌هایی که به این روش متصل شده‌اند را می‌توان با یک مقاومت معادل  $R_{eq}$  جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل  $V$  و جریان کلی است که از مقاومت‌ها می‌گذرد. برای یافتن عبارتی برای  $R_{eq}$  نخست از قاعدة انشعاب استفاده می‌کنیم. اگر این قاعدة را برای نقطه a شکل ۳۹-۲ به کار ببریم خواهیم داشت:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

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

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

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

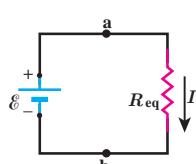
$$I = V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

اگر ترکیب موازی مقاومت‌ها را با مقاومت  $R_{eq}$  جایگزین کیم  $I = \frac{V}{R_{eq}}$  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:

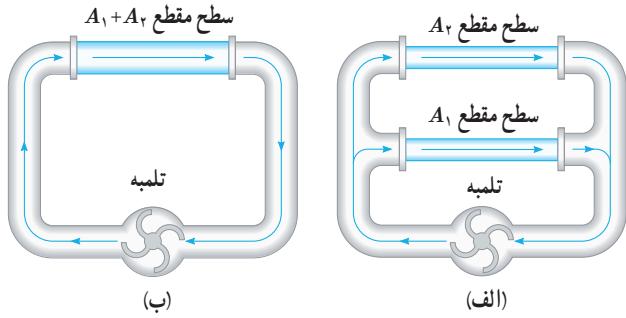
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (12-2)$$



مدار شکل ۳۹-۲ به مدار معادل شکل ۲-۴۰ تبدیل می‌شود. توجه کنید هرگاه چند مقاومت به صورت موازی به هم بسته شوند، مقاومت معادل آنها کوچک‌تر از هریک از مقاومت‌های موجود در آن ترکیب است. برای اینکه به درکی از این نتیجه برسیم، دوباره مشابه‌سازی با لوله‌های آب که در آن مقاومت معادل  $R_{eq}$  جایگزین می‌تواند راه‌گشا باشد. شکل ۴۱-۲-الف دو لوله هم‌طول با سطح مقطع‌های  $A_1$  و  $A_2$  را نشان می‌دهد  $R_2$  شده است.

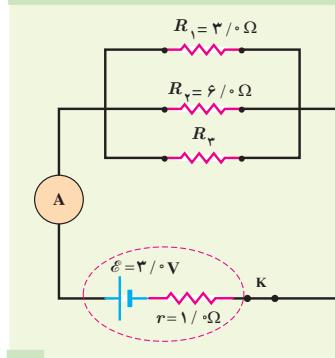
شکل ۴۱-۲ مدار معادل شکل ۳۹-۲ در آن مقاومت معادل  $R_{eq}$  جایگزین می‌شود.

که به طور موازی به یک تلمبه آب متصل شده‌اند. در شکل ۲-۱۱-۲ 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 پیشتری 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 ۲-۱۱-۲ (الف) دو لوله هم طول با سطح مقطع‌های  $A_1$  و  $A_2$  به طور موازی به تلمبه آبی متصل شده‌اند. (ب) دو لوله بخش الف معادل با تک‌لوله‌ای با همان طول و سطح مقطع مجموع آنهاست.

## تمرین ۲-۶



در شکل رو به رو 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  $R_2$  چقدر است؟ (ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد را بدست آورید. (پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان‌های مصرفی مقاومت‌های  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  برابر است.

## مثال ۲-۱۳

مدار ساده شکل رو به رو را که شامل یک منبع نیروی محرکه الکتریکی آرمانی با  $\mathcal{E} = 15.0\text{ V}$  و یک مقاومت با  $R_1 = 10.0\text{ k}\Omega$  است، در نظر بگیرید.

(الف) جریان عبوری از منبع را بدست آورید.

(ب) اگر مقاومت  $R_2 = 10.0\text{ M}\Omega$  به طور موازی به دو سر مقاومت  $R_1$  متصل شود، مقاومت معادل

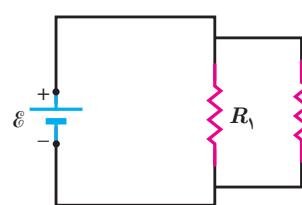
مدار چقدر می‌شود و چه جریانی از منبع می‌گذرد؟

**پاسخ:** (الف) با استفاده از تعریف مقاومت داریم :

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1} = \frac{15.0\text{ V}}{10.0 \times 10^3 \Omega} = 1.50 \times 10^{-3} \text{ A} = 1.50 \text{ mA}$$

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

(ب) با استفاده از رابطه ۲-۱۳ داریم :



در نتیجه

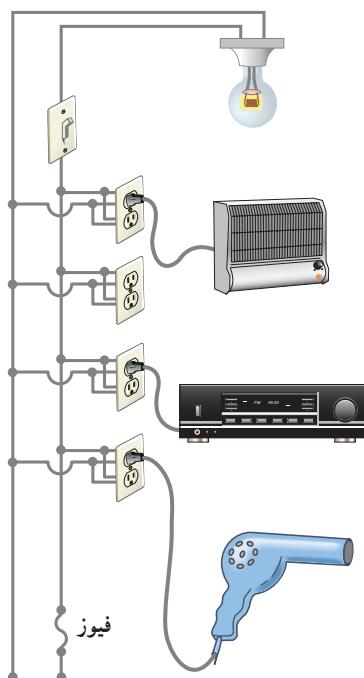
$$R_{\text{eq}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(10.0 \times 10^3 \Omega)(10.0 \times 10^6 \Omega)}{10.0 \times 10^3 \Omega + 10.0 \times 10^6 \Omega} = 99.0 \text{ k}\Omega$$

و بنابراین، جریان عبوری از منبع برابر است با

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{eq}}} = \frac{15.0\text{ V}}{99.0 \times 10^3 \Omega} = 1.52 \times 10^{-3} \text{ A} = 1.52 \text{ mA}$$

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.

## مثال ۲



یک لامپ رشته‌ای  $W = ۱۰۰$ ، یک بخاری برقی  $W = ۲۰۰۰$ ، یک دستگاه پخش صوت  $W = ۲۰۰$ ، و یک سشوار (موخشک کن)  $W = ۲۲۰۰$  مطابق شکل به پریزهای یک مدار سیم‌کشی خانگی  $V = ۲۲۰$  وصل شده است.

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

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

**پاسخ:** (الف) همان‌طور که در شکل می‌بینیم در سیم‌کشی منازل همه مصرف‌کننده‌ها به طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر با مجموع جریان‌های عبوری از هریک از مصرف‌کننده‌هاست. با استفاده از رابطه  $I = P/V$  جریان عبوری از هریک از این چهار مصرف‌کننده را به دست می‌آوریم. بنابراین، به ترتیب داریم :

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

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

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

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

بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر است با :

$$\begin{aligned} I_{کل} &= I_{سشوار} + I_{بخاری} + I_{لامپ} + I_{پخش} \\ &= ۰/۴۵۵A + ۹/۰۹A + ۰/۹۰۹A + ۱۰/۰A = ۲۰/۰A \end{aligned}$$

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

(ب) دیدیم که همه مصرف‌کننده‌ها به طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، مقاومت معادل مصرف‌کننده‌های شکل از رابطه  $13-2$  به دست می‌آید. بنابراین، برای محاسبه مقاومت لازم است مقاومت هریک از وسیله‌ها را به طور جداگانه محاسبه کنیم. مقاومت

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

$$R_{بخاری} = \frac{V^2}{P_{بخاری}} = \frac{(۲۲۰V)^2}{۲۰۰۰W} = ۲۴/۲\Omega$$

$$R_{لامپ} = \frac{V^2}{P_{لامپ}} = \frac{(۲۲۰V)^2}{۱۰۰W} = ۴۸۴\Omega$$

$$R_{سشوار} = \frac{V^2}{P_{سشوار}} = \frac{(۲۲۰V)^2}{۲۲۰۰W} = ۲۲/۰\Omega$$

$$R_{پخش} = \frac{V^2}{P_{پخش}} = \frac{(۲۲۰V)^2}{۲۰۰W} = ۲۴۲\Omega$$

پس مقاومت معادل چنین محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}\frac{1}{R_{\text{eq}}} &= \frac{1}{R_{\text{لامپ}}} + \frac{1}{R_{\text{بخاری}}} + \frac{1}{R_{\text{پخش}}} + \frac{1}{R_{\text{سشوar}}} = \\ &= \frac{1}{484\Omega} + \frac{1}{24/2\Omega} + \frac{1}{242\Omega} + \frac{1}{22/0\Omega} = 0.93\Omega^{-1}\end{aligned}$$

و در نتیجه  $R_{\text{eq}} = 1.075\Omega \approx 1.08\Omega$ . بنابراین، توان مصرفی مقاومت معادل چنین می‌شود:

$$P_{R_{\text{eq}}} = \frac{V^2}{R_{\text{eq}}} = \frac{(220\text{V})^2}{1.075\Omega} = 450\text{kW}$$

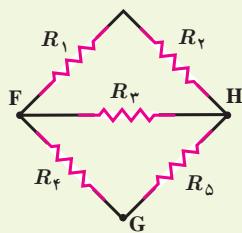
اکنون می‌خواهیم این نتیجه را با مجموع توان‌های هریک از مصرف‌کننده‌ها مقایسه کنیم.

مجموع توان مصرف‌کننده‌ها برابر است با:

$$P_{\text{کل}} = P_{\text{لامپ}} + P_{\text{بخاری}} + P_{\text{پخش}} + P_{\text{سشوar}} = 100\text{W} + 200\text{W} + 220\text{W} = 450\text{W}$$

که همان توان مصرفی مقاومت معادل است.

## تمرین ۲-۲



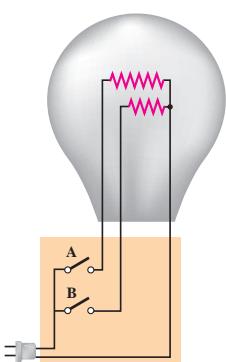
شکل رو به رو پنج مقاومت ۸٪ اهمی را نشان می‌دهد.

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

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

## مثال ۲

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



**پاسخ:** همان‌طور که می‌دانیم توان الکتریکی مصرفی از رابطه  $P = V^2/R$  به دست می‌آید. بنابراین، بیشترین توان مربوط به کمترین مقاومت و کمترین توان مربوط به بیشترین مقاومت است. درستن موازی مقاومت‌ها دیدیم مقاومت معادل کوچک‌تر از هریک از مقاومت‌های است. بنابراین، بیشترین توان مربوط به وقتی است که کلیدهای a و b هردو بسته‌اند؛ یعنی:

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

که در آن  $R_1$  و  $R_2$  مقاومت‌های دو رشته لامپ‌اند. بنابراین، برای مقاومت معادل داریم:

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

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

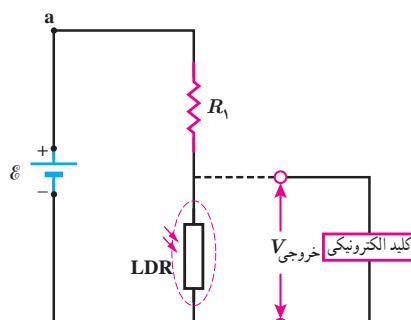
$$R_1 = R_{\max} = \frac{V}{P_{\min}} = \frac{(22\text{V})^2}{50\text{W}} = 968\Omega \quad R_1 \text{ نمایش دهیم، داریم:}$$

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

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{\text{eq}}} - \frac{1}{R_1} = \frac{1}{323\Omega} - \frac{1}{968\Omega} = 2.06 \times 10^{-3}\Omega^{-1}$$

$$R_2 = \frac{1}{2.06 \times 10^{-3}\Omega^{-1}} = 485\Omega \quad \text{در نتیجه}$$

## مثال ۲



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

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

**پاسخ:** با استفاده از قاعده حلقه داریم:

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

از طرفی بدیهی است

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

از ترکیب دو معادله بالا خواهیم داشت:

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

و از آنجا برای  $R_1$  چنین به دست می آوریم:

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



## پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

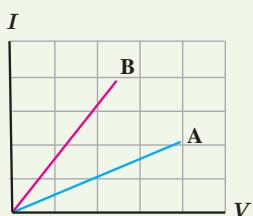
با استفاده از این اطلاعات (الف) مقدار بار کل منتقل شده بین ابر و زمین، (ب) جریان متوسط در یک یورش آذرخش و (پ) توان الکتریکی آزادشده در  $20^{\circ}\text{C}$  را بدست آورید.

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

شماره آزمایش	عدد ولت سنج (V)	عدد آمپرسنج (A)
صفر	صفر	۱
$0/16$	$1/6$	۲
$0/43$	$4/4$	۳
$0/68$	$7/0$	۴
$0/72$	$9/0$	۵
$0/75$	$10/0$	۶

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؟



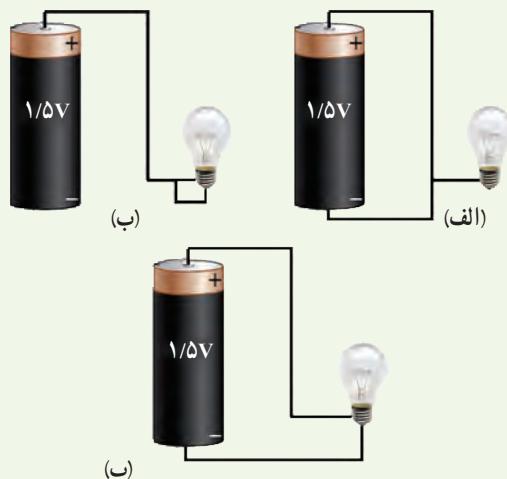
### ۳-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

۷ دو رسانای فلزی از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توبی به قطر  $1.0\text{ mm}$  است. رسانای B لوله‌ای توخالی به شعاع خارجی  $2.0\text{ mm}$  و شعاع داخلی  $1.0\text{ mm}$  است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟

۸ در ماشین‌های چمن‌زنی برقی برای مسافت‌های حداقل تا  $35\text{ m}$  از سیم‌های مسی نمره  $20/0.8\text{ cm}$  (قطر  $0.13\text{ cm}$ ) استفاده می‌کنند تا بدین ترتیب مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. (الف) مقاومت یک

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

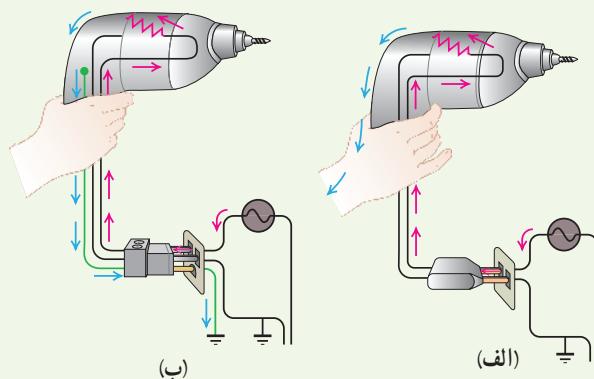
۱ در کدام یک از شکل‌های زیر، لامپ روشن می‌شود؟



۲ در مدار شکل زیر اختلاف پتانسیل دو سر لامپ  $4.0\text{ V}$  و مقاومت آن  $5.0\Omega$  است. در مدت ۵ دقیقه چه تعداد الکترون از لامپ می‌گذرد؟

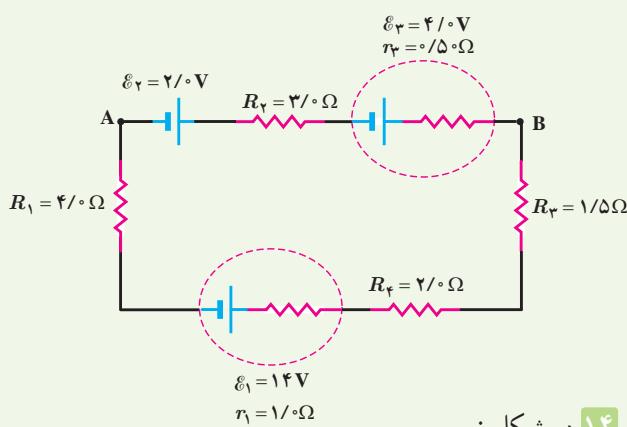


۳ بررسی کنید اگر متنه برقی (دریل) معموب شکل‌های زیر را با دوشاخه (شکل الف) یا سه‌شاخه (شکل ب) به پریز وصل کنیم، چه رخ می‌دهد؟



۴ آذرخش مثالی جالب از جریان الکتریکی در پدیده‌های طبیعی است. در یک آذرخش نوعی  $J = 1.0 \times 10^{-10}\text{ A}$  انرژی تحت اختلاف پتانسیل  $5.0 \times 10^{-7}\text{ V}$  در بازه زمانی  $2.0 \times 10^{-8}\text{ s}$  آزاد می‌شود.

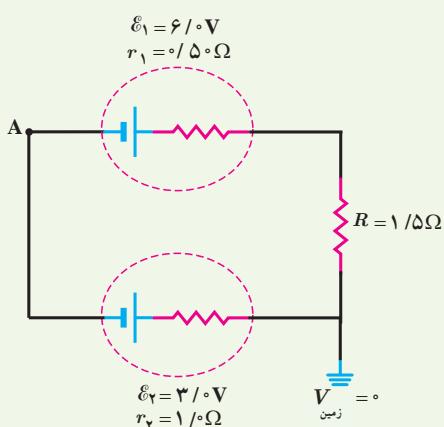
۱۳ در مدار شکل زیر جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه A و B ( $V_B - V_A$ ) را محاسبه کنید.



۱۴ در شکل زیر

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

ب) پتانسیل نقطه A را تعیین کنید.



## ۵-۲ توان در مدارهای الکتریکی

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

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



کتری برقی، ۲۲۰۰W، ۲۲۰V



اتوی برقی، ۸۵۰W، ۲۲۰V

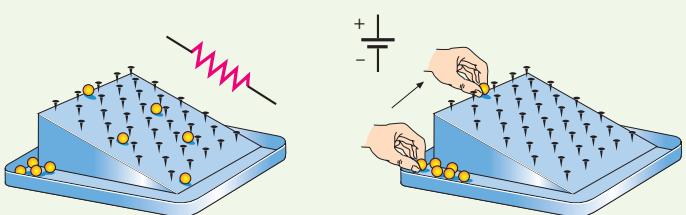
سیم ۳۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟  
ب) مقاومت یک سیم ۷۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ (دماهی سیم‌ها را در نظر بگیرید.)



۹ مقاومت رشته درونی یک برشته کن که از جنس نیکروم است، در حالت روشن (دماهی ۱۲۰°C) برابر ۴۴Ω است. مقاومت این رشته در دماهی ۲۰°C چقدر است؟ (از تغییر طول و قطر رشته در اثر تغییر دما چشم پوشی نشود).

## ۴-۲ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

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



۱۱ اختلاف پتانسیل دو سر باتری خودروهای سواری برابر ۱۲ ولت است. اگر هشت باتری قلمی  $\frac{1}{5}$  ولتی را به طور متواالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه آنها نیز برابر ۱۲ ولت می‌شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از هشت باتری قلمی استفاده نمی‌شود.

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

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

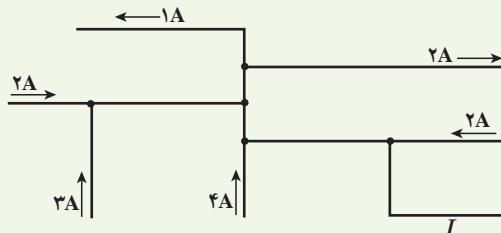
ب) نمودار اختلاف پتانسیل دو سر باتری بر حسب جریان گذرنده از آن را رسم کنید.

## ۶-۲ ترکیب مقاومت‌ها

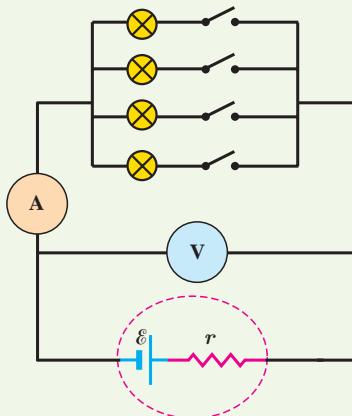
**۲۱** لامپ‌های یک درخت زینتی، به طور متواالی متصل شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتفاقی می‌افتد؟ به نظر شما چرا همه چراغ‌های خودرو (چراغ‌های جلو، عقب و ... ) به طور موازی بسته می‌شوند؟

**۲۲** 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، تزدیک به هم باشد؟

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



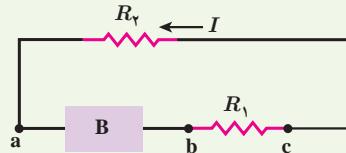
**۲۴** در شکل زیر، تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده‌اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، عددهایی که آمپرسنج و ولت‌سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟



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

ب) مقاومت الکتریکی هر وسیله در حالت روشن چقدر است؟ **۱۷** لامپ یک چراغ قوه معمولی با ولتاژ  $297\text{V}$  کار می‌کند و در این حالت توان مصرفی آن  $87\text{W}$  می‌شود. اگر مقاومت رشته تنگستنی این لامپ در دمای اتاق ( $20^\circ\text{C}$ ) برابر  $11\Omega$  باشد، دمای این رشته وقتی که لامپ روشن است، چقدر می‌شود؟

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

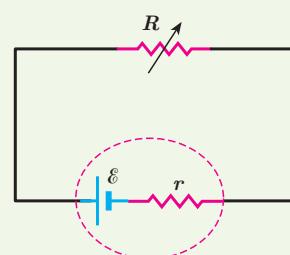


**۱۹** تلویزیون و یکی از لامپ‌های خانه خود را در نظر بگیرید و فرض کنید که هر کدام روزی ۸ ساعت با اختلاف پتانسیل  $220$  ولت روشن باشد.

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

ب) بهای برق مصرفی هر کدام از قرار هر کیلووات ساعت  $5$  تومان در یک دوره یک ماهه چقدر می‌شود؟

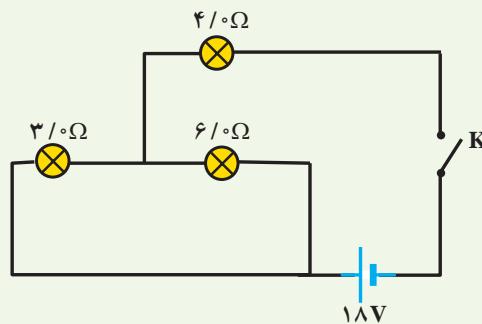
پ) اگر در شهر شما هر خانه یک لامپ  $100\text{W}$  اضافی را به مدت  $3$  ساعت در شب روشن کند، در طول یک ماه تقریباً چند کیلووات ساعت انرژی الکتریکی اضافی مصرف می‌شود؟ **۲۰** در شکل زیر، الف) نیروی حرکة الکتریکی و مقاومت



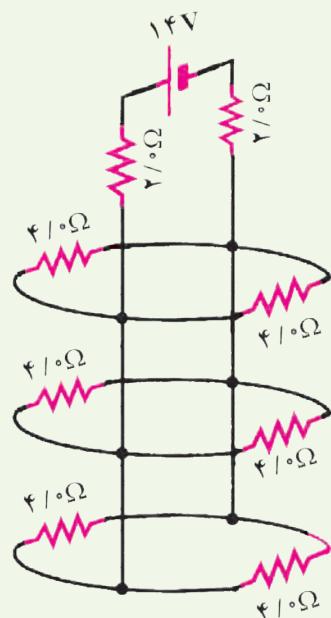
۲۸ سه مقاومت مشابه  $12\ \Omega$  را یک بار به طور متواالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل  $12\text{ V}$  وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۲۹ دو مقاومت موازی  $6\ \Omega$  و  $12\ \Omega$  به طور متواالی و  $12\ \Omega$  به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و آنها را هر بار به ولتاژ  $V$  وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

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

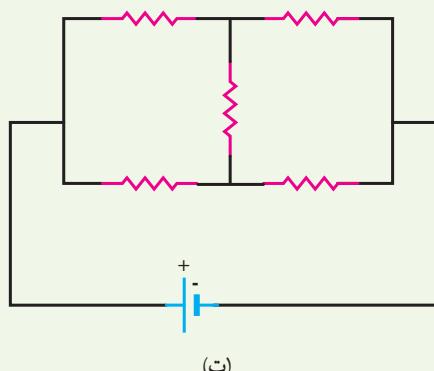
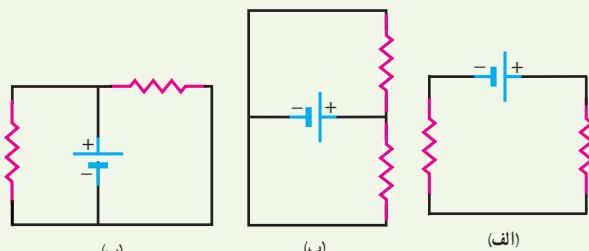


۳۱ جریانی که از منبع نیروی حرکت آرمانی و هر یک از مقاومت‌های شکل زیر می‌گذرد، چقدر است؟



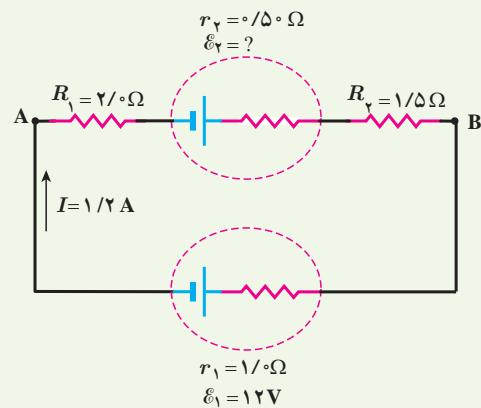
۲۵ دو لامپ با مقاومت مساوی  $R$  را یک بار به طور متواالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و آنها را هر بار به ولتاژ  $V$  وصل می‌کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متواالی چقدر است؟

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



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

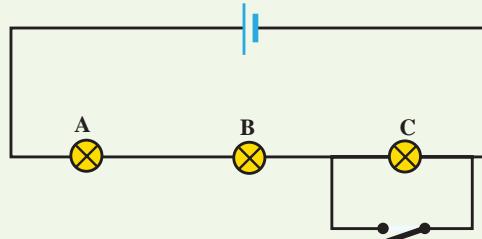
(الف) نیروی حرکت  $\mathcal{E}_1$  و  $V_A - V_B$  چقدر است؟  
ب) انرژی مصرف شده در  $R_1$  و  $R_2$  در مدت  $5\text{ s}$  در مدار  $I = 1/2\text{ A}$  چقدر است؟



پ) هریک از اختلاف‌پتانسیل‌های دو سر A و B به اندازه  $5\%$  افزایش می‌یابد.

ت) اختلاف‌پتانسیل دو سر C به صفر کاهش می‌یابد.  
**۳۲** در سیم کشی منازل، همه مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. یک اتوی  $W_{110}$ ، یک نان برشته‌کن (توستر)  $W_{180}$ ، پنج لامپ رشتہ‌ای  $W_{100}$  و یک بخاری  $W_{110}$  به پریزهای یک مدار سیم کشی خانگی  $220V$  که حداقل می‌تواند جریان  $15A$  را تحمل کند وصل شده‌اند. آیا این ترکیب مصرف‌کننده‌ها باعث پریدن فیوز می‌شود یا خیر؟

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



- الف) اختلاف‌پتانسیل دو سر A و B تغییر نمی‌کند.  
 ب) اختلاف‌پتانسیل دو سر C به اندازه  $5\%$  کاهش می‌یابد.



## مغناطیس



پرواز مغناطیسی یا ترابری مگ‌لو<sup>۱</sup>

قطارهای معمولی با ریل‌های آهنی در تماس اند؛ در حالی‌که قطارهای مغناطیسی هنگام حرکت، چند سانتی‌متر بالاتر از ریل‌ها شناور می‌شوند و با ریل‌ها تماسی ندارند. تندی این قطارها امروزه به بیش از ۵۰۰ کیلومتر بر ساعت (حدود ۱۴۰ متر بر ثانیه) رسیده است.

<sup>۱</sup>— مگ‌لو (Maglev) کوتاه‌نوشت عبارت شناوری مغناطیسی (Magnetic Levitation) است.

کاربرد مغناطیس و آهنربا در جنبه‌های مختلف زندگی بشر، رشدی روزافزون دارد. فراتر از یک قرن، ضبط صدا و تصویر روی محیط‌های انجمام می‌گرفت که مغناطیس در آنها نقش اصلی داشت. اگرچه فناوری دیجیتال به میزان زیادی جایگزین ضبط مغناطیسی به شیوه‌های سنتی شده است، 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. پژوهشکار 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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  را که ویژگی آهنربایی دارد می‌شناخت.

### ۱-۳ 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 ۱-۳). چینی‌های باستان نیز با ویژگی‌های مغناطیسی برخی از سنگ‌های آهنربایی آشنایی داشتند و از آنها در ساخت قطب‌نما برای جهت‌یابی استفاده می‌کردند (شکل ۲-۳).



**شکل ۱-۳** از گذشته‌های دور، برای جهت‌یابی در دریانوردی از قطب‌نما استفاده می‌شده است.

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

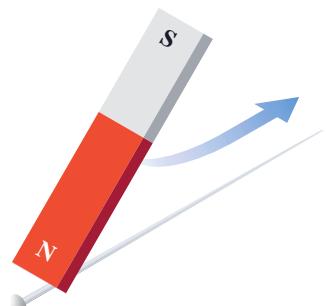
### پرسش ۱-۳

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



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

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 ۴-۳). اگر این سوزن را به آرامی روی سطح آب درون ظرفی شناور کنیم، یا آن را توسط رسمنانی از وسط آن یا بازیزیم 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.

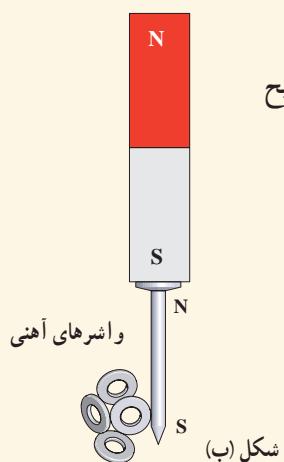


ممکن است مفهوم قطب‌های مغناطیسی به نظر، مشابه مفهوم بارهای الکتریکی باشد و قطب‌های شمال و جنوب، مشابه بارهای مثبت و منفی به نظر بیاید؛ ولی این مشابهت می‌تواند گمراه کننده باشد. بارهای مثبت و منفی مجزا وجود دارند، در حالی که هیچ گواه تجربی بر وجود تک قطبی مغناطیسی وجود ندارد؛ قطب‌های مغناطیسی همواره به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

**شکل 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.

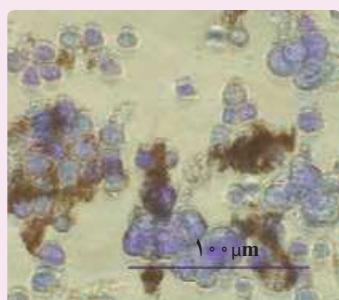
۱- دریافت خود را از شکل الف بیان کنید.

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؟

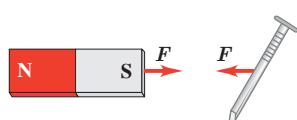
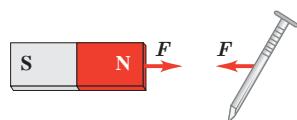


شکل (الف)

### فناوری و کاربرد: نانوذره‌های مغناطیسی برای درمان



لکه‌های تیره در تصویر میکروسکوپی رویه رو، یاخته‌های سرطانی اند 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 شیمیابی خاصی پوشیده شده‌اند که به طور 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.



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

### ۲-۳ میدان مغناطیسی

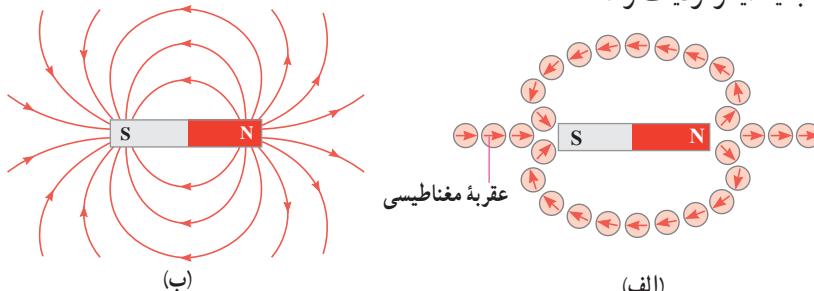
هرگاه آهنربایی را به یک میخ آهنی تزدیک کنید می‌بینید که میخ به طرف آهنربا حرکت می‌کند و به سمت آن جذب می‌شود (شکل ۵-۳). مشابه آنچه در باره اجسام باردار دیدید، برای توجیه این پدیده می‌گوییم در فضای اطراف آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد که سبب جذب میخ شده است. میدان مغناطیسی نیز مانند میدان الکتریکی که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

### فعالیت ۱



یکی از قطب‌های یک آهنربای میله‌ای را به یک عقره مغناطیسی تزدیک کنید (شکل رویه رو). 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 ته گرد مغناطیسی شده را روی سطح آب، درون ظرفی شناور سازید. به این ترتیب، سوزن ته گرد مانند عقره مغناطیسی یک قطب‌نما رفتار می‌کند.

به کمک عقرهٔ مغناطیسی می‌توان 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 عقرهٔ مغناطیسی در آن نقطه قرار می‌گیرد، قطب N عقره، آن جهت را نشان می‌دهد. با تعیین جهت میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای اطراف آهنربا، می‌توان همان‌گونه که برای میدان الکتریکی انجام دادیم، خط‌های میدان مغناطیسی را رسم کنیم. شکل ۳-۶ ب خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف یک آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد. این خط‌ها از آهنربا می‌گذرند و هریک از آنها یک حلقهٔ بسته را تشکیل می‌دهند. افزون بر اینها، خط‌های میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند.



شکل ۳-۶ (الف) تعیین جهت میدان مغناطیسی به کمک عقرهٔ مغناطیسی.  
(b) خط‌های میدان مغناطیسی در هر نقطه در جهت عقرهٔ مغناطیسی اندو از قطب N خارج و به قطب S وارد می‌شوند. (در این شکل خط‌های درون آهنربا نشان داده نشده است).

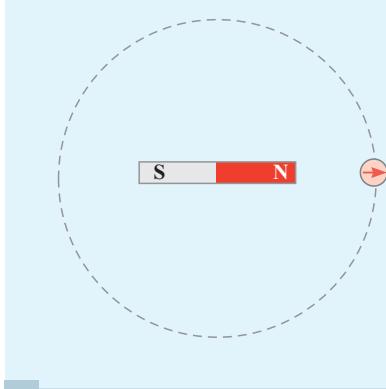
### پرسش ۳-۲

- ۱- شکل رویه‌رو، یک آهنربای میله‌ای و تعدادی عقرهٔ مغناطیسی را نشان می‌دهد. (الف) کدام سر آهنربا قطب N و کدام سر قطب S است؟  
(b) جهت‌گیری عقره‌های مغناطیسی را در دیگر مکان‌های روی شکل تعیین کنید.

- ۲- شکل رویه‌رو، خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا را نشان می‌دهد. بردار میدان مغناطیسی را در هر یک از نقطه‌های از فضا را نشان کنید. به اندازه و جهت بردار میدان در هر نقطه توجه کنید.

### فعالیت ۳-۲

- یک آهنربای میله‌ای را روی سطح افقی میزی قرار دهید. یک قطب‌نما یا عقرهٔ مغناطیسی را مقابل یکی از قطب‌های آهنربا قرار دهید. روی مسیری دایره‌ای شکل دور آهنربا، عقره را به آرامی حرکت دهید (شکل رویه‌رو). بررسی کنید پس از یک دور حرکت، عقره چند درجه می‌چرخد.

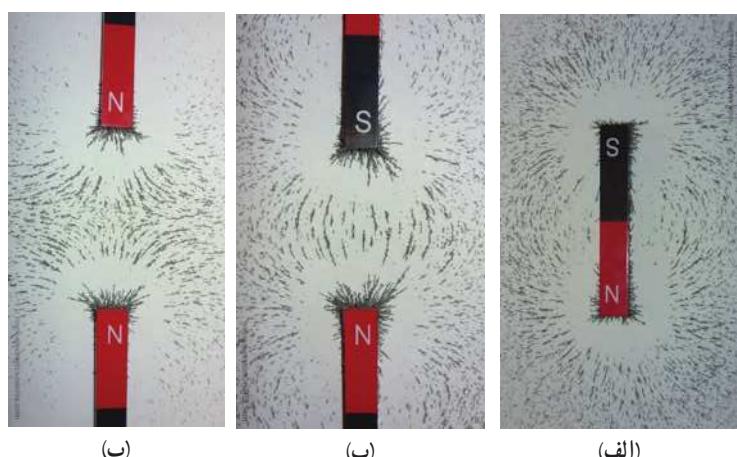


### هدف: مشاهده طرح خطهای میدان مغناطیسی با استفاده از براده آهن

و سیله‌های مورد نیاز: آهنربای میله‌ای (دو عدد)، براده آهن، یک ورقه شیشه‌ای یا مقوایی، نمک پاش (یا وسیله دیگری برای پاشیدن براده آهن) و دوربین برای عکس گرفتن از نتیجه آزمایش (اختیاری)

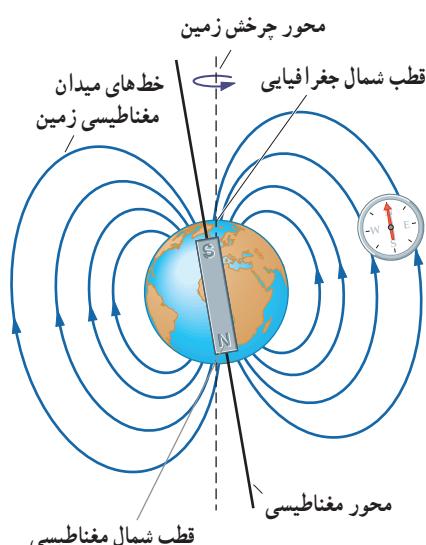
#### شرح آزمایش:

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



• چند ضربه آرام به صفحه شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خطهای میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرحی که روی صفحه 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 ۷-۳** طرح ساده‌ای از میدان مغناطیسی زمین. عقره 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 ۷-۳). نشان دادن خطهای میدان مغناطیسی زمین به صورت خطهای میدان یک آهنربای میله‌ای، تنها یک مدل ساده از ساختار پیچیده و ناشناخته عوامل ایجاد میدان مغناطیسی زمین است. شواهد زمین شناختی نشان می‌دهند که جهت این میدان در بازه‌های زمانی نامنظم از ده هزار تا یک میلیون سال به‌طور کامل وارون می‌شود. قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. در واقع، قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین فاصله نسبتاً زیادی از یکدیگر دارند؛ مثلاً قطب جنوب مغناطیسی تقریباً در فاصله  $180^{\circ}$  کیلومتری قطب شمال جغرافیایی قرار دارد. این بدان معناست که عقره مغناطیسی قطب‌نما درجهت شمال واقعی جغرافیایی قرار نمی‌گیرد و تا حدودی از شمال جغرافیایی انحراف دارد.

### فعالیت ۲-۳

وقتی یک سوزن مغناطیسی شده یا یک عقرهٔ مغناطیسی را از وسط آن آویزان می‌کنیم در بیشتر نقاط زمین، به طور افقی قرار نمی‌گیرد و امتداد آن با سطح افقی زمین زاویهٔ 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 عقرهٔ مغناطیسی بزرگ، نخی را بیندید و آن را آویزان کنید. پس از تعادل، به کمک نقاله، زاویه‌ای را اندازه بگیرید که امتداد سوزن یا عقرهٔ مغناطیسی با راستای افق می‌سازد. عدد به دست آمده، شیب مغناطیسی محل زندگی شماست<sup>۱</sup>. چنانچه در آزمایشگاه مدرسه شیب سنج مغناطیسی موجود باشد می‌توانید از آن نیز استفاده کنید.

### خوب است بدانید: جمثیابی 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 مؤسسهٔ 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 عقرهٔ 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 نیمکرهٔ جنوبی زمین، برای رسیدن به ته آبگیر در خلاف جهت خط‌های میدان مغناطیسی زمین قرار می‌گیرند.

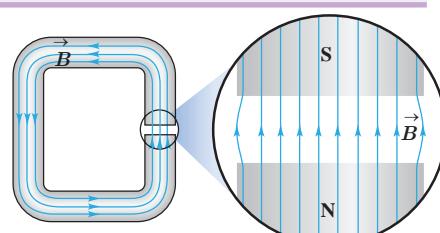


(ب)



(الف)

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



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

۱- می‌توانید به سایت [www.magnetic-declination.com](http://www.magnetic-declination.com) بروید و درست 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  $40^{\circ}$  تا  $60^{\circ}$  از مناطق جنوبی تا مناطق شمال غربی متغیر است.

<sup>2</sup>- C – Shaped magnet



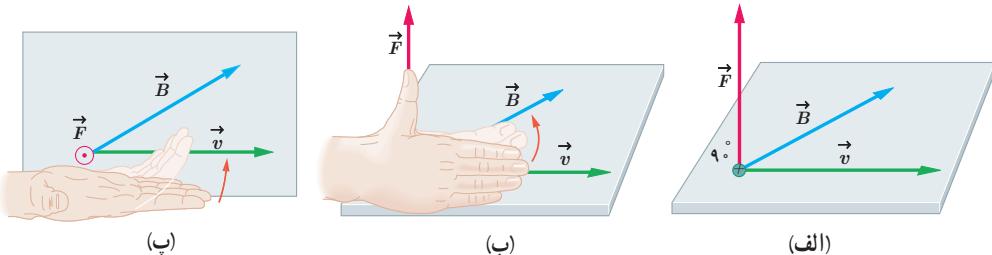
نیکلا تسلا (۱۸۵۶-۱۹۴۳)

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 کارکردن با جریان متناوب (ac) با ولتاژ های سیار بالا را عملی ساخت. تسلا از اینکه جریان متناوب برای اولین بار در صندلی 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 دهنده.

- ⦿ نماد بار عمود بر صفحه به طرف بیرون (برون سو)
- ⦿ نماد بار عمود بر صفحه به طرف درون (درون سو)

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

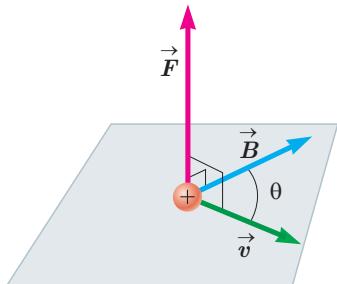
آزمایش نشان می دهد که اگر ذره باردار  $q$  با سرعت  $\vec{v}$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  حرکت کند (به شرط آنکه جهت حرکت آن با میدان مغناطیسی موازی نباشد) بر آن نیروی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۳-۹ الف بر راستای سرعت و میدان مغناطیسی عمود است. این نیرو را نیروی مغناطیسی می نامند و جهت آن، مطابق شکل ۳-۹ ب و پ به کمک قاعدة 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 قاعدة دست راست تعیین می شود.

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

$$F = |q| v B \sin\theta \quad (1-3)$$



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

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 (باردار  $\vec{v}$ ) با جهت میدان مغناطیسی (باردار  $\vec{B}$ ) است (شکل ۳-۱۰).

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

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

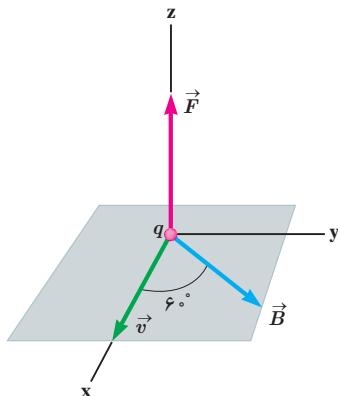
این یکا به احترام نیکلا تسلا داشتمند و مخترع نامی، تسلا نامیده می شود و به اختصار با نماد T نشان داده می شود. به این ترتیب می توان نوشت:

$$1\text{T} = 1\frac{\text{N}}{\text{C.m/s}} = 1\frac{\text{N}}{\text{A.m}} \quad (2-3)$$



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  $G = 10^3 T = 1$ . اندازهٔ میدان مغناطیسی زمین در نزدیکی سطح زمین در قطب‌ها بیشترین ( $65 G$ ) و در استوا کمترین ( $25 G$ ) است. بزرگی میدان مغناطیسی در نزدیکی آهنرباهای میله‌ای کوچک حدود  $1/100$  تا  $1/1$  تسلا است. همچنین بزرگ‌ترین میدان مغناطیسی مدارم<sup>۱</sup> که امروزه در آزمایشگاه تولید شده، حدود ۴۵ تسلا است.

### مثال ۱-۳



ذره‌ای با بار  $q = +4 \mu C$  و با تندي  $v = 20 m/s$  در جهتی حرکت می‌کند که با میدان مغناطیسی یکنواخت  $B = 120 G$  زاویه  $\theta = 60^\circ$  می‌سازد (شکل رویه‌رو). اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر این ذره را حساب کنید.

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

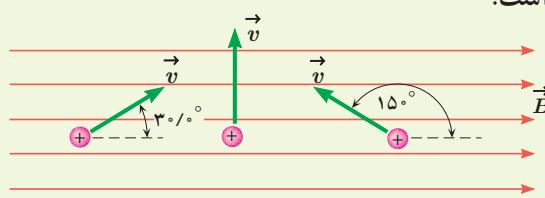
$$|q| = +4 \mu C, v = 20 m/s, \\ B = 120 \times 10^{-4} T \quad \theta = 60^\circ$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطهٔ ۱-۲ داریم :

$$F = |q|vB \sin\theta \\ = (4 \times 10^{-6} C)(20 m/s)(120 \times 10^{-4} T) \sin 60^\circ \approx 8.3 \times 10^{-11} N$$

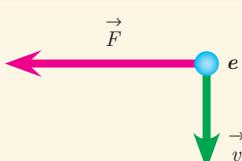
### تمرین ۱-۳

۱- بر پروتونی که با زاویه  $\theta = 30^\circ$  نسبت به میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه  $B = 320 G$  در حرکت است نیرویی به اندازه  $F = 5 \times 10^{-14} N$  وارد می‌شود. تندي پروتون چند کیلومتر بر ثانیه است؟



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

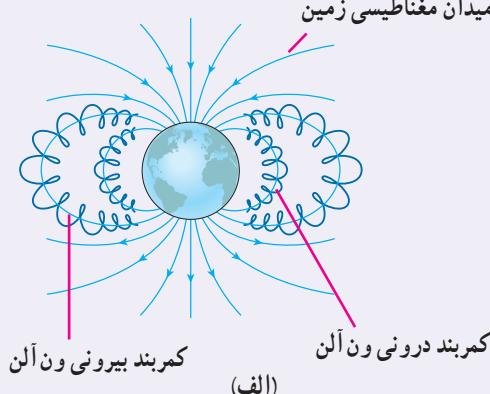
### پرسشن ۲-۳



الکترونی عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. با توجه به شکل، جهت میدان  $\vec{B}$  کدام است؟

بالا     راست     بروندرو     برونسو

## خوب است بدانید: کمربندهای تابشی و ن آلن



(ب) تصویری خیره‌کننده از شفق قطبی در نیمکره شمالی.  
در نیمکره جنوبی این پدیده شفق جنوبی نامیده می‌شود.

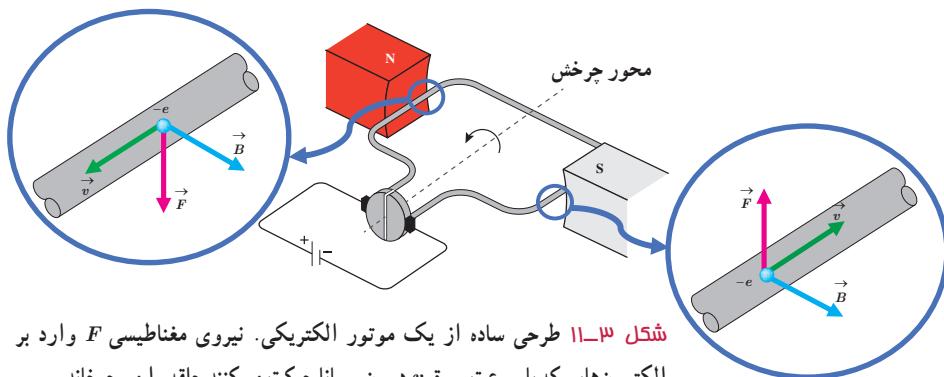
در بیرون از جو زمین، ذره‌های باردار بسیاری با تندی‌های بسیار زیادی در حرکت‌اند. این ذره‌های سریع را که معمولاً از جنس پروتون، هسته اتم هلیوم (ذره آلفا) و الکترون هستند پرتوهای کیهانی می‌نامند. این پرتوها افزون بر فضانوردان، برای سامانه‌های الکترونیکی واقع در فضا نیز خطرناک‌اند. خوشبختانه بیشتر این پرتوهای باردار توسط میدان مغناطیسی زمین منحرف می‌شوند و مانع از آسیب‌رسانی به موجودات و سامانه‌های روی زمین می‌شود. ذرات بارداری که در میدان مغناطیسی زمین به دام می‌افتد، کمربندهای تابشی و ن آلن را تشکیل می‌دهند (شکل الف).

این کمربندها در سال ۱۹۵۸ میلادی و بر اساس داده‌های گردآوری شده توسط ماهواره اکسپلور I کشف شده و به نام جیمز ون آلن (۲۰۰۶ – ۱۹۱۴) یکی از کاشفان آن، نام‌گذاری شدند. فضانوردان در فاصله‌های این بسیار پایین‌تر از این کمربندهای تابشی دور زمین می‌گردند.

هرگاه توفان‌های خورشیدی، ذره‌های باردار را به صورت فوران‌های عظیمی پرتاب کنند، بسیاری از آنها از تزدیکی زمین می‌گذرند و در کمربند و ن آلن به دام می‌افتد. شفق قطبی (نورهای شمالی) پدیده زیبایی است که براثر برخورد ذره‌های باردار موجود در کمربند و ن آلن با مولکول‌های جو زمین به وجود می‌آید (شکل ب).

## 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 دستگاه‌های نظریه‌جاروی برقی، مته برقی، آسیاب برقی، ماشین لباسشویی، پنکه و... را تشکیل می‌دهند. شکل ۱۱-۳ 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؟



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

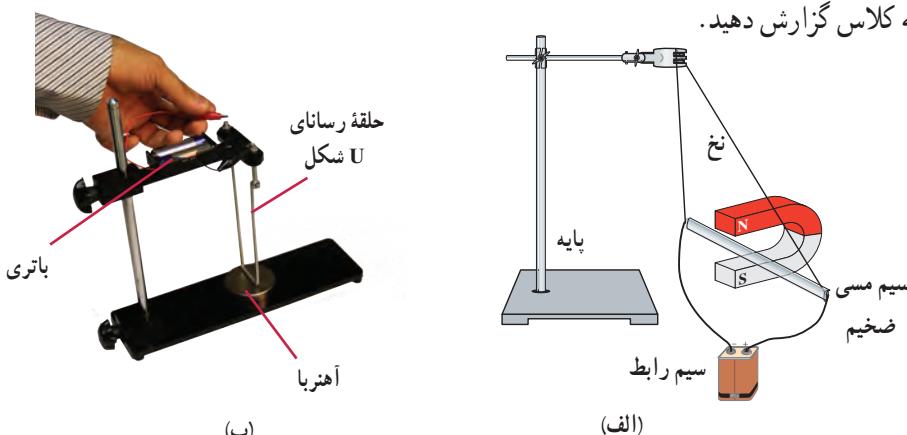
در هر موتور الکتریکی، سیم‌های وجود دارند که حامل جریان‌اند (یعنی بارهای الکتریکی در آنها در حرکت‌اند) و آهنرباها نیز وجود دارند که بر بارهای متحرک نیرو وارد می‌کنند. از این‌رو، بر هر سیم حامل جریان، نیروی مغناطیسی وارد می‌شود و این نیروها حلقه را می‌چرخاند.

### ۲-۳ آزمایش

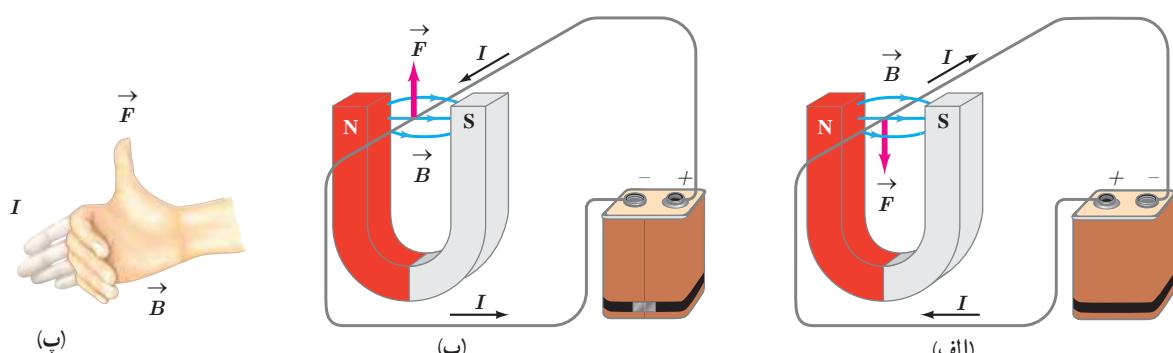
#### هدف: بررسی نیروی وارد بر سیم حامل جریان

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

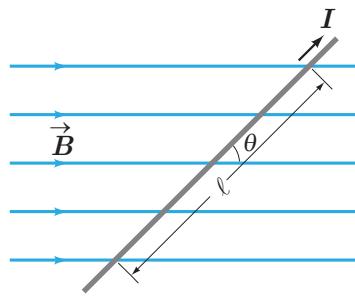
- مداری مطابق شکل الف بینید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، در گروه خود به بحث بگذارید.
- در صورتی که وسیله‌ای مشابه شکل ب را در آزمایشگاه مدرسه در اختیار دارید می‌توانید از آن استفاده کنید.
- مدار را قطع کنید و جهت جریان را تغییر داده و مراحل بالا را دوباره انجام دهید.
- نتیجه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



اورستد (فیزیکدان دانمارکی) با انجام آزمایش‌های شبیه آزمایش ۲-۳ و اندازه‌گیری نیروی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد: نیروی 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 قاعدة دست راست تعیین کرد (شکل ۱۲-۳).



شکل ۱۲-۳ (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. (پ) قاعدة دست راست برای تعیین جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی شکل (ب).



عامل‌های مؤثر بر نیروی مغناطیسی وارد بر سیم راست رسانای حامل جریان: آزمایش‌های 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:

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

شکل ۱۳-۱۴ سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی.

نیروی مغناطیسی وارد بر سیم درون سو (عمود بر صفحه کتاب و به طرف داخل) است.

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 ۱۳-۳).

### پرسش ۵-۳

اگر در شکل ۱۳-۳ 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؟

### مثال ۲-۳

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی  $G = 400$  در راستایی قرار دارد که با جهت میدان زاویه  $30^\circ$  می‌سازد. اگر جریان عبوری از سیم  $A = 5/0$  باشد، بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر  $m = 1/0$  از این سیم را حساب کنید.

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

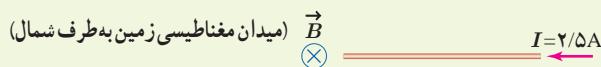
$$B = 400 \times 10^{-4} T, \theta = 30^\circ, I = 5/0 A \quad \text{و} \quad \ell = 1/0 m$$

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

$$F = I\ell B \sin\theta = (5/0 A)(1/0 m)(400 \times 10^{-4} T) \sin 30^\circ = 0/10 N$$

### تمرین ۲-۳

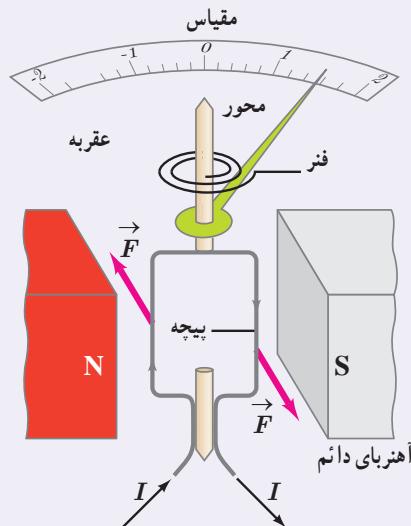
سیم مستقیمی به طول  $l = 2/4 m$  حامل جریان  $I = 2/5 A$  از شرق به غرب است. اندازه میدان مغناطیسی زمین در محل این سیم  $G = 45$  و جهت آن از جنوب به شمال است. اندازه و جهت نیروی مغناطیسی وارد بر این سیم را تعیین کنید.



### فعالیت ۳

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 ترازووهای دیجیتال (رقمی) با دقت  $1g$  استفاده کنید.

## خوب است بدانید: طرز کار گالوانومتر



طرحی ساده از یک گالوانومتر. برای سادگی، تنها یک حلقه از پیچه نشان داده شده است.

گالوانومتر وسیله‌ای است که با آن می‌توان جریان‌های الکتریکی سیار کوچک از مرتبه میکروآمپر را اندازه گرفت. با استفاده از مطالبی که تاکنون فراگرفته‌ایم، می‌توان ساز و کار گالوانومتر عقربه‌ای را مورد بررسی قرار داد.

هر گالوانومتر قابی دارد که دور آن سیمی پیچیده شده است. این پیچه در میدان مغناطیسی آهنربای دائمی قرار دارد. وقتی جریان از پیچه می‌گذرد، میدان مغناطیسی با وارد کردن نیرو به سیم‌های حامل جریان، گشتاوری ایجاد می‌کند که پیچه را می‌چرخاند (شکل رو به رو) و عقربه متصل به پیچه منحرف می‌شود. هر قدر جریان بزرگ‌تر شود، چرخش پیچه و انحراف عقربه بیشتر خواهد شد. اگر جهت جریان وارون شود، جهت چرخش پیچه و انحراف عقربه نیز وارون خواهد شد. با قطع جریان، فنر ظریف نشان داده شده در شکل، پیچه و عقربه را به حالت اولیه خود بر می‌گرداند. صفحه گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می‌چرخد را بر حسب یکای میکروآمپر مدرج می‌کنند.

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

تا اینجا بی‌بردیم که در فضای اطراف آهنرباهای دائمی میدان مغناطیسی وجود دارد. در ادامه این فصل با چشم‌های 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 ۱۴-۳). 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.



هans کرستیان اوستد (۱۷۷۷-۱۸۵۱) 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 شکل گیری نظریه الکترومغناطیس بود. اوستد که معمولاً در کلاس‌هایش به انجام آزمایش‌های بسیار می‌پرداخت، در یکی از روزهای سال ۱۸۲۰ میلادی، در حالی که مشغول آموخته‌کردن الکتریسیته و تولید جریان با پل الکتریکی بود، متوجه انحراف جهت عقربه قطب‌نمایی شد که در کنار سیم حامل جریان داشت. در اینجا تصور کرد که ممکن است جریان هوای پیرامون سیم حامل جریان سبب انحراف عقربه شده است، اما با انجام آزمایش‌های دقیق‌تر، به ارتباط مستقیم الکتریسیته و مغناطیس بی‌برد. به دنبال این کشف مهم، دانشمندان دیگری مهچون آمپر، فاراده، هائزی، ماکسول و هرتز تحقیقات در الکترومغناطیس را ادامه دادند. اوستد در حوزه فلسفه مطالعاتی داشت و همچنین یکی از دوستان تزدیک داستان‌نویس مشهور کودکان، هانس کرستیان آندرسن بود.

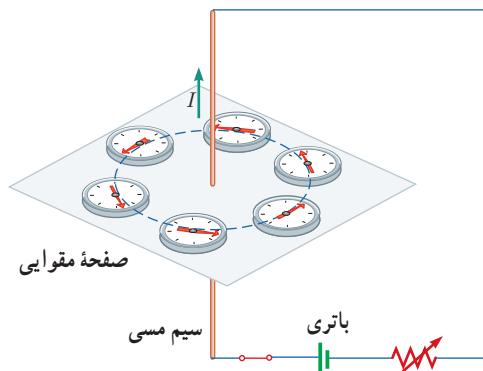


شکل ۱۴-۳ میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را می‌توان با قرار دادن تعدادی عقربه مغناطیسی پیرامون آن نشان داد.

## هدف: بررسی آثار مختانطیسی جریان الکتریکی (آزمایش اوستد)

و سیله‌های مورد نیاز: باتری، سیم مسی نسبتاً ضخیم، صفحه مقواپی، عقره مغناطیسی (قطب‌نما)، رئوستا و سیم رابط

## شرح آزمایش:



- سیم مسی را از صفحه مقواپی بگذرانید و با آن مداری مطابق شکل رویه را تشکیل دهید.

- قبل از برقراری جریان الکتریکی، عقره مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرار گرفتن آن توجه کنید.

- با وصل کردن مدار، جریان الکتریکی را از سیم مسی عبور دهید و به جهت گیری عقره مغناطیسی توجه کنید.

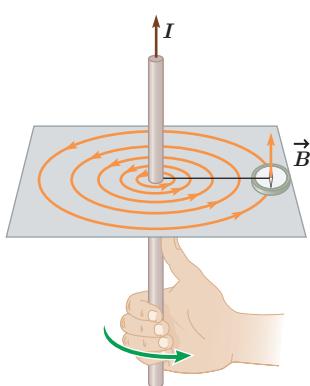
- عقره مغناطیسی را در نقطه‌های مختلف روی مقوا قرار دهید و جهت آن را بررسی کنید.

- با توجه به جهت گیری عقره در نقاط مختلف صفحه مقواپی، چند خط میدان مغناطیسی را رسم کنید.

- این آزمایش را با دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.

- به کمک چند باتری دیگر یا تغییر مقاومت رئوستا، 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.

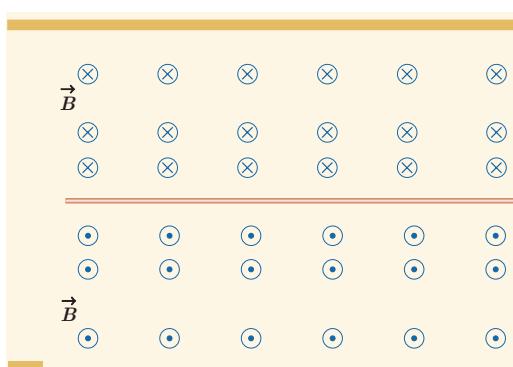


با انجام این آزمایش می‌بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان، مطابق شکل ۱۵-۳ به صورت دایره‌های هم مرکز در اطراف سیم حامل جریان هستند. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم مستقیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقره مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن، با استفاده از قاعدة دست راست نیز می‌توان این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

شکل ۱۵-۳ قاعدة دست راست برای تعیین

جهت  $\vec{B}$  اطراف سیم بلند مستقیم حامل جریان.

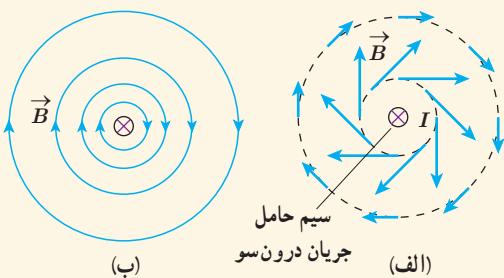
## پوشنچه ۳-۶



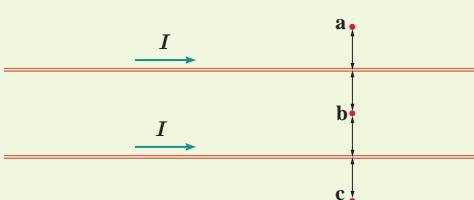
شکل رویه را، جهت میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم افقی و مستقیم حامل جریان را نشان می‌دهد. در ناحیه بالای سیم، جهت میدان مغناطیسی درون سو و در ناحیه پایین آن برون سو است. جهت جریان را در سیم تعیین کنید.

## پرسش ۲-۳

دربافت 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.



## تمرین ۲-۳



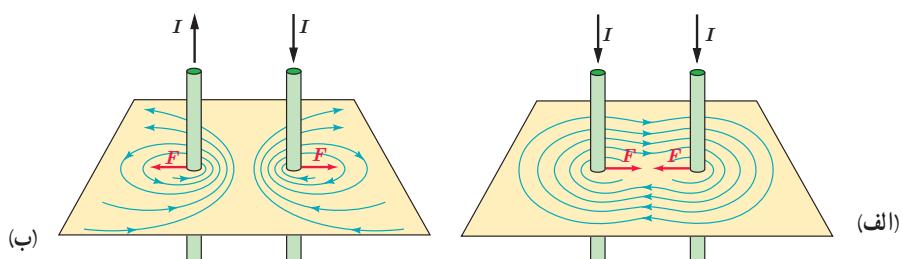
جهت میدان مغناطیسی برایند (خالص) را ناشی از سیم‌های موازی و بلند حامل جریان را در هر یک از نقطه‌های a، b و c پیدا کنید. نقطه b در فاصله مساوی از دو سیم قرار دارد.

## فتاویر و کاربرد: میدان‌های مغناطیسی بدن



تمام یاخته‌های زنده بدن انسان به طور الکتریکی فعال‌اند. جریان‌های الکتریکی ضعیف در بدن، میدان‌های مغناطیسی ضعیف ولی قابل اندازه‌گیری تولید می‌کنند. اندازه میدان‌های حاصل از عضله‌های اسکلتی کوچک‌تر از  $T^{-10}$ ، یعنی در حدود یک میلیونیم میدان مغناطیسی زمین است. میدان‌های مغناطیسی حاصل از مغز بسیار ضعیفتر و در حدود  $T^{-12}$  هستند و برای اندازه‌گیری آنها باید مغناطیس سنج‌های بسیار حساس به کار برد. در حال حاضر، چنین مغناطیس سنج‌هایی به نام اسکویید<sup>۱</sup> ساخته شده‌اند. شکل رو به رو 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 ۴-۳ با نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان آشنا شدیم. حال فرض کنید برای تولید میدان مغناطیسی به جای آهن‌با، از یک سیم حامل جریان استفاده کیم. اگر سیم حامل جریان دیگری را در تزدیکی 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 را بایشی است (شکل ۳-۱۶ الف). همچنین اگر جریان‌ها در دو جهت مخالف از دو سیم موازی بگذرند، نیروی بین آنها را نشی است (شکل ۳-۱۶ ب).



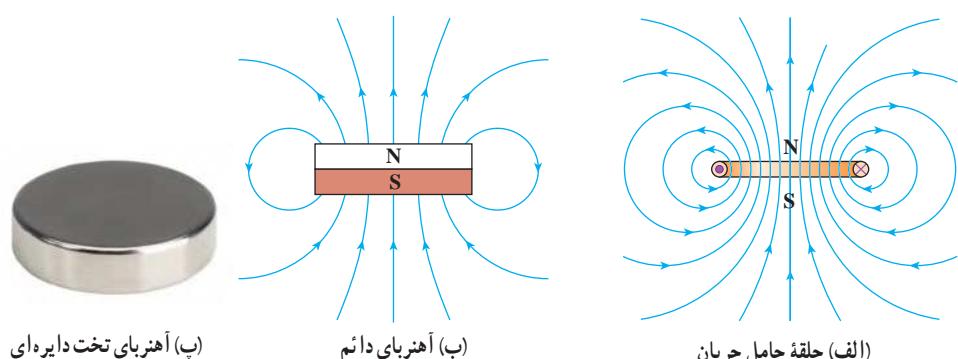
شکل ۱۷-۱۶ برآیند میدان مغناطیسی حاصل از دو سیم حامل جریان و نیروی بین آنها.  
الف) برای جریان‌های همسو، رباشی است و (ب) برای جریان‌های ناهمسو، رانشی است.

میدان مغناطیسی ناشی از یک حلقهٔ دایره‌ای حامل جریان : شکل ۱۷-۳ الف خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف یک حلقهٔ رسانای دایره‌ای نشان می‌دهد که حامل جریان  $I$  است. همان‌طور که دیده می‌شود خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیهٔ داخل حلقه به یکدیگر تزدیک‌ترند؛ 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 قاعدةٔ دست راست به روش نشان داده شده در شکل ۱۷-۳ پ تعیین کرد.



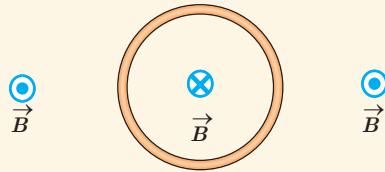
شکل ۱۷-۱۷ (الف) خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک حلقهٔ حامل جریان. (ب) طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقهٔ حامل جریان با استفاده از برآده آهن. (پ) استفاده از قاعدةٔ دست راست برای تعیین جهت  $\vec{B}$  یک حلقهٔ حامل جریان.

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



شکل ۱۸-۱ حلقهٔ حامل جریان دو قطب دارد و میدان مغناطیسی آن مانند یک آهنربای دائم تخت دایره‌ای شکل است.

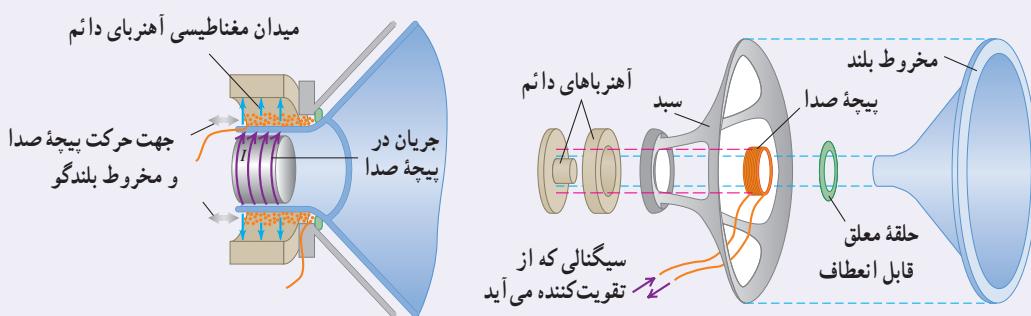
## پرسشن ۲-۳



شکل رویه‌رو، 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 متدالن 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 تقویت کننده می‌آید هم از نظر جهت و هم از نظر بزرگی نوسان می‌کند. پیچه و مخروط بلندگو که به آن متصل است با دائمهای متناسب با دائمه جریان در پیچه، نوسان می‌کند. با افزایش جریان تقویت کننده، دائمه‌های نوسان و موج صوتی حاصل از حرکت مخروط افزایش می‌یابد.

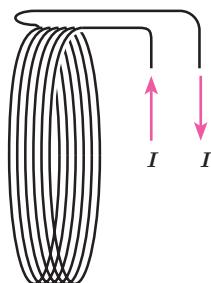


جزای یک بلندگو. آهنربای دائمی میدان مغناطیسی‌ای تولید می‌کند که نیروهایی بر جریان‌هایی که از پیچه صدا می‌گذرد وارد می‌کند؛ برای جریان  $I$  که در شکل نشان داده شده است نیرو به طرف راست است. اگر جریان الکتریکی در پیچه صدا نوسان کند، مخروط بلندگو که متصل به پیچه صداست با همان سامد نوسان می‌کند.

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

اندازه میدان مغناطیسی در مرکز حلقه‌ای به شعاع  $R$  که حامل جریان است از رابطه  $B = \mu_0 \frac{NI}{2R}$  به دست می‌آید. که در آن  $\mu_0$  تراوایی مغناطیسی خلا و برابر  $A \times 10^{-7} T.m/A$  است. اگر به جای یک تک حلقه، پیچه‌ای شامل  $N$  حلقه نزدیک به هم و با شعاع یکسان  $R$  داشته باشیم، آنگاه اندازه میدان مغناطیسی در مرکز این پیچه، که معمولاً به آن پیچه مسطح نیز گفته می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید:

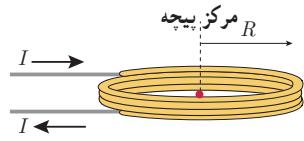
$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R} \quad (5-3)$$



شکل ۳-۱۹ پیچه

دلیل آنکه برای تولید میدان‌های مغناطیسی قوی بهجای تک حلقه از پیچه‌ای از حلقه‌ها استفاده می‌شود همین ضریب  $N$  در رابطه ۳-۵ است.

## مثال ۳



از پیچه مسطحی به شعاع  $6/28\text{ cm}$  که از  $200$  دور سیم نازک درست شده است، جریان  $20\text{ mA}$  می‌گذرد (شکل روبرو). اندازه میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه به دست آورید.

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

$$R = 6/28 \times 10^{-2}\text{ m}, \quad N = 2000, \quad I = 20 \times 10^{-3}\text{ A}, \quad B = ?$$

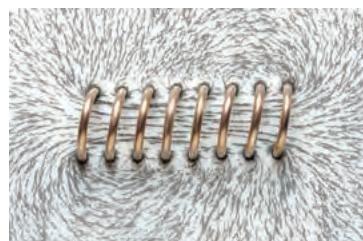
با جایگذاری این داده‌ها در رابطه ۳-۵ داریم:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\text{ T.m/A})(2000)(20 \times 10^{-3}\text{ A})}{2(6/28 \times 10^{-2}\text{ m})} = 4/0 \times 10^{-4}\text{ T} = 4/0\text{ G}$$

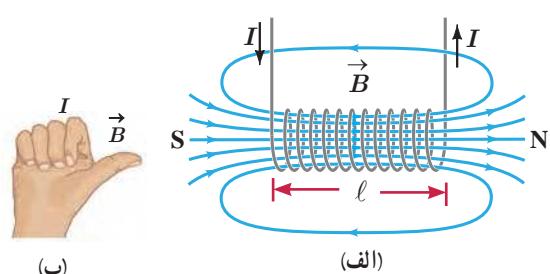
## تمرین ۳-۴

اندازه میدان مغناطیسی دور سر انسان حدود  $3 \times 10^{-8}\text{ G}$  است. اگرچه جریان‌هایی که این میدان را به وجود می‌آورند بسیار پیچیده‌اند، ولی با در نظر گرفتن این جریان‌ها به صورت تک حلقه‌ای دایره‌ای به قطر  $16\text{ cm}$  (پهنه‌ای یک سر نوعی) می‌توان مرتبه بزرگی میدان مغناطیسی را تخمین زد. جریان لازم برای ایجاد این میدان در مرکز حلقه چقدر است؟

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. همان‌گونه 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، به‌ویژه 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 قاعدة دست راست که در شکل نشان داده شده است تعیین می‌شود (شکل ۳-۲۰ ب).



(ب)



شکل ۳-۲۰ (الف) میدان مغناطیسی یک سیم‌لوله حامل جریان. (ب) تعیین جهت میدان به کمک قاعدة دست راست. (پ) طرح خط‌های میدان مغناطیسی سیم‌لوله با استفاده از برآده 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:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{\ell} \quad (\text{سیم‌لوله آرمانی}) \quad (6-3)$$

در این رابطه،  $I$  جریان عبوری،  $\ell$  طول سیم‌لوله و  $N$  تعداد دورهای سیم‌لوله است.

### مثال ۳

سیم‌لوله‌ای آرمانی به طول ۱۵cm دارای ۶۰ حلقه سیم تزدیک به هم است. اگر جریان ۸۰mA 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:

$$\ell = 15\text{cm} = 0.15\text{m}, \quad N = 600, \quad I = 80\text{mA} = 80 \times 10^{-3}\text{A}, \quad B = ?$$

به این ترتیب داریم:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{\ell} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\text{T.m/A})(800)(80 \times 10^{-3}\text{A})}{0.15\text{m}} \approx 40 \times 10^{-3}\text{T} = 40\text{G}$$

### تمرین ۳

سیم‌لوله‌ای آرمانی به طول ۴۰cm چنان طراحی شده است که جریان بیشینه‌ای بهشدت  $1/2\text{A}$  می‌تواند از آن بگذرد. با عبور این جریان از سیم‌لوله، اندازه میدان مغناطیسی درون آن و دور از لبه‌ها  $27^\circ\text{G}$  می‌شود. تعداد دورهای سیم‌لوله چقدر باید باشد؟

### فعالیت ۳

آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان با استفاده از برآده 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.



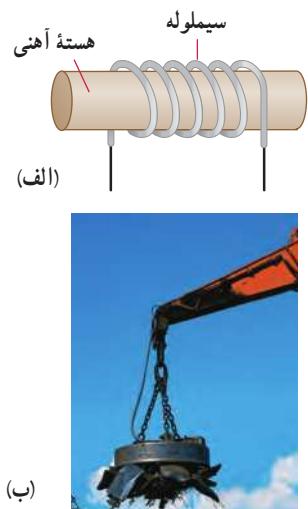
(پ)



(ب)



(الف)



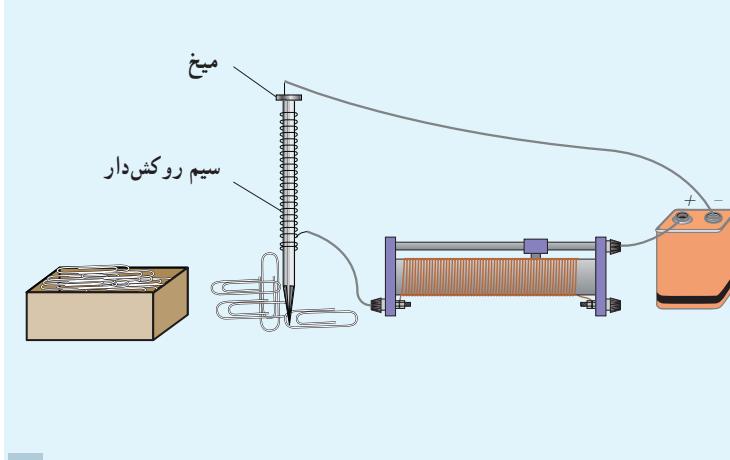
شکل ۳-۱ (الف) سیم‌لوه با هسته آهنی.  
(ب) آهنربای الکتریکی صنعتی

سیم‌لوه با هسته آهنی – آهنربای الکتریکی : شکل ۲۱-۳ ۲۱ الف سیم‌لوه‌ای با یک هسته آهنی را نشان می‌دهد. وقتی جریانی در سیم‌لوه برقرار می‌شود، میدان مغناطیسی سیم‌لوه، در هسته آهنی خاصیت مغناطیسی القا می‌کند و هسته آهنی، آهنربا می‌شود. این آهنربا را آهنربای الکتریکی می‌نامند. آهنربای الکتریکی صنعتی (شکل ۲۱-۳ 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 سیم‌لوه و جریانی که از آن می‌گذرد بیشتر باشد، آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود. وجود هسته آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیم‌لوه می‌شود. میدان مغناطیسی سیم‌لوه بدون هسته آهنی به قدری ضعیف است که در عمل کاربردهای کمی دارد.

### فعالیت ۳-۶

قسمتی از سیم نازک روکش‌داری را دور میخ  
آهنی نسبتاً بلندی بسیجید و مداری مطابق شکل  
تشکیل دهید. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان  
عبوری از مدار را تغییر دهید.

(الف) 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؟



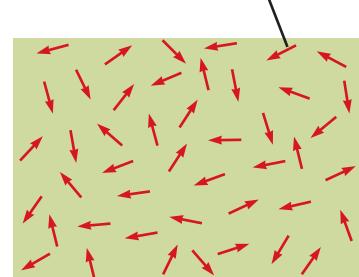
### ۳-۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

رفتار آهنرباهای دائمی، نوارهای مغناطیسی پشت کارت‌های بانکی و دیسک‌های رایانه‌ای به طور مستقیم به ویژگی‌های مغناطیسی مواد بستگی دارد. هنگامی که اطلاعاتی روی نوار مغناطیسی پشت کارت‌های بانکی یا یک دیسک رایانه‌ای ذخیره می‌شود آرایه‌ای از هزاران هزار آهنربای دائمی میکروسکوپی روی نوار مغناطیسی پشت کارت یا دیسک ایجاد می‌شود. در این بخش، برخی ویژگی‌های مغناطیسی مواد را بررسی می‌کنیم.

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

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

هر ذره سازنده مواد پارامغناطیسی یک آهنربای میکروسکوپی است.



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

## فعالیت ۷-۳



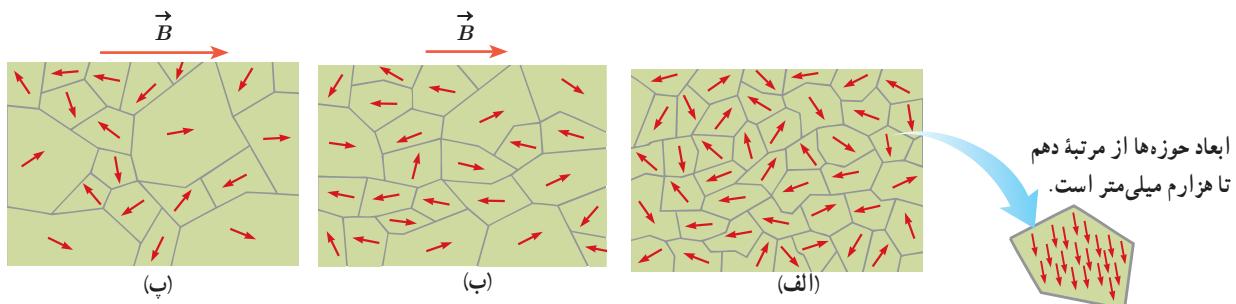
یک لوله آزمایش را تا نزدیکی لبه آن از الكل طبی (اتانول ۹۶ درجه) بر کنید. در لوله را بیندید و آن را به طور افقی قرار دهید. مطابق شکل، یک آهنربای نئودیمیم را بالای حباب هوای درون لوله بگیرد و به آرامی آهنربا را حرکت دهید. دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به گفت و گو بگذارید.

**مواد دیامغناطیسی :** اتم‌های مواد دیامغناطیسی، نظیر مس، نقره، سرب و بیسموت، به طور ذاتی فاقد خاصیت مغناطیسی‌اند. به عبارت دیگر، هیچ یک از اتم‌های این مواد، دارای دوقطبی مغناطیسی خالصی نیستند. با وجود این، حضور میدان مغناطیسی خارجی، می‌تواند سبب القای دوقطبی‌های مغناطیسی در خلاف سوی میدان خارجی، در مواد دیامغناطیسی شود. در فصل بعد با دلایل این موضوع، با تفصیل بیشتری آشنا خواهید شد.

**مواد فرومغناطیسی :** نوع دیگری از مواد به نام مواد فرومغناطیسی وجود دارد که اتم‌های آنها به طور ذاتی دارای دوقطبی مغناطیسی هستند. آهن، نیکل، کبالت و بسیاری از آلیاژهای دارای این عنصرها فرومغناطیسی‌اند. برهم‌کنش‌های قوی بین دوقطبی‌های مغناطیسی در این مواد موجب می‌شود که این دوقطبی‌ها، حتی در نبود میدان خارجی، در ناحیه‌هایی که حوزه‌های مغناطیسی نامیده می‌شود، همسو شوند. نمونه‌ای از ساختار حوزه‌ها در مواد فرومغناطیسی در شکل ۲۳-۳ الف نشان داده شده است. درون هر حوزه تقریباً از مرتبه ۱۰<sup>۱۱</sup> اتم وجود دارد که دوقطبی‌های مغناطیسی وابسته به آنها هم جهت‌اند.

مواد فرومغناطیسی را می‌توان با قرار دادن در یک میدان مغناطیسی، آهنربا کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی بر حوزه‌های مغناطیسی باعث می‌شود که دوقطبی‌های 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

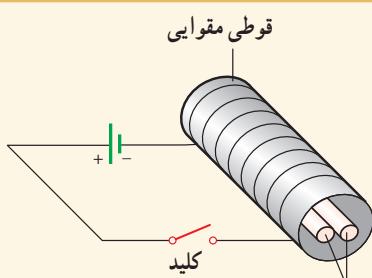
که سمت‌گیری آنها در راستای میدان نیست، کم می‌شود. در این فرایند، مرز بین بیشتر حوزه‌ها جایه‌جا می‌شود، و ماده خاصیت آهنربای پیدا می‌کند. شکل ۲۳-۳ ب یک ماده فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی ضعیف و شکل ۲۳-۳ پ در یک میدان مغناطیسی خارجی قوی تر نشان می‌دهد.



شکل ۲۳-۳ (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 فرمغناطیسی، در حضور میدان مغناطیسی خارجی به سهولت تغییر می‌کند و ماده به سادگی آهنربا می‌شود و با حذف میدان خارجی نیز، خاصیت آهنربایی خود را به آسانی از دست می‌دهد. این مواد را مواد **فرومغناطیسی نرم** می‌نامند. از این مواد در ساخت هسته پیچه‌ها و سیم‌ولوهای استفاده می‌شود. مواد فرمغناطیسی نرم برای ساختن آهنرباهای الکترونیکی (آهنرباهای غیردادئم) نیز مناسب‌اند (چرا؟). برخی مواد دیگر مانند فولاد (آهن به اضافه ۲ درصد کریم)، آلیاژهای آهن، کبات 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 دوقطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها پس از حذف میدان خارجی، تا مدت زمان زیادی، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، پس از حذف میدان خارجی، ماده فرمغناطیسی سخت، خاصیت آهنربایی خود را تا اندازه قابل توجهی حفظ می‌کند. به همین دلیل، این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب‌اند. برای خاصیت آهنربایی هر ماده فرمغناطیسی، مقدار اشباع یا بیشینه‌ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی به وجود می‌آید که ماده فرمغناطیسی در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد؛ به طوری که در صد بالای از دوقطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها به موازات یکدیگر هم خط شوند. به عبارت دیگر، حجم حوزه‌هایی که با میدان مغناطیسی خارجی همسو هستند، به بیشترین مقدار خود برسد.

### پرسشن ۲-۹



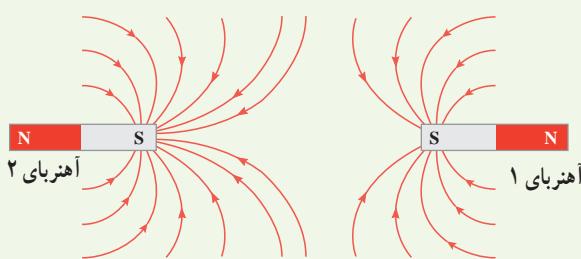
دو میله فلزی بلند مطابق شکل رو به رو درون سیم‌وله‌ای که دور یک قوطی مقوای پیچیده شده است قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از این سیم‌وله، مشاهده می‌شود که دو میله از یکدیگر دور می‌شوند. وقتی کلید باز و جریان در مدار قطع می‌شود، میله‌ها به محل اولیه باز می‌گردند.

(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 الف) آهنربای میله‌ای با قطب‌های نامشخص در اختیار داریم. دست کم دو روش را برای تعیین قطب‌های این آهنربای بیان کنید.

ب) خطوط میدان مغناطیسی بین دو آهنربای در شکل زیر نشان داده شده است. اندازه میدان مغناطیسی را در نزدیکی قطب‌های آهنربایها با هم مقایسه کنید.



۴ کودکی یک قطعه کوچک آهنی را بلعیده است. پزشک می‌خواهد آن را با دستگاه شکل زیر بیرون بیاورد.

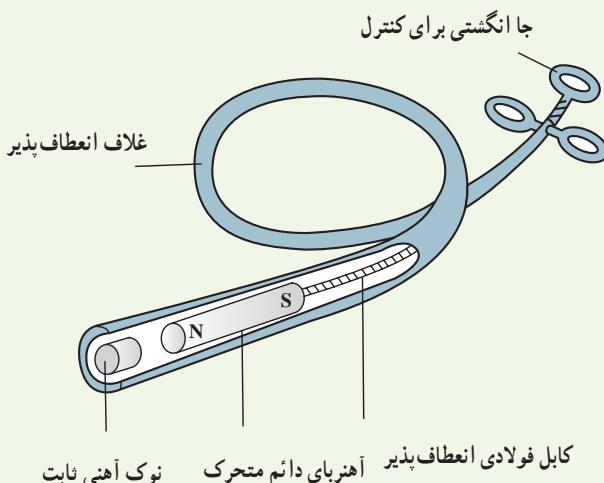
الف) هنگامی که آهنربای دائمی به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟

ب) ساختن نوک ثابت آهن چه مزیتی دارد؟

پ) این وسیله را باید به درون گلوی کودک وارد و به سوی فلز

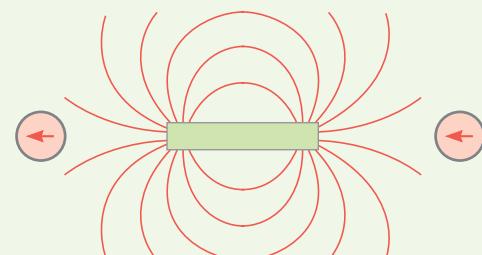
بلعیده شده هدایت کرد؛ چرا غلاف باید انعطاف‌پذیر باشد؟

ت) پزشک می‌خواهد یک گیره آهنی کاغذ و یک واشر آلومینیومی را از گلوی کودک بیرون بیاورد؛ کدام یک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟



## ۱-۳ و ۲-۲ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی و میدان مغناطیسی

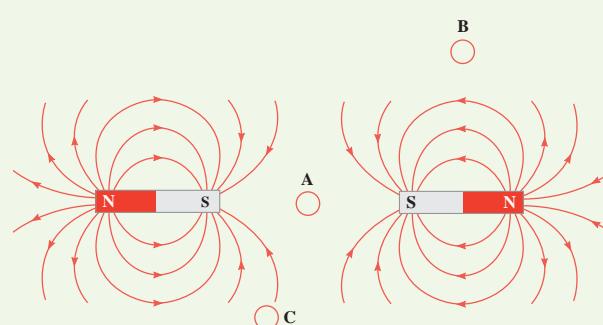
۱ با توجه به جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی در شکل زیر، قطب‌های آهنربای میله‌ای و جهت خطوط میدان مغناطیسی را تعیین کنید.



۲ شکل زیر، خطوط میدان مغناطیسی را در نزدیکی دو آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد.

الف) درباره میدان مغناطیسی در نقطه A چه می‌توان گفت؟

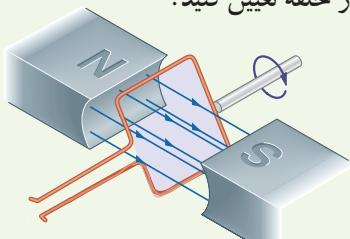
ب) با رسم شکل نشان دهید عقربه قطب‌نما در نقطه‌های B و C به ترتیب در کدام جهت قرار می‌گیرد؟



پ) اگر مانند شکل زیر یکی از آهنربایها را بچرخانیم تا جای قطب‌های آن عوض شود، خطوط میدان مغناطیسی را در ناحیه نقطه چین رسم کنید.



۸ حلقة رسانای مستطیل شکلی که حامل جریان  $I$  است، مطابق شکل درون میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد. جهت جریان را در حلقة تعیین کنید.



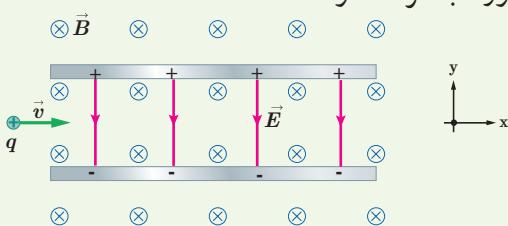
۹ پروتونی با تندی  $4 \times 10^6 \text{ m/s}$  درون میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه  $18 \text{ mT}$  در حرکت است. جهت حرکت پروتون با جهت  $\vec{B}$ ، زاویه  $60^\circ$  می‌سازد.

(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  $C = 1.6 \times 10^{-19}$  و جرم آن  $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$  در نظر بگیرید).

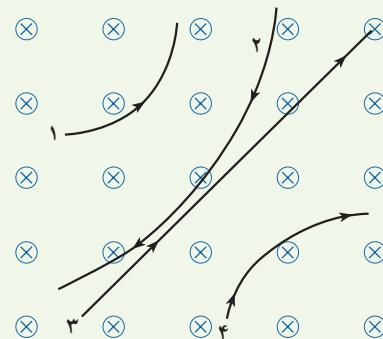
۱۰ الکترونی با تندی  $2 \times 10^5 \text{ m/s}$  درون میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. اندازه نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکtron وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند.

(الف) اگر جهت این نیرو بیشینه، رو به بالا و اندازه آن برابر  $6 \times 10^{-14} \text{ N}$  باشد، اندازه و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید.  
(ب) اندازه میدان الکتریکی چقدر باشد تا همین نیرو را ایجاد کند؟

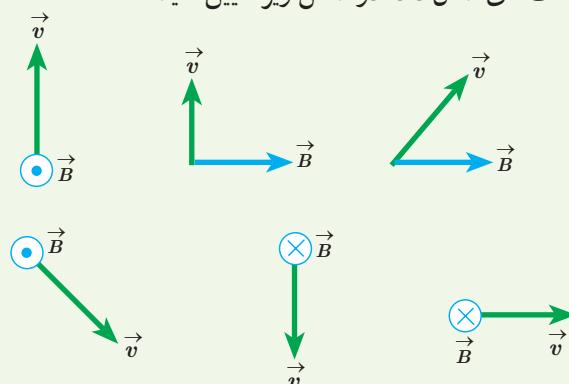
۱۱ ذره باردار مثبتی با جرم ناچیز و با سرعت  $\vec{v}$  در امتداد محور  $x$  وارد فضای می‌شود که میدان‌های یکنواخت  $\vec{E}$  و  $\vec{B}$  وجود دارد (شکل زیر). اندازه این میدان‌ها برابر  $E = 45 \text{ N/C}$  و  $B = 18 \text{ T}$  است. تندی ذره چقدر باشد تا در همان امتداد محور  $x$  به حرکت خود ادامه دهد؟



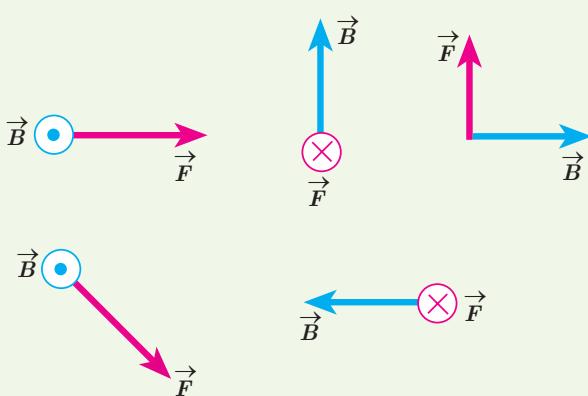
۳-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذره باردار متوجه در میدان مغناطیسی  
۵ چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون سو مسیرهای مطابق شکل زیر می‌یابایند. درباره نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟



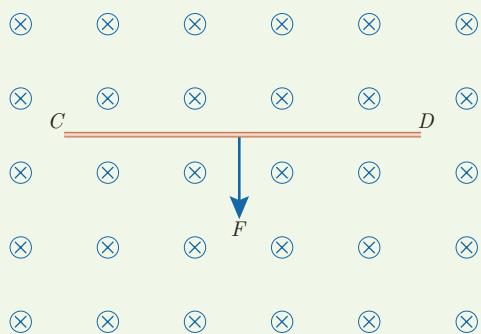
۶ جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هر یک از حالت‌های نشان داده در شکل زیر تعیین کنید.



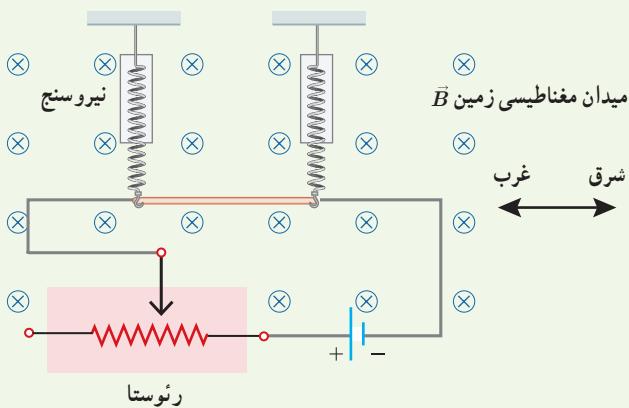
۷ نیروی مغناطیسی  $\vec{F}$  وارد بر الکترونی که در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  در حرکت است، در شکل زیر، نشان داده شده است. فرض کنید راستای حرکت الکترون بر میدان مغناطیسی عمود است؛ در هر یک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید.



مقدار جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.

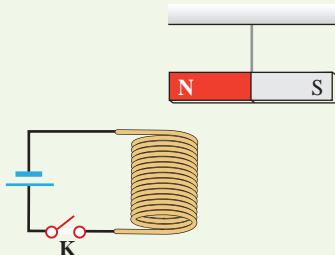


- ۱۵ یک سیم حامل جریان  $1/6$  آمپر مطابق شکل زیر با دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به طور افقی و در راستای غرب–شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را یکنواخت، به طرف شمال و اندازه  $5\text{mT}$  و  $100\%$  بگیرید.  
 (الف) اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را بیندا کنید.  
 (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  $8\text{ g}$  است ( $\text{g} = 9.8\text{N/kg}$ ).



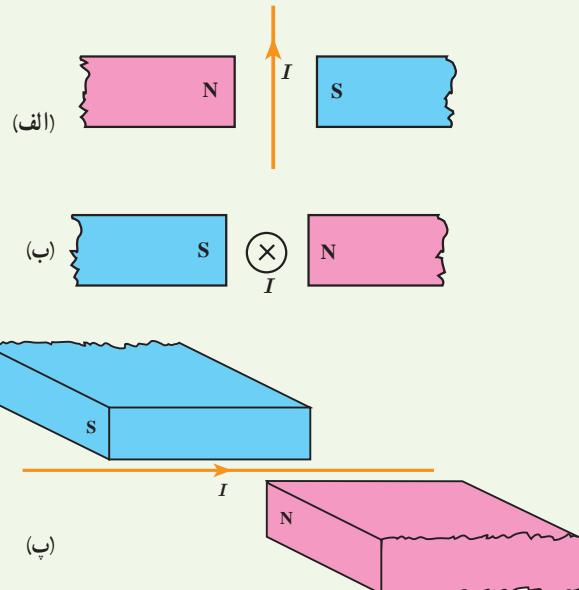
### ۴-۳ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

- ۱۶ یک آهنربای میله‌ای مطابق شکل زیر، بالای سیم‌لوله‌ای آویزان شده است. توضیح دهید با بستن کلید K چه تغییری در وضعیت آهنربا رخ می‌دهد.

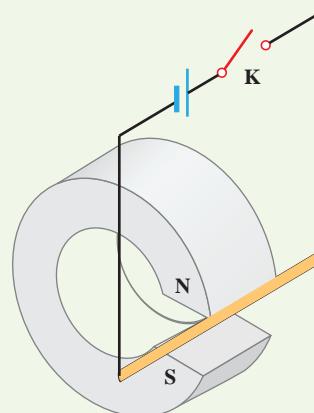


### ۴-۴ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان

- ۱۷ جهت نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های الف، ب و پ با استفاده از قاعدة دست راست بیابید.

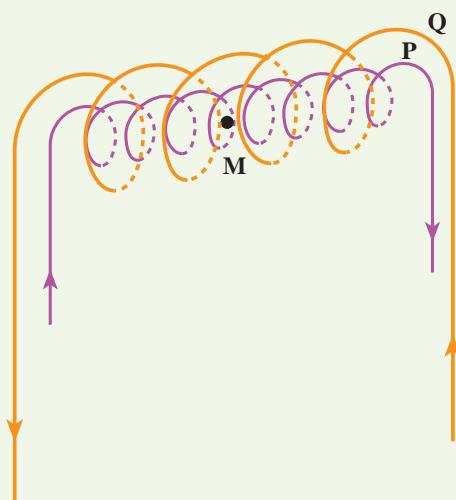


- ۱۸ یک میله رسانا به پایانه‌های یک باتری وصل شده و مطابق شکل در فضای بین قطب‌های یک آهنربای C شکل آویزان شده است و می‌تواند آزادانه نوسان کند. با بستن کلید K، چه اتفاقی برای میله رسانا رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.



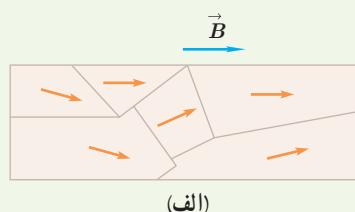
- ۱۹ سیم رسانای CD به طول  $2\text{ m}$  مطابق شکل زیر عمود بر میدان مغناطیسی درون سو با اندازه  $5\text{T}$  قرار گرفته است؛ اگر اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر سیم برابر  $1\text{ N}$  باشد، جهت و

۲۱ 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 سیم‌لوله P چه جریانی باید عبور کند تا برایند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیم‌لوله در نقطه M (روی محور دو سیم‌لوله) صفر شود؟

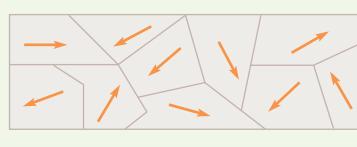


### ۶-۳ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

۲۲ 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.

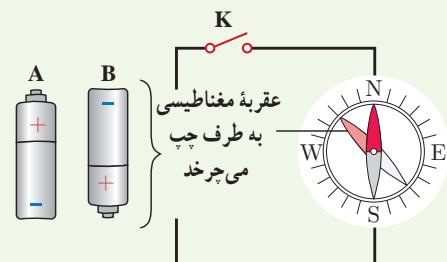


(الف)

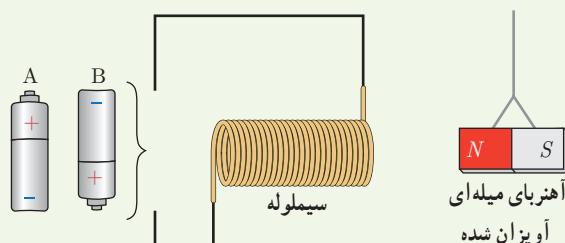


(ب)

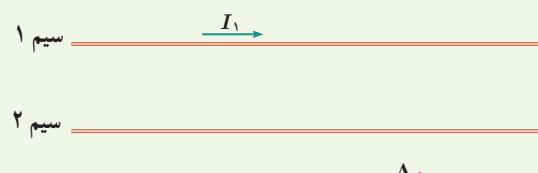
۱۷ کدام باتری را در مدار شکل زیر قرار دهیم تا پس از بستن کلید K، عقربه قطب‌نما که روی سیم قرار دارد، در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت شروع به چرخش کند؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.



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

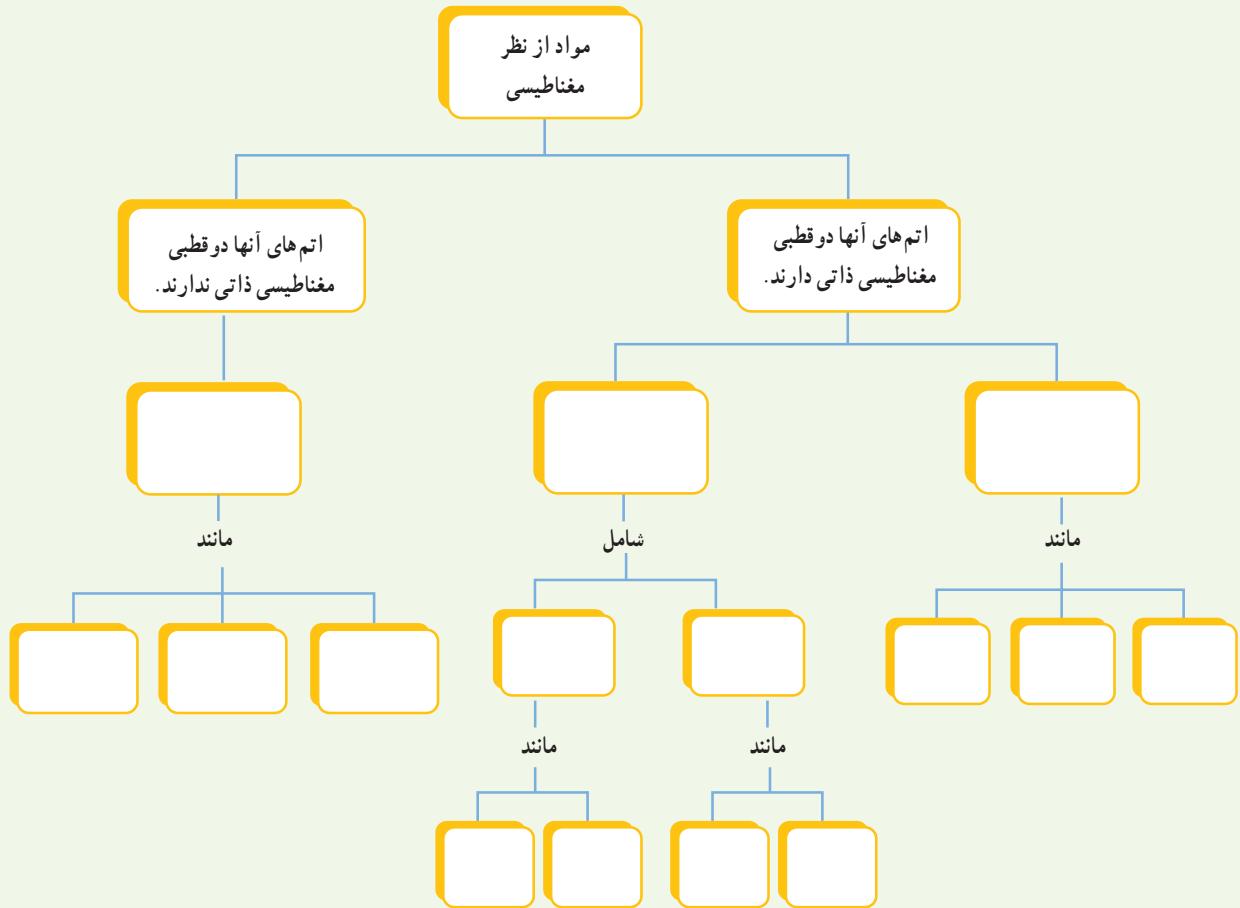


۱۹ شکل زیر، دو سیم موازی و بلند حامل جریان را نشان می‌دهد. اگر میدان مغناطیسی برایند حاصل از این سیم‌ها در نقطه A صفر باشد، جهت جریان آن را در سیم ۲ پیدا کنید.



۲۰ سیم‌لوله‌ای شامل  $250$  حلقه است که دور یک لوله پلاستیکی توخالی به طول  $14/0$  متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیم‌لوله  $8A/0$  باشد، اندازه میدان مغناطیسی درون سیم‌لوله را حساب کنید.

با توجه به آنچه در بخش ویژگی‌های مغناطیسی مواد دیدید،  
نقشه مفهومی زیر را کامل کنید.





## القای الکترومغناطیسی و جريان متناوب



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

در فصل قبل، 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 تولید جریان الکتریکی است. در این فصل، پس از آشنایی با این قانون، به چگونگی تولید جریان متناوب خواهیم پرداخت.

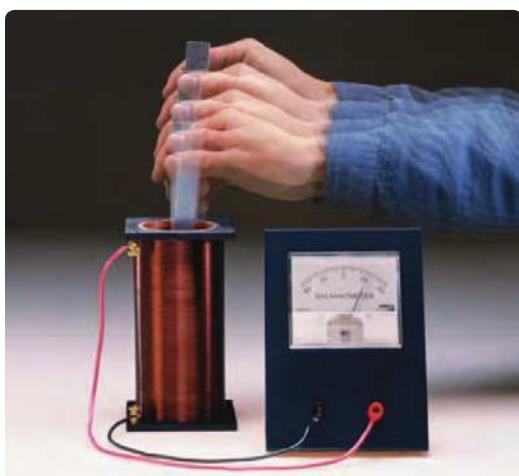
#### ۱-۱ پدیده القای الکترومغناطیسی

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.

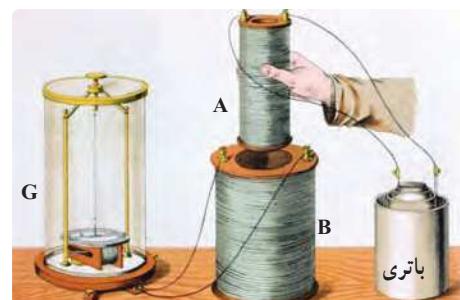
#### ۱-۱ آزمایش

##### هدف: بررسی پدیده القای الکترومغناطیسی

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



- دو سر سیم‌لوله را به گالوانومتر بیندید.
- یکی از قطب‌های آهنربا را وارد سیم‌لوله کنید (شکل رو به رو). 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.



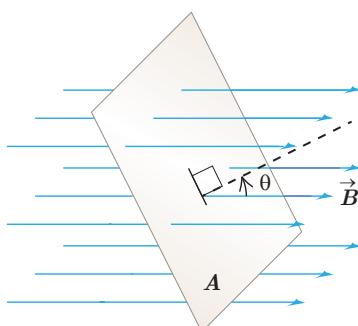
در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فاراده دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۱-۱ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ درست مانند وقتی که در مدار، باتری وجود دارد (شکل ۱-۱). این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند.

**شکل ۱-۱** فاراده برای بی‌بردن 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.



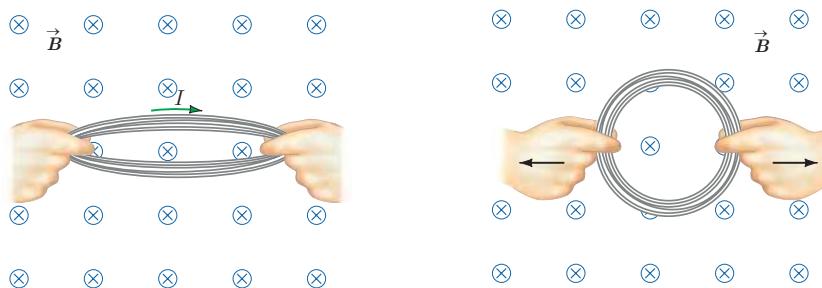
مایکل فاراده (۱۷۹۱–۱۸۶۷)

مایکل فاراده، پسر یک آندرگر انگلیسی بود. به گفتهٔ خود او: «تحصیلات من بسیار معمولی بود. خواندن را کمی بیشتر از حد مقدماتی و نوشن 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 سیرهمفری دیوی، شیمی دان مشهور (۱۷۷۸–۱۸۲۹)، که در مؤسسهٔ سلطنتی لندن برگزار می‌شد، حضور یابد. مؤسسهٔ سلطنتی یک مرکز مهم پژوهش و آموزش علوم بود. فاراده به شدت علاقه‌مند علم شد و پیش خود به تحصیل علم شیمی برداخت. در سال ۱۸۱۳ تقاضای شغلی در مؤسسهٔ سلطنتی کرد و دیوی او را به عنوان یک همکار در امور پژوهشی استخدام کرد. فاراده به زودی نویغ خود را به عنوان یک آزمایشگر نشان داد. وی مقاله‌های مهمی در شیمی، خواص مغناطیسی، الکتریسیته و نور نوشت و سرانجام به عنوان رئیس مؤسسهٔ سلطنتی برگزیده شد. فاراده را به سبب کشف‌های بسیارش یکی از بزرگ‌ترین داشمندان تجربی عصر خود می‌دانند.



شکل ۴-۱۵ نیم خط عمود بر سطح، با میدان یکنواخت  $\vec{B}$  زاویه  $\theta$  می‌سازد.

پیش از این دیدیم که با تغییر اندازه میدان در محل سیم‌لوه، جریان در آن القای شود. به جز این روش، به روش‌های دیگری نیز می‌توان در پیچه یا سیم‌لوه، جریان الکتریکی القای کرد. اگر مساحت پیچه‌ای انعطاف‌پذیر را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  تغییر دهیم (شکل ۴-۲)، یا پیچه‌ای را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  بچرخانیم (شکل ۴-۳)، مشاهده می‌شود که در هنگام انجام این کارها، جریانی در پیچه القای شود.



شکل ۴-۲ تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$ ، جریانی در پیچه القای کند.



شکل ۴-۳ 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.

## ۴-۲ 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 القای می‌شود. عامل اساسی و مشترک در ایجاد جریان القایی در همه این آزمایش‌ها، **تغییر شار مغناطیسی** عبوری از پیچه است.

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

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (4-1)$$

همان‌طور که در شکل ۴-۴ 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، وبر (Wb) است که با توجه به رابطه  $1\text{ Wb} = 1\text{ T} \times 1\text{ m}^2$  داریم:

**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 ۴-۴ 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 بکی را انتخاب کنیم و تا پایان آن را تغییر ندهیم.

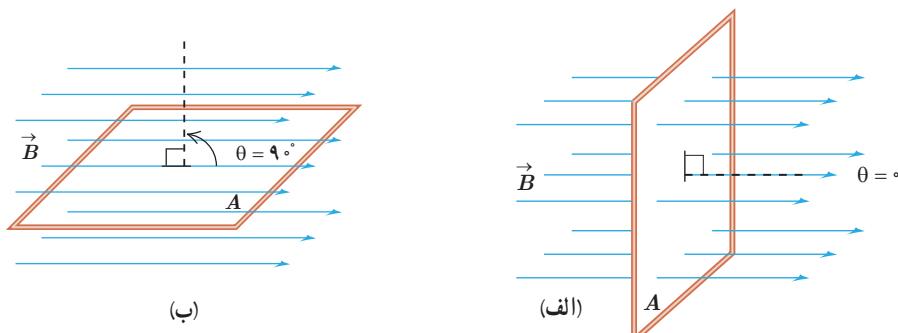
### مثال ۱۴-۱

(الف) مطابق شکل الف، سطح حلقه رسانایی، به شکل مریع با ضلع  $20\text{ cm}$ ، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی  $25\text{ G}$  قرار دارد. شار عبوری از این حلقه را بدست 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 بدست آورید.

(ت) اگر این تغییر شار مغناطیسی در بازه زمانی  $1\text{ s} = \Delta t = 0/0$  رخ داده باشد آهنگ تغییر شار ( $\Delta\Phi/\Delta t$ ) را بیدا کنید.



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

$$A = 0/2\text{ m} \times 0/2\text{ m} = 0/0 4\text{ m}^2, \quad B = 25\text{ G} = 2/5 \times 10^{-3}\text{ T}, \quad \theta = 0^\circ$$

$$\Phi = BA \cos \theta = (2/5 \times 10^{-3}\text{ T})(0/0 4\text{ m}^2)(\cos 0^\circ) = 1 \times 10^{-3}\text{ Wb} = 1\text{ mWb}$$

ب) وقتی مطابق شکل ب، حلقه می‌چرخد و سطح آن موازی با خط‌های میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، زاویه بین میدان  $\vec{B}$  و نیم خط 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.

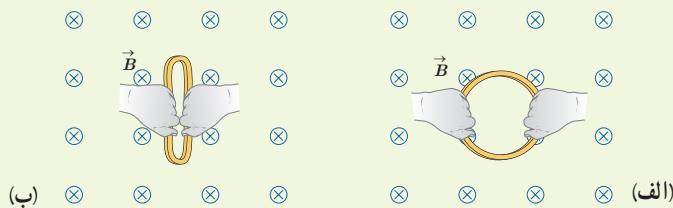
پ) همان‌طور که دیدید شار عبوری از سطح حلقه در وضعیت شکل الف و وضعیت شکل ب، به ترتیب، برابر  $\Phi_1 = 1\text{ mWb}$  و  $\Phi_2 = 0$  است. به این ترتیب، تغییر شار عبوری از سطح حلقه برابر  $\Phi_2 - \Phi_1 = -1\text{ mWb}$  می‌شود. علامت منفی نشان می‌دهد در حین چرخش حلقه از وضعیت شکل الف به وضعیت شکل 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 :

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1 \times 10^{-3}\text{ Wb}}{0/0 1\text{ s}} = -0/1\text{ Wb/s}$$

## تمرین ۱-۴

- (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  $s = \frac{1}{2}\Delta t$  رخ داده باشد، آهنگ تغییر شار ( $\Delta\Phi/\Delta t$ ) را پیدا کنید.



## پرسشن ۱-۴

کدامیک از یکاهای زیر معادل یکای ویر 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 سیم‌وله است. بنابر قانون فاراده، هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القایی شود 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 مربوط به شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴ هرچه حرکتی که سبب تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقره گالوانومتر بیشتر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان القایی بزرگ‌تری به وجود آمده است.

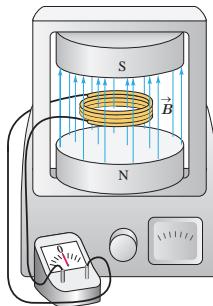
قانون فاراده برای پیچه یا سیم‌وله‌ای که از  $N$  دور مشابه تشکیل شده باشد با رابطه زیر بیان می‌شود :

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2-4)$$

در این رابطه  $\bar{\mathcal{E}}$  نیروی محرکه القایی متوسط بر حسب ولت و  $\Delta\Phi/\Delta t$  آهنگ تغییر شار مغناطیسی بر حسب ویر بر ثانیه (Wb/s) است. اگر مقاومت پیچه یا سیم‌وله برابر  $R$  باشد، جریان القایی متوسط در آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$$\bar{I} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} \quad (3-4)$$

همان‌طور که از رابطه  $I = \bar{I}t$  دیده می‌شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار مغناطیسی تغییر می‌کند، بیشتر باشد، جریان کوچک‌تری در آن القایی شود.

**مثال ۲-۴**

پیچه‌ای شامل  $200$  دور که مساحت هر حلقه آن  $25\text{cm}^2$  است، مطابق شکل رو به رو 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  $ms/2$  از  $T/18$  تا  $T/22$  باشد، افزایش یابد.

الف) نیروی حرکه القابی متوسط ایجاد شده در پیچه چقدر است؟

ب) اگر مقاومت پیچه  $\Omega/10$  باشد، جریان القابی 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 :

$$N = 200 \quad A = 25\text{cm}^2 \quad \theta = 0^\circ \quad \Delta t = 20\text{ms}$$

$$B_1 = 0/T/18 \quad B_2 = 0/T/22 \quad \bar{\mathcal{E}} = ?$$

$$\Phi_1 = B_1 A \cos \theta = (0/T/18)(2/5 \times 10^{-3}\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 4/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

$$\Phi_2 = B_2 A \cos \theta = (0/T/22)(2/5 \times 10^{-3}\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 5/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

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 ۲-۴ داریم :

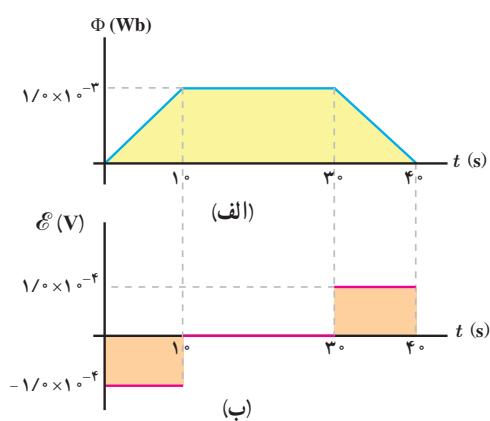
$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -(200) \frac{1/0 \times 10^{-4}\text{Wb}}{2/0 \times 10^{-3}\text{s}} = -1.0\text{V}$$

ب) با توجه به رابطه ۳-۴، جریان القابی متوسط در پیچه برابر است با :

$$I = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{R} = \frac{-1.0\text{V}}{1.0\Omega} = -1.0\text{A}$$

**مثال ۳-۴**

تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در نمودار شکل الف نشان داده شده است. نمودار نیروی حرکه القابی در حلقه را برحسب زمان در هر یک از بازه‌های زمانی  $(0\text{s}, 10\text{s})$ ،  $(10\text{s}, 30\text{s})$  و  $(30\text{s}, 40\text{s})$  رسم کنید.

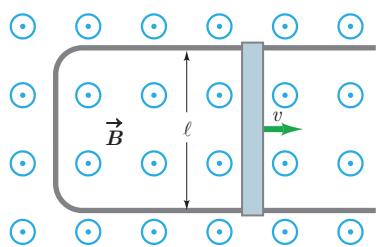


**پاسخ:** همان‌طور که در نمودار شار مغناطیسی برحسب زمان دیده می‌شود در بازه زمانی صفر تا  $10\text{s}$  شار به صورت خطی افزایش می‌یابد. در نتیجه مقدار لحظه‌ای آهنگ تغییر شار با مقدار متوسط آن برابر است. به این ترتیب، در تمامی لحظات این بازه زمانی، نیروی حرکه القابی با نیروی حرکه القابی متوسط برابر است :

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -(1) \frac{(1/0 \times 10^{-3}\text{Wb} - 0)}{10\text{s}} = -1/0 \times 10^{-4}\text{V}$$

در بازه زمانی  $10\text{s}$  تا  $30\text{s}$  شار ثابت مانده است. در نتیجه نیروی حرکه القابی در تمامی لحظات این بازه زمانی برابر صفر است. در بازه زمانی  $30\text{s}$  تا  $40\text{s}$  شار به صورت خطی کاهش یافته و سرانجام صفر شده است. بنابراین شبیه آنچه در مورد بازه زمانی صفر تا  $10\text{s}$  گفتیم، نیروی حرکه القابی در تمام لحظات این بازه با مقدار متوسط نیروی حرکه در این بازه زمانی برابر و مساوی  $1.0 \times 10^{-4}\text{V}$  است. نمودار نیروی حرکه القابی برحسب زمان در شکل ب رسم شده است.

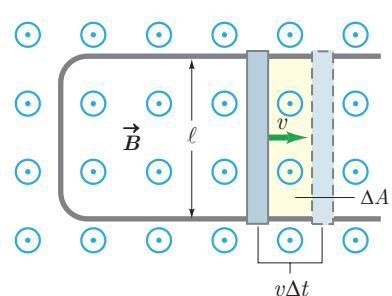
### مثال ۴-۴



شکل رو به رو، رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  به اندازه  $18\text{T}$  نشان می دهد. میدان  $\vec{B}$  عمود بر صفحه شکل و رو به بیرون است. میله ای فلزی (سیم لغزنده) به طول  $l = 20\text{ cm} = 2 \times 10^{-2}\text{ m}$  بین دو بازوی رسانا قرار دارد و مداری را تشکیل می دهد. میله را با تندی ثابت  $v = 20\text{ m/s}$  به طرف راست حرکت می دهیم. بزرگی نیروی حرکت محرکه القای متوسط را پیدا کنید.

**پاسخ:** با حرکت میله فلزی و به دلیل افزایش سطح حلقه، شار مغناطیسی در سطح حلقه یکنواخت است، پس شار مغناطیسی را از رابطه  $\Phi = BA \cos\theta$  محاسبه می کنیم. نیم خط عمود بر سطح حلقه را همسو با  $\vec{B}$  می گیریم. بنابراین زاویه نیم خط عمود با میدان  $\vec{B}$  صفر است ( $\theta = 0^\circ$ ) و در نتیجه  $\Phi = BA$ . از قانون القای فارادی داریم :

$$\bar{\mathcal{E}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = -B \frac{\Delta A}{\Delta t}$$



برای محاسبه  $\Delta A / \Delta t$ ، توجه کنید که میله فلزی لغزنده در مدت  $\Delta t$  مسافت  $v\Delta t$  را طی می کند (شکل رو به رو) و سطح حلقه به مقدار  $\Delta A = l v \Delta t = l v \Delta t$  افزایش می یابد. به این ترتیب، نیروی حرکت محرکه القای شده برابر است با :

$$\bar{\mathcal{E}} = -B \frac{\ell v \Delta t}{\Delta t} = -B \ell v$$

با قرار دادن مقادیر داده شده، در رابطه بالا، داریم :

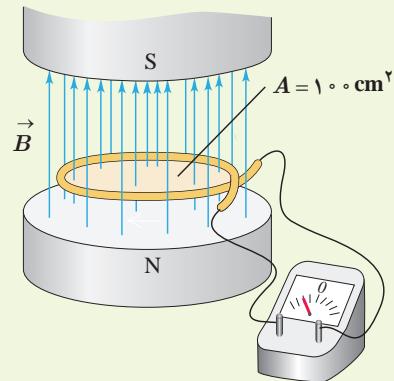
$$\bar{\mathcal{E}} = -(0.18\text{T})(20 \times 10^{-2}\text{m})(20\text{m/s}) = -0.72\text{V}$$

و بزرگی آن برابر است با :

$$|\bar{\mathcal{E}}| = 0.72\text{V}$$

توجه کنید که به علت بودن تندی میله لغزنده، نیروی حرکت محرکه القای ثابت است. در این حالت، رسانای U شکل با سیم لغزنده یک مولد جریان مستقیم است.

### تمرین ۴-۴



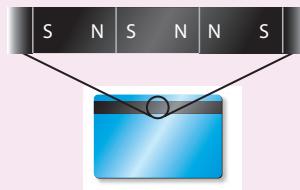
میدان مغناطیسی بین قطب های آهنربای الکتریکی شکل رو به رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می کند و در مدت  $0.45\text{s}$  از  $0.28\text{T}$  از  $0.17\text{T}$ ، رو به بالا، به  $0.17\text{T}$ ، رو به پایین می رسد. در این مدت،

الف) نیروی حرکت محرکه القای متوسط در حلقه را به دست آورید.

ب) اگر مقاومت حلقه  $1\Omega$  باشد، جریان القای متوسط در حلقه را پیدا کنید.

**پرسش ۲-۴**

تندی سنج دوچرخه های مسابقه ای شامل یک آهنربای کوچک و یک پیچه است. آهنربای به یکی از پره های چرخ جلو و پیچه به دو شاخ فرمان متصل است (شکل رو به رو). دو سر پیچه با سیم های رسانا به نمایشگر تندی سنج (که در واقع نوعی رایانه کوچک است) وصل شده است. به نظر شما تندی سنج دوچرخه چگونه کار می کند؟ این موضوع را در گروه خود به گفت و گو بگذارید و نتیجه را به کلاس درس ارائه دهید.

**فناوری و کاربرد****کارت های اعتباری و دستگاه های کارت خوان**

(الف) داده ها را به صورت صفر و یک در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می کنند.



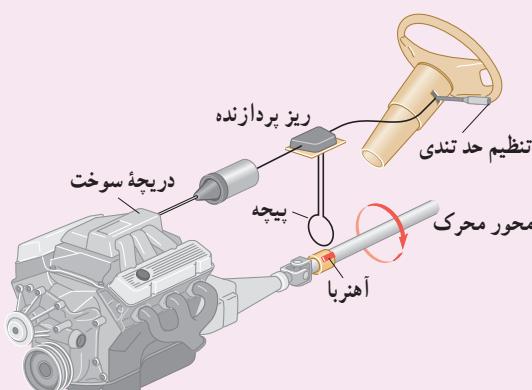
(ب) کشیدن کارت، جریان اندازی در پیچه دستگاه کارت خوان القا می کند.

نوار مغناطیسی پشت کارت های اعتباری حاوی تعداد سیار زیادی ذره فرومغناطیسی است که نوعی چسب خاص آنها را به هم متصل می کند. داده ها را که به صورت دودویی، یا صفر و یک به رمز درآورده اند، در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری درون دستگاه کارت خوان کشیده می شود، میدان مغناطیسی ناشی از نوار مغناطیسی، روی پیچه قرار داده شده در دستگاه کارت خوان اثر می گذارد و جریان اندکی را در پیچه القا می کند (شکل ب). این جریان سیار کوچک توسط دستگاه دیگری تقویت و داده های ذخیره شده در نوار مغناطیسی پشت کارت، رمزگشایی می شود. پس از رمزگشایی داده ها، دستور مورد نظر انجام می شود.

**سامانه تنظیم حد تندی خودرو<sup>۱</sup>**

در بسیاری از خودروهای امروزی، سامانه ای وجود دارد که به کمک آن می توان تندی خودرو را روی مقدار دلخواهی تنظیم کرد. در این وضعیت، بدون آنکه لازم باشد راننده پای خود را روی پدال گاز قرار دهد، خودرو با تندی تعیین شده به حرکتش ادامه می دهد. اساس کار این سامانه، جریان القایی است. وقتی محور محرک خودرو می چرخد آهنربایی که روی آن قرار دارد، شار مغناطیسی متغیری را از پیچه می گذراند و جریانی در آن القا می کند.

ریزپردازنده (مغز رایانه) تعداد تپ های جریان<sup>۲</sup> را در هر ثانیه می شمارد و به این روش، تندی خودرو را اندازه می گیرد. سپس با مقایسه تندی اندازه گیری شده با تندی تنظیم شده توسط راننده، سوخت مورد نیاز را به موتور تزریق می کند. تا هنگامی که راننده ترمز نگیرد، حرکت خودرو با تندی تعیین شده، توسط این سامانه تنظیم می شود.



## خوب است بدانید: معاینه مغز با نیروهای حرکت القایی



برانگیزش (تحريك) مغناطیسی فرا جمجمه‌ای (TMS)<sup>۱</sup> 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. پژوهش با مشاهده واکنش مغز (مثلًاً اینکه کدام عضله‌ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می‌کنند) می‌تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بآزماید.



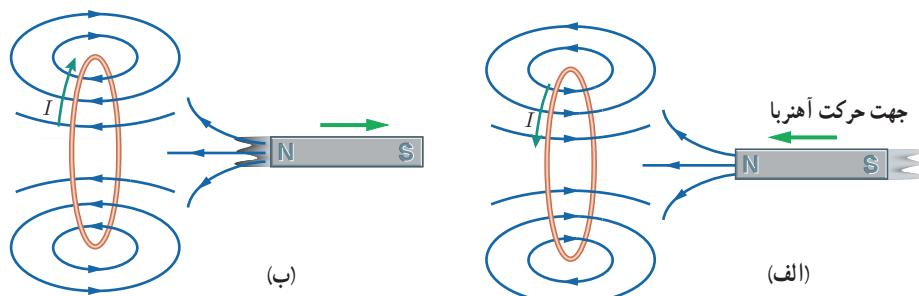
**هاینریش فردریش امیل لنز (۱۸۰۴–۱۸۶۵)** از فیزیکدانان مشهور آلمانی و دارای تبار روس بود. وی در استونوی که در آن دوران تحت امپراتوری روسیه بود به دنیا آمد. پس از اتمام دوره دبیرستان در ۱۸۲۰ وارد داشنگاه دُربَت شد و به تحصیل در زمینه فیزیک و شیمی پرداخت. لنز طی سال‌های ۱۸۲۳ تا ۱۸۲۶ در ضمن یک سفر دریایی به دور دنیا، به مطالعه شرایط آب و هوای و همچنین ویژگی‌های فیزیک دریا پرداخت و نتایج آن را در سال ۱۸۳۱ منتشر کرد. پس از این سفر، در داشنگاه سن پترزبورگ آغاز به کار نمود. لنز مطالعه الکترومغناطیس را در سال ۱۸۳۱ شروع کرد و پیشتر شهروشن برای فرمول بندی قانون لنز در الکترومغناطیس در سال ۱۸۳۴ است.

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 ۲–۲ نشان دهنده همین مخالفت است. توضیح دقیق تر 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 اكتفا می‌کنیم.

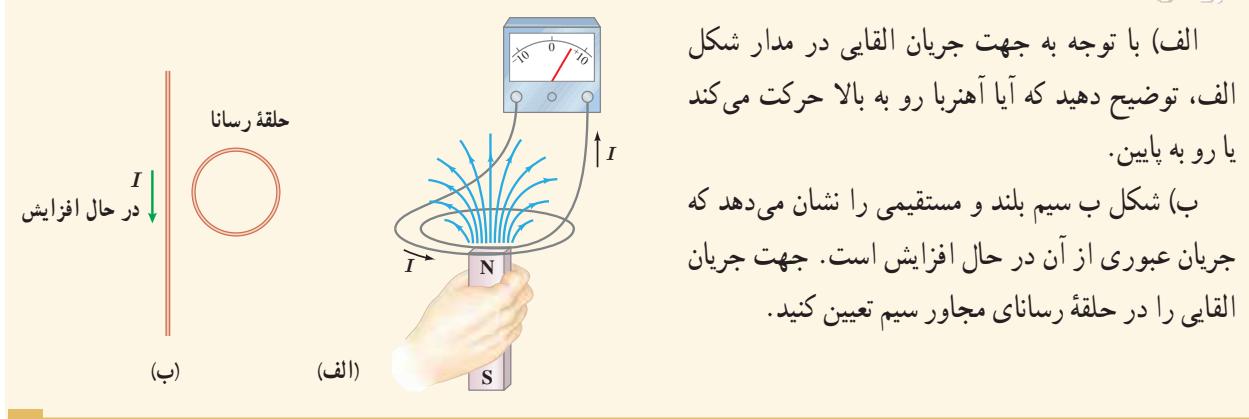
شکل ۵–۴ الف، آهنربای را نشان می‌دهد که قطب  $N$  آن در حال نزدیک شدن به یک حلقه رساناست. در این وضعیت اندازه  $\vec{B}$  در محل حلقه افزایش می‌باید و در نتیجه شار گذرنده از حلقه زیاد می‌شود. بنا به قانون لنز، جهت جریان القایی ایجاد شده در حلقه چنان است که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مخالفت کند. بنابراین، میدان مغناطیسی حلقه در خلاف سوی میدان مغناطیسی آهنربای می‌شود. با توجه به قاعده دست راست و از روی جهت میدان مغناطیسی حلقه، جهت جریان در حلقه تعیین می‌شود. همچنین اگر مطابق شکل ۵–۴ ب، قطب  $N$  آهنربای را از حلقه رسانا دور کنیم، جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، همسو با میدان آهنربای می‌شود و به این ترتیب با کاهش شار عبوری از حلقه، مخالفت می‌کند.

**شکل ۵–۴ الف** و **ب**) وقتی آهنربای به حلقه رسانا نزدیک می‌شود جریان در جهتی در حلقه القایی می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند. (ب) با دور شدن آهنربای از حلقه رسانا، جریان در جهتی در حلقه القایی می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با کاهش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند.



۱—Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)

## پرسش‌۲



(الف) با توجه به جهت جریان القایی در مدار شکل الف، توضیح دهید که آیا آهنربا رو به بالا حرکت می‌کند یا رو به پایین.

(ب) شکل ب سیم بلند و مستقیمی را نشان می‌دهد که جریان عبوری از آن در حال افزایش است. جهت جریان القایی را در حلقة رسانای مجاور سیم تعیین کنید.

## خوب است بدانید: اثر دیامغناطیس

چرخش هر الکترون به دور هسته اتم را می‌توان به صورت یک حلقة میکروسکوپی جریان مدل‌سازی کرد. هرگاه ماده‌ای در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، شار مغناطیسی گذرنده از هر یک از این حلقات مغناطیسی افزایش می‌یابد و در نتیجه بنابر قانون لنز، در این حلقات، یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیس خارجی القایی شود. به این ویژگی که در اتم‌های همه مواد در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی رخ می‌دهد، پدیده یا اثر دیامغناطیس گفته می‌شود. اثر دیامغناطیسی در موادی نظیر بیسموت، جیوه، نقره، سرب، مس و کربن (الماس) بهتر نمایان می‌شود، زیرا اتم‌های آنها، قادر دو قطبی‌های مغناطیسی دائمی‌اند. از آنجا که اثر دو قطبی‌های مغناطیسی دائمی در مواد فرومغناطیسی و پارامغناطیسی بسیار بیشتر از اثر دو قطبی‌های القایی است، اثر دیامغناطیس در این گونه مواد نمود کمتری دارد.

## ۱۴-۴ الفاگرهای

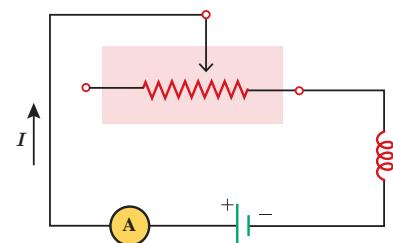
در فصل ۲ دیدیم که در فضای بین صفحه‌های یک خازن باردار، میدان الکتریکی ایجاد می‌شود و انرژی الکتریکی در این میدان ذخیره می‌شود. به همین ترتیب، می‌توان از الفاگر (سیم‌سیچ) برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیره انرژی در این میدان استفاده کرد. الفاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای الکترونیکی است.

شکل ۱۴-۶ تصویر چند الفاگر را در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت نشان می‌دهد. نماد مداری الفاگر، است.

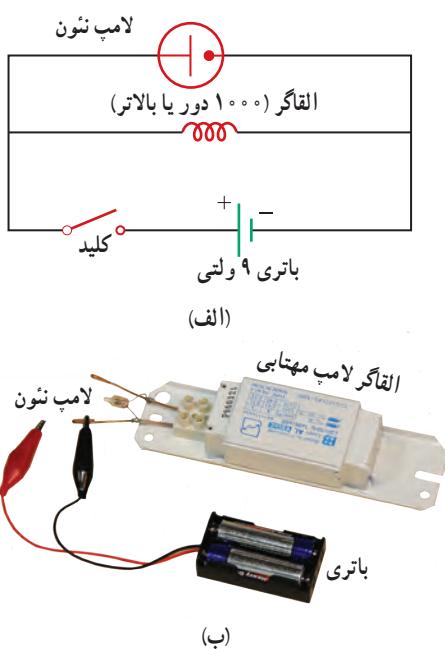
**خود-القاوری** : مداری را مطابق شکل ۱۴-۷ درنظر بگیرید. این مدار شامل منبع نیروی محرکه، رئوستا، آمپرسنچ و الفاگری است که به طور متواالی به یکدیگر بسته شده‌اند. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان در مدار تغییر می‌کند. تغییر جریان در مدار، سبب تغییر میدان مغناطیسی الفاگر می‌شود و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از آن نیز تغییر می‌کند. این فرایند سبب القای نیروی محرکه‌ای در الفاگر می‌شود که بنابر قانون لنز با تغییر جریان عبوری از آن مخالفت می‌کند. این پدیده که می‌تواند در هر الفاگری (از قبیل پیچه یا سیم‌لوله) رخ دهد **اثر خود-القاوری** نامیده می‌شود.



شکل ۱۴-۶ تصویری از چند الفاگر در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت



شکل ۱۴-۷ مداری ساده شامل رئوستا، الفاگر، باتری و آمپرسنچ



## هدف: بررسی اثر خود - القاوری

وسیله‌های مورد نیاز: لامپ نئون (لامپ فازمتری)، القاگر (۱۰۰۰ دور یا بالاتر)

دستور ۲ عدد) یا باتری ۹ ولتی، سیم رابط، کلید

شرح آزمایش:

- مداری مطابق شکل الف بیندید.

- 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 اشتباہ ترانس نامیده می‌شود) نیز استفاده کنید.

## خوب است بدانید: کاربرد القاگرهای در سامانه‌های انتقال برق



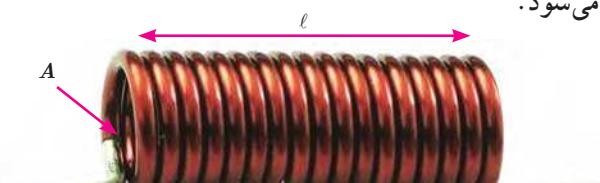
**جوزف هانزی (۱۷۹۷-۱۸۷۸):** یکی از فیزیکدانان تجربی قرن نوزدهم است که در آمریکا به دنیا آمد و کار خود را با آموخت علوم در یک مدرسه روسیتای آغاز کرد. سپس به تحصیل در طب و مهندسی علاقه‌مند شد و سرانجام به فیزیک و ریاضیات روی آورد. هانزی در سال ۱۸۳۱، همزمان و مستقل از فاراده، موفق به کشف پدیده القای کترومغناطیسی شد. وی همچنین تواست نوعی موتور الکترومغناطیسی و یک تلگراف جدید و کارآمد اختراع کند. یکی از SI ضریب القاوری به احترام یک عمر فعالیت‌های علمی وی، هانزی (H) انتخاب شده است.

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، وسیله‌های 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!

**ضریب القاوری:** ویژگی‌های فیزیکی هر القاگر، توسط **ضریب القاوری** آن تعیین می‌شود. ضریب القاوری که با نماد  $L$  نمایش داده می‌شود به عواملی همچون تعداد دور، طول و سطح مقطع القاگر و جنس هسته‌ای که داخل آن قرار می‌گیرد بستگی دارد. برای مثال، ضریب القاوری سیم‌لوله‌ای آرمانی و بدون هسته، که دارای طول  $\ell$ ، سطح مقطع  $A$  و  $N$  حلقه نزدیک به هم است (شکل ۴-۸)، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L = \mu_0 \frac{AN^2}{\ell} \quad (4-4)$$

یکای SI ضریب القاوری، اهم. ثانیه ( $\Omega \cdot \text{s}$ ) است که به احترام جوزف هانزی، **هانزی** نامیده و با نماد H نشان داده می‌شود.



شکل ۴-۸ سیم‌لوله‌ای با N حلقه نزدیک به هم

## مثال ۴

ضریب القاوری سیم‌لوله آرمانی بدون هسته‌ای به طول  $62/8\text{cm}$  و سطح مقطع  $1\text{cm}^2$  را پیدا کنید که شامل  $2000$  حلقه نزدیک به هم است.

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

$$A = 1\text{cm}^2 \quad l = 62/8\text{cm} \quad N = 2000 \quad L = ?$$

با قراردادن مقادیر بالا در رابطه ۴-۴ داریم :

$$L = \mu_0 \frac{AN^2}{l} = (4\pi \times 10^{-7} \text{T.m/A}) \frac{(10 \times 10^{-4} \text{m}^2)(2000)^2}{62/8\text{m}} = 8 \times 10^{-3} \text{H} = 8\text{mH}$$

## تمرین ۴

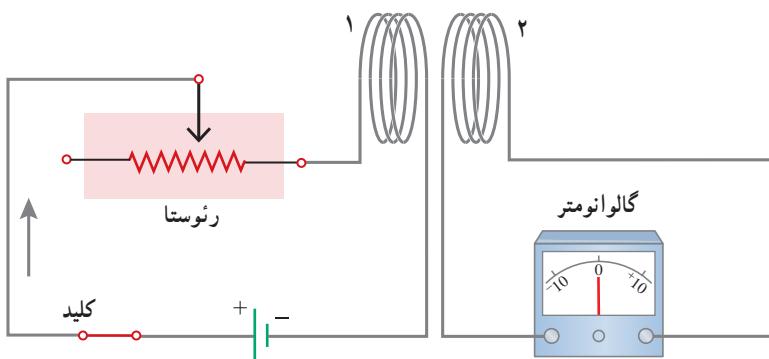
- ۱- تعداد حلقه‌های سیم‌لوله‌ای بدون هسته، به طول  $2/8\text{cm}$  و سطح  $1\text{cm}^2$  چه تعداد باشد تا ضریب القاوری آن  $1\text{H}$  شود؟
- ۲- دو سیم‌لوله بدون هسته با سطح مقطع و تعداد دور یکسان را در نظر بگیرید. اگر طول یکی از سیم‌لوله‌ها دو برابر دیگری باشد، ضریب القاوری اش چند برابر دیگری است؟

## خوب است بدانید: کاربرد القاگرها در لامپ‌های فلوئورسان

همان‌طور که در ابتدای این بخش دیدیم القاگرها با تغییرات سریع جریان در مدار مخالفت می‌کنند، به همین دلیل نقش مهمی در لامپ‌های فلوئورسان (مهتابی) دارند. در این لامپ‌ها، جریان الکتریکی از گاز رقیقی که فضای درون لامپ را پر کرده است می‌گذرد و گاز را یونیزه و به پلاسما تبدیل می‌کند. پلاسما یک رسانای غیراهمی است و هرچه بیشتر یونیزه 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 فلوئورسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر را به طور متوالی با لامپ فلوئورسان می‌بنند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل کننده همچنین باعث می‌شود تا لامپ فلوئورسان بتواند با ولتاژ متناوب کار کند.

**الای متقابل:** شکل ۴-۹ اسباب آزمایش ساده‌ای را برای بررسی اثر الای متقابل نشان می‌دهد.

جریان عبوری از پیچه ۱، میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  را به وجود می‌آورد. این میدان  $\vec{B}$ ، شار مغناطیسی ای را از پیچه ۲ می‌گذراند که در مجاورت آن قرار دارد. با تغییر دادن مقاومت رُئوستا و تغییر جریان در پیچه ۱، میدان مغناطیسی پیچه ۱ و در نتیجه شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند؛ بنابر قانون فاراده،

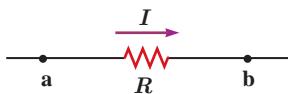


**شکل ۴-۱۵** با تغییر مقاومت رُئوستا و تغییر جریان عبوری از پیچه ۱ شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار، سبب ایجاد نیروی محرکه الایی در پیچه ۲ می‌شود. هم‌زمان تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه الایی در پیچه ۱ می‌گردد.

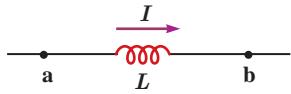


**شکل ۱۴-۱۰** برای به حداقل رساندن اثر القای متقابل در برخی از مدارهای الکتریکی، القاگرهای مجاور را به گونه‌ای قرار می‌دهند که سطح حلقه‌های مجاور را به طور عمود بر یکدیگر عمود باشد.

مقاومت با جریان  $I$ : انرژی تلف شده است.



القاگر با جریان  $I$ : انرژی ذخیره شده است.



**شکل ۱۴-۱۱** 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.

این تغییر شار، نیروی محرکه‌ای را در پیچه ۲ القا می‌کند که به ایجاد جریان القای در این پیچه می‌انجامد. همچنین تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه القای 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.

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 ۱۴-۴). 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 گرم‌تلف و بقیه آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در میدان القاگر با ضرب ب القاوری  $L$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (۱۴-۵)$$

لازم است رفتار مقاومت و القاگر را به لحاظ انرژی استباه نگیرید (شکل ۱۱-۴). 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.

## مثال ۶

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. ضرب ب القاوری این القاگر چقدر باشد تا بتواند  $1/0 \text{ kWh}$  انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان  $200 \text{ A}$  ذخیره کند؟

**پاسخ**: مقدار انرژی ذخیره شده مورد نیاز  $U = 1/0 \text{ kWh}$  و جریان  $A = 200 \text{ A}$  داده شده است. از معادله ۱۴-۵ ضرب ب القاوری را به دست می‌آوریم:

$$U = 1/0 \text{ kWh} = (1/0 \times 1/0 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3/6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow L = \frac{2U}{I^2} = \frac{2(3/6 \times 10^6 \text{ J})}{(200 \text{ A})^2} = 1/8 \times 10^2 \text{ H}$$

همان طور که نتیجهٔ صفحهٔ قبل نشان می‌دهد ضرب القاوری لازم، بسیار بیشتر از ضرب القاوری یک القاگر معمولی (در حد میلی‌هارزی) است که در آزمایشگاه از آن استفاده می‌کنیم. افزون بر این همان طور که در فصل ۲ دیدیم سیم‌های معمولی که بتوانند جریان  $A$  را از خود عبور دهنده باید قطر بسیار بزرگی داشته باشند. در نتیجهٔ اندازهٔ یک القاگر  $H = 18^\circ$  که از سیم‌های معمولی ساخته شده باشد و بتواند چنین جریانی را تحمل کند باید خیلی بزرگ (به اندازهٔ یک اناق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری‌های موجود این ایده، غیرعملی است و توجیهٔ اقتصادی ندارد.

#### تمرین ۴

سیم‌لولهٔ آرمانی بدون هسته‌ای به طول  $22\text{ cm}$  و با حلقه‌هایی به مساحت  $44\text{ cm}^2$ ، شامل  $N = 2000$  حلقهٔ تزدیک به هم است و جریان  $1/7\text{ A}$  از آن می‌گذرد. ضرب القاوری و انرژی ذخیره شده در سیم‌لوله را حساب کنید.

#### فناوری و کاربرد: انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو



انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه‌های احتراق خودروهای با موتور بنزینی دارد. پیچهٔ اولیه با حدود  $25^\circ$  دور به باتری خودرو بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی‌ای تولید می‌کند. این پیچه، درون یک پیچهٔ ثانویه با  $25^\circ$  دور سیم خیلی نازک قرار گرفته است. برای جرقه زدن شمع، جریان در پیچهٔ اولیه قطع می‌شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر می‌رسد و نیروی محرکهٔ الکتریکی ده‌ها هزار ولتی در پیچهٔ ثانویه القا می‌کند. در نتیجهٔ انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی همراه با جریانی لحظه‌ای از پیچهٔ ثانویه به طرف شمع می‌رود و جرقه‌ای تولید می‌کند که سبب احتراق مخلوط سوخت و هوا در سیلندرهای موتور می‌شود (شکل روبرو).

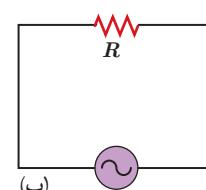
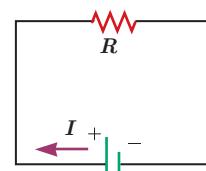
انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو، از انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی پیچهٔ احتراق تأمین می‌شود.

#### ۵-۴ جریان متناوب

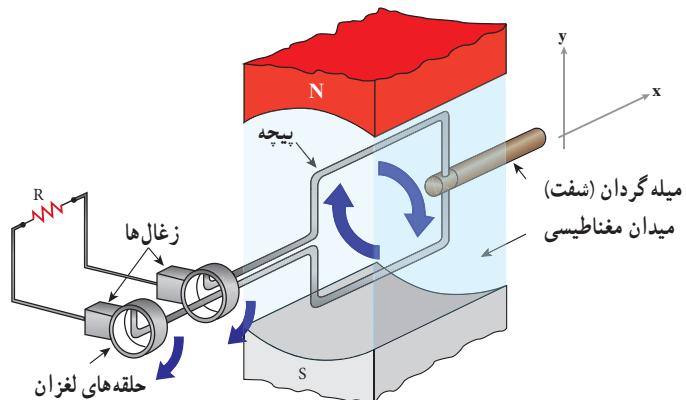
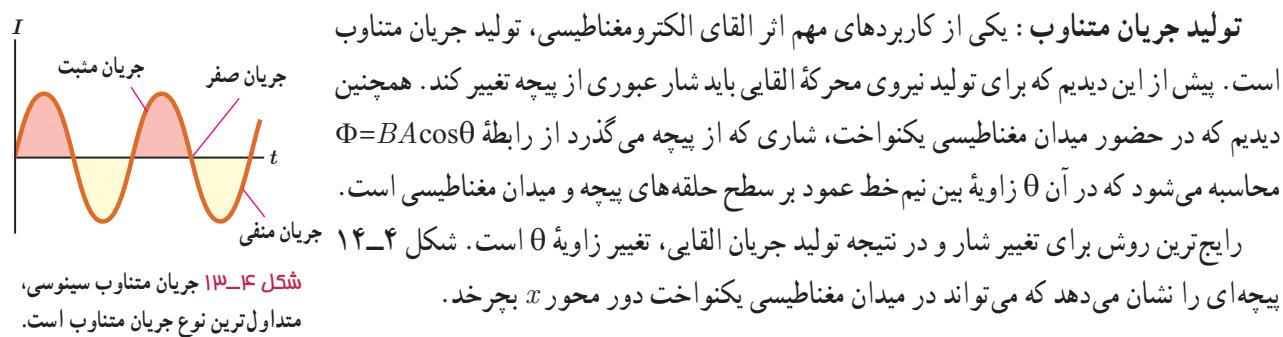
در اواخر قرن نوزدهم، بحث‌های داغی بین توماس ادیسون و جورج وستینگهاوس دربارهٔ بهترین روش انتقال انرژی الکتریکی از محل تولید تا محل مصرف صورت گرفت. ادیسون موافق جریان مستقیم (dc) بود، در حالی که وستینگهاوس از جریان متناوب (ac) حمایت می‌کرد. سرانجام، وستینگهاوس پیروز شد و پس از آن سامانه‌های انتقال و توزیع برق و بیشتر وسایل خانگی با جریان متناوب به کار افتادند.

شکل ۱۲-۴ دو مدار سادهٔ جریان مستقیم و جریان متناوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید

جهت جریان در مدار جریان مستقیم معین است، درحالی 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 ۱۲-۴).



شکل ۱۲-۴ (الف) مدار سادهٔ جریان مستقیم، که در آن جریان با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. (ب) مدار سادهٔ جریان متناوب، که در آن ولتاژ و جریان با گذشت زمان به طور سینوسی تغییر می‌کنند.



**شکل ۱۴-۵** اجزای یک مولد (ژنراتور) جریان متناوب. حرکت مکانیکی از طریق میله 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 به طور 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 ( $\theta = 0^\circ$ )، پس از گذشت  $t$  ثانیه، زاویه  $\theta$  برابر  $\frac{t}{T}(2\pi)$  رادیان است. زمان یک دور چرخش کامل پیچه ( $T$ ) را **دوره** یا **زمان تناوب** می‌نامند. شاری که در لحظه  $t$  از پیچه می‌گذرد برابر است با

$$\Phi = BA\cos \frac{2\pi}{T}t$$

به کمک قانون فاراده می‌توان نشان داد نیروی حرکت القایی در پیچه در لحظه  $t$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \frac{2\pi}{T}t \quad (6-4)$$

که در آن  $\mathcal{E}_m$  بیشینه مقدار نیروی حرکت القایی در پیچه است. این رابطه نشان می‌دهد که نیروی حرکت القایی شده به طور دوره‌ای نسبت به زمان تغییر می‌کند.

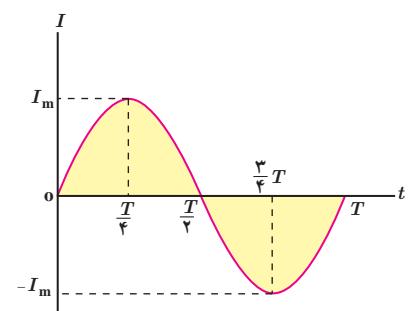
۱- اثبات این رابطه، خارج از اهداف برنامه درسی این کتاب است.

اگر مقاومت کل مدار پیچه برابر  $R$  باشد، با توجه به رابطه  $\mathcal{E}/R = I$ ، جریانی که در پیچه القا می‌شود برابر است با:

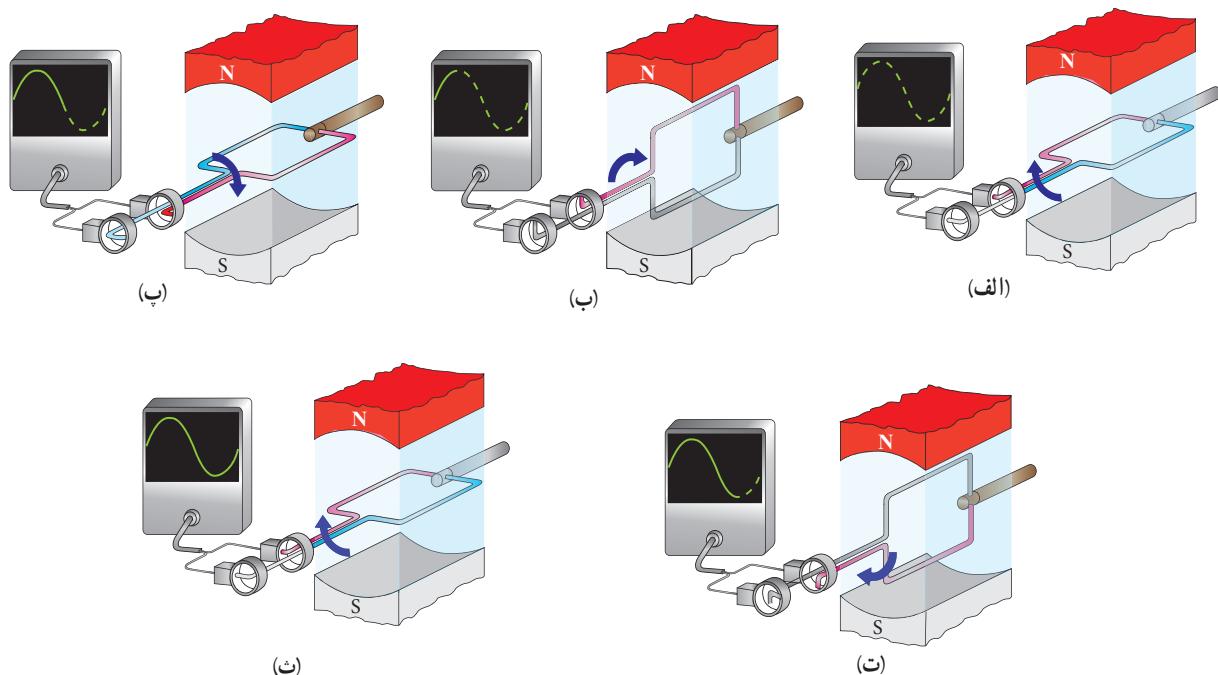
$$I = I_m \sin \frac{\pi}{T} t \quad (7-4)$$

در این رابطه  $I_m$  بیشینه جریان القا شده در پیچه و برابر  $I_m = \mathcal{E}_m/R$  است. رابطه ۷-۴ همچنین نشان می‌دهد که جریان القایی در پیچه، به طور سینوسی تغییر می‌کند، به همین سبب به آن **جریان متناوب** می‌گویند. نمودار این جریان بر حسب زمان، در یک دوره در شکل ۱۵-۴ رسم شده است.

شکل ۱۶-۴ تولید جریان متناوب سینوسی در مدت یک دوره را نشان می‌دهد. در  $t=0$  سطح پیچه بر خطوط میدان مغناطیسی عمود است و جریانی در مدار وجود ندارد (شکل ۱۶-۴الف). پیچه یک چهارم دور می‌چرخد تا در وضعیت شکل ۱۶-۴ب قرار گیرد. در حین این چرخش، شارعبوری از پیچه تغییر می‌کند و جریان از صفر به مقدار بیشینه مثبت می‌رسد (ربع اول چرخش). پیچه به چرخیدن ادامه می‌دهد تا در وضعیت شکل ۱۶-۴پ قرار گیرد. درنتیجه جریان از مقدار بیشینه مثبت به صفر می‌رسد (ربع دوم چرخش). پس از آن پیچه از وضعیت شکل ۱۶-۴پ به وضعیت شکل ۱۶-۴ت می‌رسد. در حین این چرخش، جریان از صفر به مقدار بیشینه منفی می‌رسد (ربع سوم چرخش). سرانجام پیچه یک ربع دور دیگر می‌چرخد و به این ترتیب یک چرخه کامل را طی می‌کند و به وضعیت شکل ۱۶-۴ث می‌رسد و درنتیجه جریان از مقدار بیشینه منفی به صفر می‌رسد. این حرکت به طور متناوب (پی در پی) توسط پیچه ادامه می‌یابد و جریان متناوب تولید می‌شود.

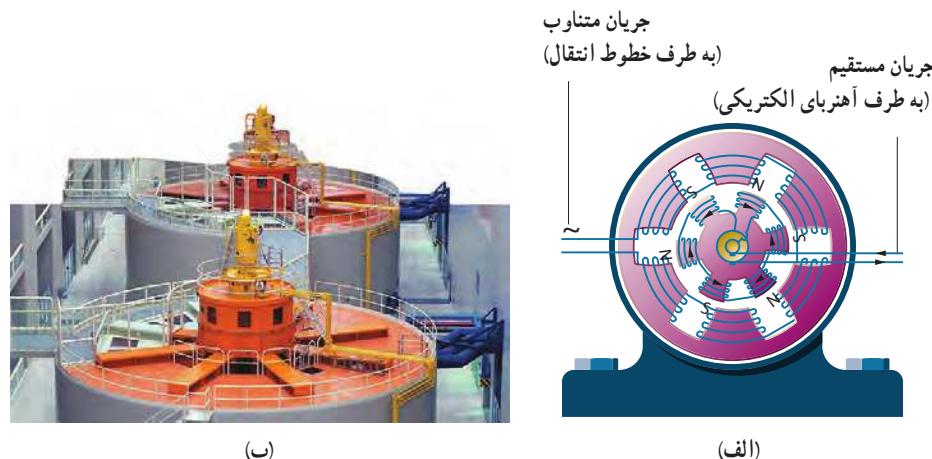


شکل ۱۵-۴ نمودار جریان متناوب سینوسی در یک دوره



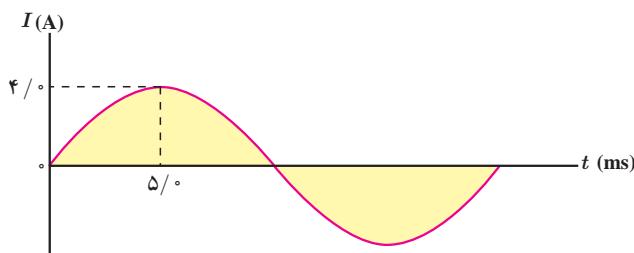
شکل ۱۶-۴ تولید جریان متناوب سینوسی در یک چرخش کامل

در نیروگاههای تولید برق، برای تولید جریان متناوب از مولدات خاصی استفاده می‌شود که به آنها مولدات صنعتی جریان متناوب می‌گویند. در مولدات صنعتی پیچه‌ها ساکن‌اند و آهنربای الکتریکی در آنها می‌چرخد (شکل ۱۷-۴). در نیروگاههای تولید برق در ایران، آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، ۵ دور درون پیچه می‌چرخد. این کمیت را بسامد برق تولید شده می‌نامند و به صورت  $5\text{ Hz}$  یا  $5\text{ s}^{-1}$  می‌کنند. یکای SI بسامد  $\text{Hz}$  یا  $\text{s}^{-1}$  (هرتز) است.



شکل ۱۷-۴ (الف) در مولدات صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچه‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود. (ب) نمایی از مولدات صنعتی تولید برق.

## مثال ۷-۴



شکل رو به رو، نمودار جریان متناوب سینوسی را نشان می‌دهد که یک مولد جریان متناوب تولید کرده است. معادله جریان بر حسب زمان را بنویسید.

**پاسخ:** چون ربع چرخه در  $5\text{ ms}$  طی شده است، دوره تناوب برابر  $T = 20\text{ ms}$  است. همچنین با توجه به نمودار، بیشینه جریان  $I_m = 40\text{ A}$  است. در نتیجه از رابطه ۷-۷ داریم :

$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t = (40\text{ A}) \sin \left( \frac{2\pi}{20 \times 10^{-3}\text{ s}} \right) t = 40 \sin 100\pi t$$

نتیجه نهایی بر حسب یکاهای SI نوشته شده است.

## تمرین ۷-۵

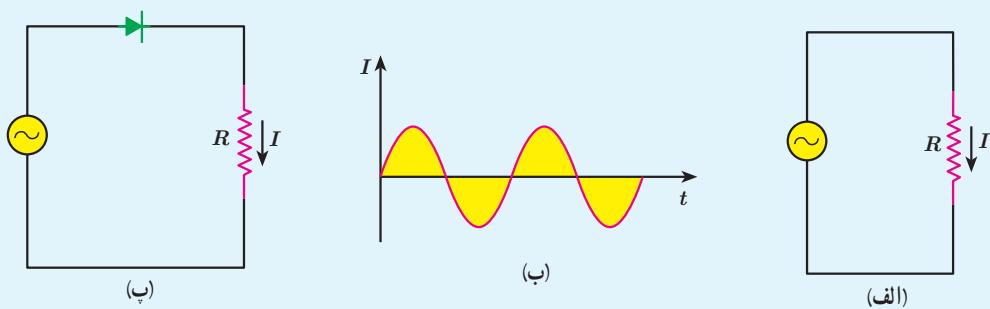
معادله جریان - زمان یک مولد جریان متناوب بر حسب یکاهای SI به صورت  $I = I_0 \sin 250\pi t$  است.

(الف) جریان در دو لحظه  $t_1 = 20\text{ ms}$  و  $t_2 = 80\text{ ms}$  چقدر است؟

(ب) دوره تناوب جریان را به دست آورید و نمودار جریان - زمان را در یک دوره کامل رسم کنید.

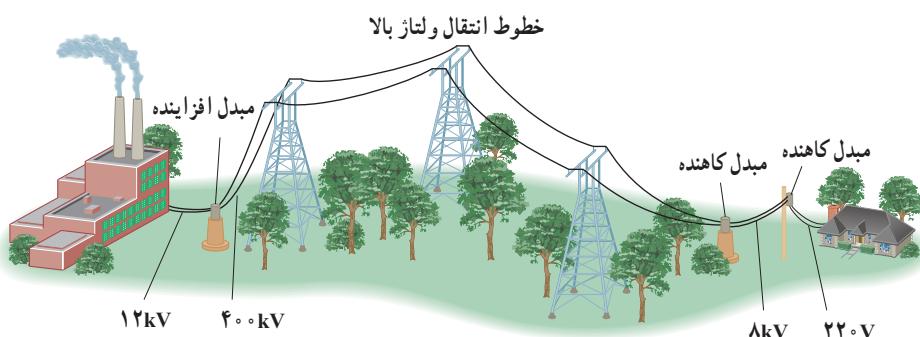
## فعالیت ۱۴

در فصل ۲ دیدیم که دیود جریان را در یک جهت از خود عبور می‌دهد و در جهت دیگر مانع عبور جریان می‌شود. به همین دلیل آن را یکسوکننده جریان می‌نامند. نمودار شکل ب، تغییرات جریان بر حسب زمان را برای مدار شکل الف نشان می‌دهد. پس از گفت و گو در گروه خود، نمودار تغییرات جریان بر حسب زمان را برای مدار شکل پ رسم کنید.

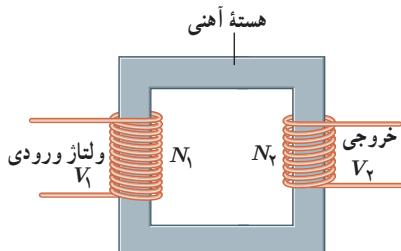


**مبدل‌ها:** یکی از مزیت‌های مهم توزیع توان الکتریکی ac بر آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان‌تر از dc است. برای انتقال توان الکتریکی در فاصله‌های دور، تا جایی که امکان دارد باید از ولتاژهای بالا و جریان‌های کم استفاده کنیم. این کار اتلاف توان را در خطوط‌های انتقال کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به کاهش جریان 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 ۱۸-۴). از طرف دیگر، ملاحظات اینمی 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 ۱۸-۴** قبل از انتقال توان الکتریکی از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزاینده، ولتاژ را تا حدود  $400\text{ kV}$  افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا توان الکتریکی با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.



شکل ۱۹-۱۴ یک مبدل آرمانی شامل دو پیچه با تعداد دورهای متفاوت را نشان می‌دهد که دور یک هسته آهنی (فرومغناطیس نرم) پیچیده شده‌اند. در عمل پیچه اولیه با  $N_1$  دور به ولتاژ  $V_1$  بسته شده است و پیچه ثانویه با  $N_2$  دور ولتاژ  $V_2$  را تأمین می‌کند<sup>۱</sup>. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچه‌های ولتاژ خروجی و ولتاژ ورودی آن ناچیز است، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (۸-۴)$$

## مثال ۸-۴

شکل رو به رو یک مبدل  $V$  ۲۲۰ به  $V$  ۱۲۰ را نشان می‌دهد. پیچه اولیه ۸۰۰۰ دور دارد. با فرض آرمانی بودن مبدل، تعداد دورهای پیچه ثانویه را پیدا کنید.

**پاسخ:** با توجه به داده‌ها داریم:

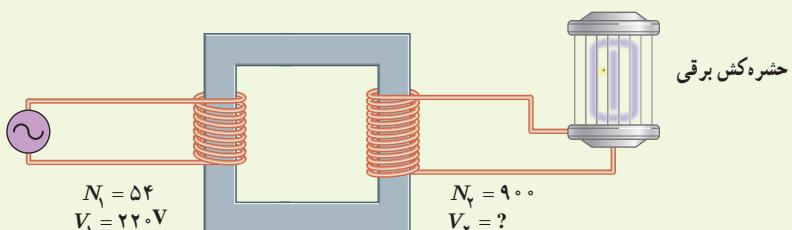
$$V_1 = 220\text{V}, \quad V_2 = 120\text{V}, \quad N_1 = 8000, \quad N_2 = ?$$

با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۸-۴ داریم:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{120\text{V}}{220\text{V}} = \frac{N_2}{8000} \Rightarrow N_2 = 436 \text{ دور}$$

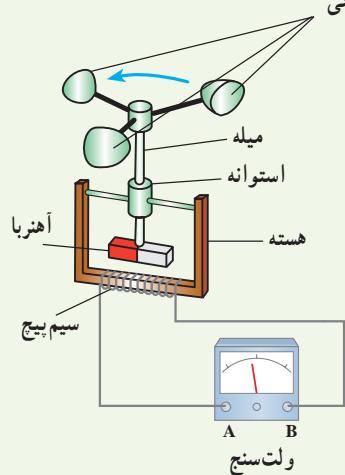
## تمرین ۸-۶

برخی از وسیله‌های برقی، مانند حشره‌کش برقی، برای کار کردن نیاز به ولتاژ‌های بالا از مرتبه چند هزار ولت دارند. شکل زیر مبدلی را نشان می‌دهد که ولتاژ لازم را برای کار یک دستگاه حشره‌کش برقی فراهم می‌کند. اگر تعداد دور اولیه مبدل  $N_1 = 54$  و تعداد دور ثانویه  $N_2 = 900$  باشد، مبدل چه ولتاژی را برای کار کردن دستگاه حشره‌کش تأمین می‌کند؟



۱- لازم است توجه شود که ولتاژ‌های  $V_1$  و  $V_2$  تقریباً  $\sqrt{7}$  برابر ولتاژ بیشینه ورودی و خروجی مبدل هستند. بررسی دلایل این موضوع خارج از اهداف این کتاب است.

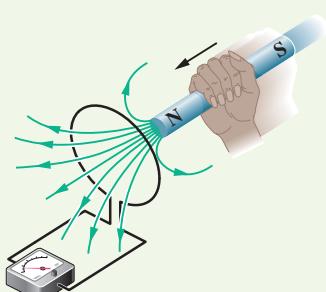
پ) برای بهبود افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهد.  
کاسه‌های پلاستیکی



۴ سطح حلقه‌های پیچه‌ای که دارای  $1000$  حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه آن  $40\text{ T}$  و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت  $10\text{ s}$  تغییر می‌کند و به  $40\text{ T}$  در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه  $5\text{ cm}^2$  باشد، اندازه نیروی حرکة القابی متوجه در پیچه را حساب کنید.

۵ مساحت هر حلقه پیچه‌ای  $30\text{ cm}^2$  و پیچه مشکل از  $1000$  حلقه است. در ابتدا سطح پیچه‌ها بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت  $20\text{ s}$  پیچه بچرخد و سطح حلقه‌ها موازی میدان مغناطیسی زمین شود، نیروی حرکة متوجه القابی در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را  $50\text{ G}$  در نظر بگیرید.

#### ۳-۴ قانون لنز

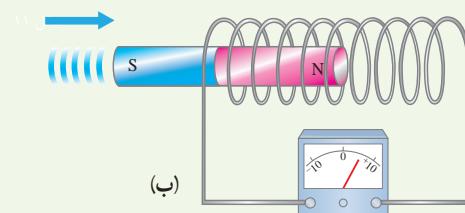
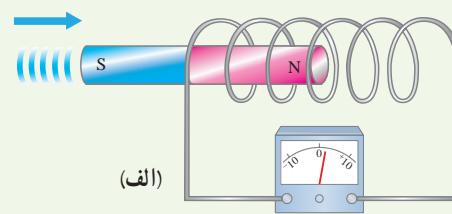


۶ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل رو به رو به یک حلقه رسانا تردیک می‌کنیم. جهت جریان القابی را در حلقه مشخص کنید.

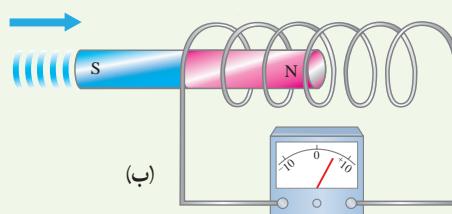
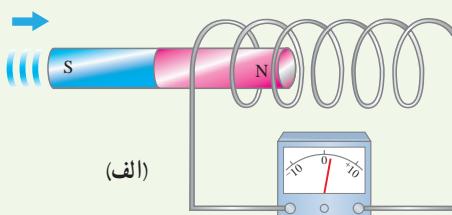
۷ دو آهنربای میله‌ای مشابه را مطابق شکل، به‌طور قائم از ارتفاع معینی تردیک سطح زمین رها می‌کنیم به‌طوری که یکی از آنها از حلقه رسانایی عبور می‌کند. اگر سطح زمین در محل

#### ۱-۴ و ۲-۴ پدیده القای الکترومغناطیسی و قانون القای الکترومغناطیسی فاراد

۱ 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 به‌طرف سیم‌لوله حرکت می‌کنند).



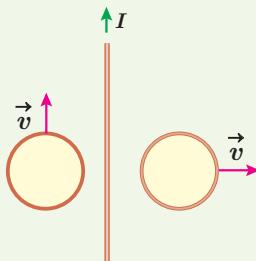
۲ دو سیم‌لوله مشابه را مطابق شکل‌های زیر به ولت‌سنج حساسی وصل کرده‌ایم. دریافت خود را از شکل‌های زیر بنویسید. (آهنرباها مشابه‌اند ولی با تندی متفاوتی به‌طرف سیم‌لوله حرکت می‌کنند).



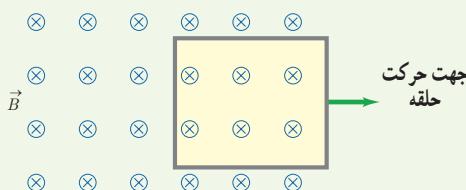
۳ شکل داده شده ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

(الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه ولت‌سنج می‌شود?  
(ب) آیا با افزایش تندی باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

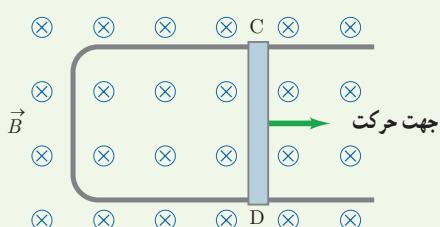
۱۱ دو حلقه رسانا در تزدیکی یک سیم دراز حامل جریان ثابت  $I$  قرار دارند؛ این دو حلقه با تنیدی یکسان، ولی در جهت‌های متفاوت مطابق شکل زیر حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



۱۲ حلقه رسانای مستطیل شکل را مطابق شکل زیر به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی درون سوی خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟

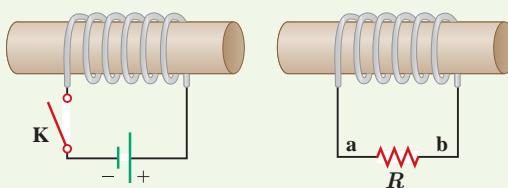


۱۳ شکل زیر رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  که عمود بر صفحه شکل و رو به داخل صفحه است نشان می‌دهد. وقتی میله فلزی CD به طرف راست حرکت کند، جهت جریان القایی در مدار در چه جهتی است؟

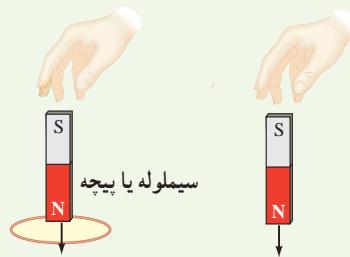


۱۴ در مدار نشان داده شده در شکل زیر، جهت جریان القایی را در مقاومت  $R$  در هریک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید:

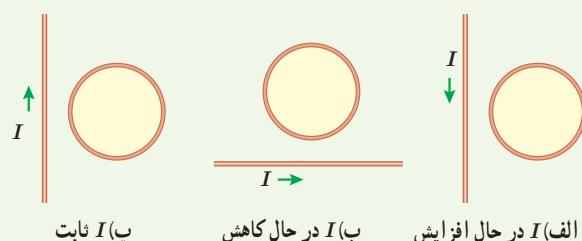
(الف) در لحظه بستن کلید K، (ب) در لحظه باز کردن کلید K.



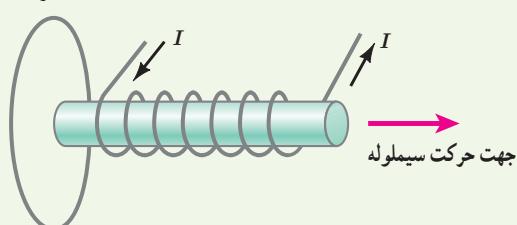
برخورد آهنرباهای نرم باشد، مقدار فرورفتگی آهنرباهای را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنربای را نادیده بگیرید.)



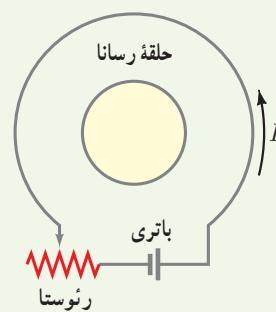
۱۵ جهت جریان القایی را در هریک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل‌های زیر تعیین کنید.



۱۶ شکل زیر سیم‌لوله حامل جریانی را نشان می‌دهد که در حال دور شدن از یک حلقه رسانا است. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.

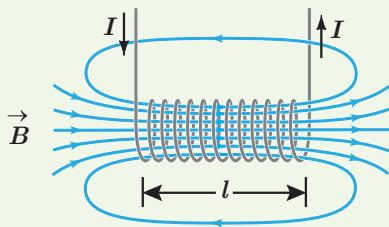


۱۷ اگر در مدار شکل زیر مقاومت رئوستا افزایش یابد، جریان القایی در حلقه رسانای داخلی در چه جهتی ایجاد می‌شود؟



۱۸ مساحت هر حلقه و طول سیم‌لوله شکل زیر به ترتیب  $20\text{ cm}^2$  و  $8\text{ cm}$  است. اگر این سیم‌لوله از  $1000$  حلقه نزدیک به هم تشکیل شده باشد،  
الف) ضریب القوای آن را پیدا کنید.

ب) چه جریانی از سیم‌لوله بگذرد تا در میدان مغناطیسی آن  $40\text{ mJ}/\text{انژری ذخیره شود؟}$



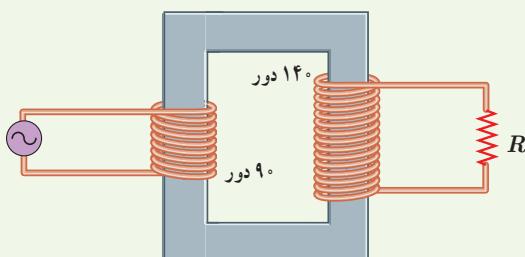
#### ۴-۵ جریان متناوب

۱۹ جریان متناوبی که بیشینه آن  $20\text{ A}$  و دوره آن  $20\text{ ms}$  است، از یک رسانای  $5$  اهمی می‌گذرد.

الف) اولین لحظه‌ای که در آن جریان بیشینه است چه لحظه‌ای است؟ در این لحظه نیروی محرکه القابی چقدر است؟

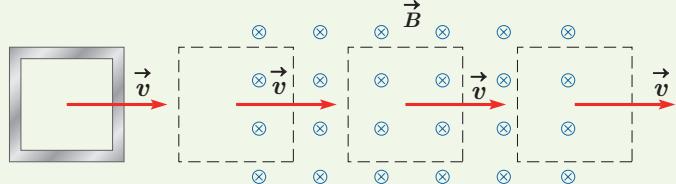
ب) در لحظه  $s = t = \frac{1}{4}$ ، جریان چقدر است؟

۲۰ در مبدل آرمانی شکل زیر، اگر بیشینه ولتاژ دوسر مقاومت  $R$  برابر  $7\text{ V}$  باشد، بیشینه ولتاژ مولد چقدر است؟

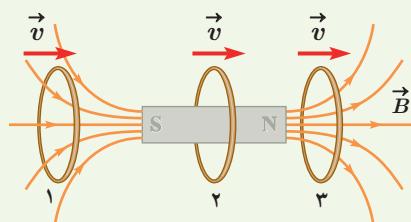


۱۵ حلقه رسانای مربعی شکل، به طول ضلع  $10\text{ cm}$  وارد میدان مغناطیسی درون‌سویی به اندازه  $20\text{ mT}$  و سپس از آن خارج می‌شود.

الف) در کدام مرحله شارعبوری از حلقه بیشینه است؟ مقدار شار گذرنده از حلقه در این حالت چقدر است؟  
ب) در کدام وضعیت (ها) شار گذرنده از حلقه تغییر می‌کند؟ جهت جریان القابی را در حلقه تعیین کنید.

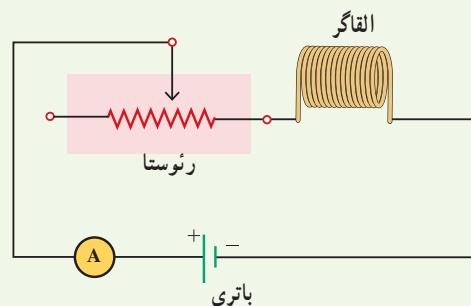


۱۶ حلقه رسانای به‌طرف یک آهنربای میله‌ای حرکت می‌کند. شکل زیر، حلقه را در سه وضعیت نسبت به آهنربا نشان می‌دهد. جهت جریان القابی را در حلقه برای هر وضعیت به‌طور جداگانه تعیین کنید.



#### ۴-۶ الفاگرهای

۱۷ شکل زیر مداری را نشان می‌دهد؛ شامل یک الفاگر (سیم‌لوله)، باتری، رئوستا و آمپرسنچ که به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ باتری، انژری ذخیره شده در الفاگر را زیاد کنیم چه راهی پیشنهاد می‌کنید؟



پیوست

## واژه‌نامه 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	جريان القابی	Bar magnet	آهنربای میله‌ای
Electric Current	جريان الکتریکی	Horseshoe magnet	آهنربای نعلی شکل
Alternating Current (AC)	جريان متناوب	Supercunductivity	ابررسانایی
Direct Current (DC)	جريان 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	الای الکترومغناطیسی
Capacitor	خازن	Electric induction	الای الکتریکی
Parallel – plate capacitor	خازن تخت	Magnetic induction	الای مغناطیسی
Discharging	حالی 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 – القاری (خود القابی)	Polarized charge	بار قطبیده
Electric dipole	دوقطبی الکتریکی	Lightning rod	برق گیر
Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی	Angular frequency	بسامد زاویه‌ای
Diamagnetism	دیامغناطیسی	Leyden jar	بطری لیدن
Light Emitting Diode (LED)	دیود نورگسیل	Paramagnetism	پارامغناطیس
Electrostatic precipitator	رسوب‌دهنده الکتروستاتیکی	Conservation of charge	پایستگی بار
Rheostat	رئوستا	Potentiometer	پتانسیومتر
Inclination angle	زاویه شیب	Charging	پر کردن – شارژ (خازن)
Drift velocity	سرعت سوچ	Cosmic ray	پرتو کیهانی
Triboelectric series	سری الکتریسیته مالشی (تریبوالکتریک)	Coil	پیچه
Solenoid	سیم‌لوله	Corona discharge	تحلیله هاله‌ای

Series circuits	مدارهای متواالی	Magnetic flux	شار مغناطیسی
Parallel circuits	مدارهای موازی	Inductance	ضریب القواری (ضریب خودالقای)
Resistor	مقاومت	Coefficient of resistivity	ضریب دمایی مقاومت ویژه
Electric resistance	مقاومت الکتریکی	Permitivity	ضریب گذردگی
Wire-wound resistor	مقاومت پیچه‌ای	Capacitance	ظرفیت
Composition resistor	مقاومت ترکیبی	Insulator	عایق
Internal resistance	مقاومت درونی	Ferromagnetism	فرماغناطیس
Variable resistor	مقاومت متغیر	Electric breakdown	فروریش 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	موولد وان دو گراف	Lenz's law	قانون لنز
Electric field	میدان الکتریکی	Kirchhoff's laws	قانون‌های کیرشهف
Magnetic field	میدان مغناطیسی	Right hand rule	قاده دست راست
Magnetic declination	میل مغناطیسی	Magnetic inductionSouth pole	قطب جنوب
Lichenberg patterns	نقش‌های لیچنبرگ	North pole	قطب شمال
Electric force	نیروی الکتریکی	Polarization	قطبش
Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی حرکه 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 الله خلیلی بروجنی، محمد تقی فلاحتی مروستی، چاپ اول ۱۳۹۱ ، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۲- مبانی فیزیک (جلد دوم) الکتریسیته و مغناطیس، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابت رزنیک و بیل واکر، ترجمه محمد رضا 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 منیره رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸ ، انتشارات فاطمی.
- ۵- نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویراست دوم، بیل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱ ، انتشارات آرکس.
- ۶- اصول فیزیک (جلد دوم)، هانس اوهانیان، ترجمه بهرام معلمی و جهانشاه میرزا بیگی، 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 به عنوان یک سیاست اجرایی مهم دنبال می‌کند. برای تحقق این امر در اقدامی نوآورانه سامانه تعاملی بر خط اعتبارسنجی کتاب‌های درسی راه اندازی شد تا با دریافت نظرات معلمان درباره کتاب‌های درسی نوگاشته، کتاب‌های درسی را در اولین سال چاپ، با کمترین اشکال به دانش آموزان و معلمان ارجمند تقدیم نماید. در انجام مطلوب این فرایند، همکاران گروه تحلیل محتوای آموزشی و پرورشی استان‌ها، گروه‌های آموزشی و دبیرخانه راهبری دروس 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 ۱۱۱۲۰۹

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 شاهوردی	چهارمحال و بختیاری
۴	سیمین فتحی	شهرستان‌های تهران	۲۹	عباس فرجی	یزد
۵	مصطفومه ضیا بری	سمنان	۳۰	مدیحه نامور	خراسان شمالی
۶	سیده فاطمه کمالی کارسالاری	مازندران	۳۱	اسدالله رفیعی	آذربایجان شرقی
۷	فتح الله دویرانی	زنجان	۳۲	فاطمه نصرت	اصفهان
۸	مجید عتیقی	خراسان رضوی	۳۳	ناصر غلامی	مرکزی
۹	فاطمه اوصلانلو	زنجان	۳۴	فاطمه سادات کریمی دیوکلائی	قم
۱۰	مصطفی خسروی	فارس	۳۵	زهرا عزتی	آذربایجان غربی
۱۱	ملیحه مدنی	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 تفنگ ساز رحیمی	قزوین	۳۹	حمدی رضا نوری	خراسان جنوبی
۱۵	صدیقه سیروسوی	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	مهرسا جلیلی	شهرتهران	۴۴	غیاض سلیمانی	خوزستان
۲۰	محمد رضا شفیعی	کرمان	۴۵	علی حسن بهامین پیلی	کهگیلویه و بویراحمد
۲۱	مهرسا حبیب الهی	شهرتهران	۴۶	مجید راسخ	گیلان
۲۲	محمد شفیع مرادی	همدان	۴۷	زبیر 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			