

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُمَّ صَلِّ عَلَى مُحَمَّدٍ وَآلِ مُحَمَّدٍ وَعَجِّلْ فَرَجَهُمْ

فیزیک (۲)

رشته ریاضی و فیزیک

پایه یازدهم

دوره دوم متوسطه





وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب:
پدیدآورنده:
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف:
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف:
مدیریت آماده‌سازی هنری:
شناسه افزوده آماده‌سازی:
نشانی سازمان:
ناشر:
چاپخانه:
سال انتشار و نوبت چاپ:

فیزیک (۲) - پایه یازدهم دوره دوم متوسطه - ۱۱۱۲۰۹
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری
احمد احمدی، روح‌الله خلیلی بروجنی، محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، سیدهدایت سجادی، سیروان مردوخی و علیرضا نیک‌نام (اعضای شورای برنامه‌ریزی و گروه تألیف) - محمد کاظم بهنیا (ویراستار ادبی)
اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
احمد رضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) - مجید ذاکری یونسی (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی (طراح جلد) - راحله زادفتح‌اله (طراح گرافیک و صفحه‌آرا) - فاطمه رئیسیان فیروزآباد (رسم) - سیده فاطمه طباطبایی، بهناز بهبود، سید کیوان حسینی، فاطمه صغری ذوالفقاری، زینت بهشتی شیرازی و حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)
تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
وبگاه: www.irtextbook.ir و www.chap.sch.ir
شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)
تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹
شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
چاپ نهم ۱۴۰۴

شابک ۹۷۸-۹۶۴-۰۵-۲۷۹۴-۸
ISBN: 978-964-05-2794-8



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

امام خمینی
«قُدَسِ سِرَّة»

- ۱-۱ بار الکتریکی ۲
- ۲-۱ پایداری و کوانتیده بودن بار الکتریکی ۳
- ۳-۱ قانون کولن ۵
- ۴-۱ میدان الکتریکی ۱۰
- ۵-۱ میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار ۱۲
- ۶-۱ خطوط میدان الکتریکی ۱۷
- ۷-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی ۲۱
- ۸-۱ پتانسیل الکتریکی ۲۳
- ۹-۱ میدان الکتریکی در داخل رساناها ۲۷
- ۱۰-۱ خازن ۳۲
- ۱۱-۱ خازن با دی الکتریک ۳۴
- ۱۲-۱ انرژی خازن ۳۸
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ۴۱



- ۱-۲ جریان الکتریکی ۴۶
- ۲-۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم ۴۹
- ۳-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی ۵۱
- ۴-۲ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها ۶۱
- ۵-۲ توان در مدارهای الکتریکی ۶۷
- ۶-۲ ترکیب مقاومت‌ها ۷۰
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ۷۹



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



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



- واژه‌نامه ۱۳۲
- منابع ۱۳۴

خرد هر کجا کنی آرد پید به نام خدا سازد آن را کفید

الف) سخنی با دانش آموزان عزیز

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

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

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

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

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

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

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

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

• گام اول: شناسایی مفهوم‌های مرتبط: نخست تشخیص دهید چه مفهوم‌های فیزیکی‌ای به مسئله مربوط‌اند، اگرچه در این مرحله هیچ محاسبه‌ای وجود ندارد؛ اما گاهی بحث‌انگیزترین بخش راه‌حل مسئله همین مرحله است. در این مرحله باید متغیر هدف مسئله — یعنی کمیتی را که سعی در یافتن مقدار آن دارید — شناسایی کنید. این کمیت می‌تواند نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره باردار، توان یک مولد یا انرژی ذخیره‌شده در یک 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 دهید. پیش از آنکه دست به کار محاسبه‌ها شوید، فهرستی از همه متغیرهای معلوم و مجهول تهیه کنید. سپس معادله‌ها را حل کنید و مجهول‌ها را به دست آورید.

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

ب) سخنی با دبیران ارجمند

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

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

• با ارزیابی رفتارهای متفاوت در ارتباط با خود و دیگران در موقعیت‌های گوناگون زندگی، رفتارهای سالم را انتخاب کند، گزارش کند و به کار گیرد.

• با درک ماهیت، روش و فرایند علم تجربی، امکان به کارگیری این علم را در حل مسائل واقعی زندگی (حال و آینده)، تحلیل و محدودیت‌ها و توانمندی‌های علوم تجربی را در حل این مسائل گزارش کند.

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

شیوه‌های آموزش: تجربه نشان می‌دهد که درک ایده‌های نهفته در بیشتر مفاهیم فیزیک و کاربرد آنها در زندگی برای اغلب دانش‌آموزان امکان‌پذیر است. آنچه در این راه در میزان موفقیت دانش‌آموزان مؤثر است، شیوه‌های آموزش 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 موفقیت هر برنامه درسی است. انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربه خود و به کارگیری شیوه‌های آموزشی مؤثر، بستر مناسبی برای یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش و همچنین شوق انگیزتر شدن فضای کلاس فراهم کنند.

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

قدردانی

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

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری



نظر سنجی کتاب درسی

الکتریسیته ساکن



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

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



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

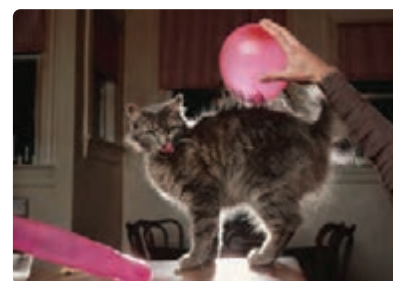
وقتی لباس‌های بافتنی را از تن خارج می‌کنیم، یا پس از اینکه چند قدم بر روی فرش راه می‌رویم، دستگیرهٔ فلزی در را با دست بگیریم، عملاً وجود الکتریسته را به صورت یک شوک الکتریکی حس می‌کنیم. در این فصل، به مطالعهٔ بارهای ساکن می‌پردازیم که به آن **الکتریستهٔ ساکن** (الکتروستاتیک) می‌گویند و ضمن یادآوری مطالب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



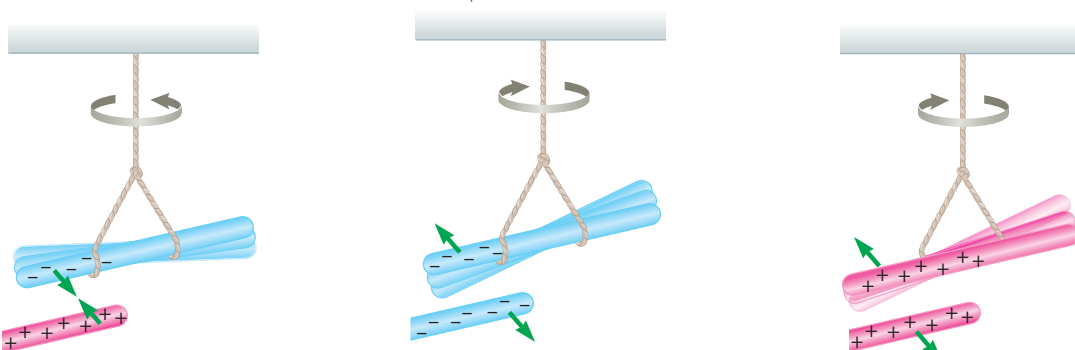
شکل ۱-۲ انتقال پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب به صورت الکتریکی صورت می‌گیرد.

۱-۱ بار الکتریکی

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



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



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

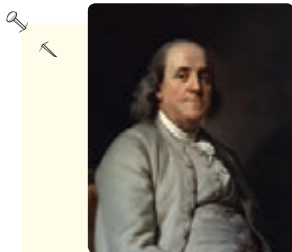
ب) وقتی دو میلهٔ پلاستیکی را با پارچهٔ پشمی مالش دهیم، همدیگر را دفع می‌کنند.

الف) وقتی دو میلهٔ شیشه‌ای را با پارچهٔ ابریشمی مالش دهیم، همدیگر را دفع می‌کنند.

شکل ۱-۴

۱- به صمغ فسیل شده دخت گفته می‌شود که به دلیل رنگ و زیبایی طبیعی، از دیرباز مورد توجه بوده است.

۲- واژه یونانی الکترون به صورت elektron نوشته می‌شود.



بنیامین فرانکلین (۱۷۹۰ - ۱۷۰۶م)

بنیامین فرانکلین دانشمند، نویسنده و سیاستمدار آمریکایی، در شهر بوستون به دنیا آمد و در شهر فیلادلفیا دیده از جهان فروست. فرانکلین در حدود سال ۱۷۴۴ میلادی با مبحث الکتریسته آشنا شد و عمده کشفیات مهم و بزرگ خویش را در بین سال‌های ۱۷۳۷ و ۱۷۵۱ به انجام رسانید و به شهرت علمی بی‌سابقه‌ای رسید. جالب است که او برخلاف سایر دانشمندان بزرگ، پس از چهل سالگی کارهای علمی اساسی خود را آغاز کرد. مهم‌ترین اثر فرانکلین، کتاب «در باب الکتریسته» است که بسیاری آن را با کتاب «اصول ریاضیات» اسحاق نیوتون مقایسه کرده‌اند. فرانکلین در این کتاب شالوده و بنیاد اصول علم الکتریسته را بر مبنای تجربیات و مشاهدات علمی خود تشریح کرده است. در واقع تجربیات متعدد و مهم فرانکلین آغازگر دوره‌ای جدید در مبحث الکتریسته بوده است و بسیاری از واژگانی که ما امروزه در الکتریسته 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 درجه‌بندی‌شده بدون بار

شکل ۱-۵

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

پرسش ۱-۱

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

۲-۱ 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^۱

$$e = 1/60217653 \times 10^{-19} C \approx 1/60 \times 10^{-19} C$$

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

جدول ۱-۱ سری الکتريسيته
مالشی (تریوالکتریک)^۱

انتهای مثبت سری

موی انسان

شیشه

نایلون

پشم

موی گربه

سُرب

ابریشم

آلومینیم

پوست انسان

کاغذ

چوب

پارچه کتان

کهرابا

برنج، نقره

پلاستیک، پلی اتیلن

لاستیک

تفلون

انتهای منفی سری

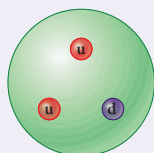
در هنگام مالش، با انتقال تعدادی الکترون از یک جسم به جسمی دیگر، تعادل بارها در اتم خنثی بر هم می خورد و جسمی که الکترون از دست می دهد، تعداد الکترون هایش کمتر از تعداد پروتون های آن می شود و بار الکتریکی خالص آن مثبت می گردد و همچنین، جسمی که الکترون اضافی دریافت می کند، الکترون هایش از پروتون های آن 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 الکتريسيته مالشی** (تریوالکتریک؛ Tribo در زبان یونانی به معنای مالش است) معلوم کرد (جدول ۱-۱). در این جدول مواد پایین تر، الکترون خواهی بیشتری دارند؛ یعنی اگر دو ماده در این جدول در تماس با یکدیگر قرار گیرند، الکترون ها از ماده بالاتر جدول به ماده ای که پایین تر قرار دارد منتقل می 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^۲ ثابت است؛ یعنی بار می تواند از جسمی به جسم دیگر منتقل شود، ولی هرگز امکان تولید یا نابودی یک بار خالص وجود ندارد. تاکنون هیچ آزمایشی این اصل را نقض نکرده است.

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

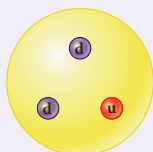
$$q = \pm ne \quad , \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1-1)$$

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

خوب است بدانید



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.

الکترون یک ذره بنیادی است و زیرساختار ندارد؛ یعنی از اجزای دیگری تشکیل نشده است. اما پروتون و نوترون برخلاف الکترون از ذراتی بنیادی به نام کوارک^۳ ساخته شده اند. کوارک ها بار $e/3$ یا $-e/3$ دارند، ولی این در تناقض با اصل کوانتیده بودن بار نیست؛ زیرا هیچ کوارک مستقلاً مشاهده نشده است؛ یعنی این بارهای کسری نمی توانند به طور مستقل دیده شوند. مثلاً یک پروتون از دو کوارک بالا^۴ (u) هر یک با بار $+e/3$ و یک کوارک پایین^۵ (d) با بار $-e/3$ 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.

۱- نیازی به حفظ این جدول نیست.

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

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 nC به او شوک خفیفی وارد کنید. در این انتقال بار، حدود چند الکترون بین شما و دوستان منتقل شده است؟
پاسخ: از رابطه ۱-۱ داریم:

$$q = ne$$

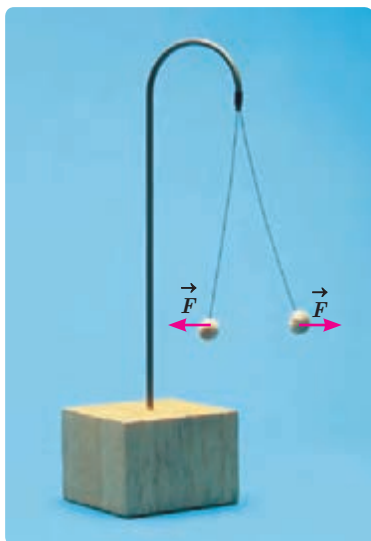
$$n = \frac{q}{e} = \frac{1 \times 10^{-9} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6 \times 10^9 \text{ الکترون}$$

تمرین ۱-۱

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

۳-۱ قانون کوئن

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 گوی‌های باردار همنام یکدیگر را با نیرویی هم‌اندازه دفع کرده‌اند.

فعالیت ۱-۱ (کار در کلاس)



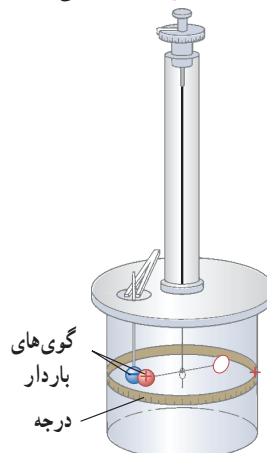
مطابق شکل، دو نی پلاستیکی را از نزدیکی یک انتهای آنها خم کنید و پس از مالش دادن با پارچه‌ای پشمی نزدیک یکدیگر قرار دهید. اگر نی‌ها به خوبی باردار شده باشند، نیروی دافعه آنها را می‌توانید به وضوح بر روی انگشتان خود حس کنید.

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 ۱-۷ طرحی از آزمایش کولن را نشان می‌دهد.



شارل آگوستین کولن (۱۸۰۶ - ۱۷۳۶م)

شارل آگوستین کولن در فرانسه به دنیا آمد. او در دانشگاه مباحث متنوعی از قبیل فلسفه، ریاضیات، نجوم و شیمی را آموخت، و در طی دوازده سال پس از فارغ‌التحصیلی شغل‌های متنوعی در شاخه‌های مختلف مهندسی داشت و مدتی را نیز خارج از فرانسه گذراند. کولن پس از بازگشت به پاریس در سال ۱۷۸۵ میلادی تقریباً هم‌زمان با بنیامین فرانکلین آزمایش معروف خود را در مورد اینکه نیروی بین دو بار ذره‌ای با مربع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد، به چاپ رساند. نتیجه این آزمایش که به قانون کولن معروف شده است از هر آزمون و تجربه‌ای سربلند بیرون آمده است و تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافت نشده است. کولن معتقد بود چنین قانونی برای قطب‌های مغناطیسی نیز برقرار است، گرچه هیچ‌وقت نتوانست به چنین رابطه‌ای برسد. نام کولن یکی از ۷۲ نامی است که روی برج ایفل ثبت شده است.



قانون کولن بیان می‌دارد:

اندازه نیروی الکتریکی (الکتروستاتیکی) بین دو بار نقطه‌ای^۱ که در راستای خط واصل آنها اثر می‌کند، با حاصل ضرب بزرگی آنها متناسب است و با مربع فاصله بین آنها نسبت وارون دارد. بنابراین، اندازه این نیرو برابر است با

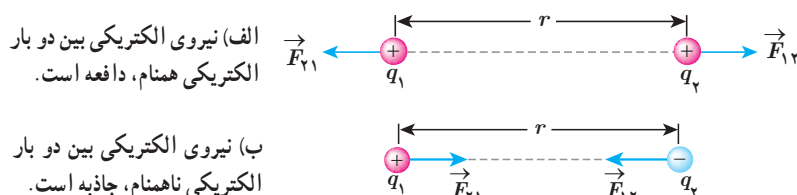
$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (۲-۱)$$

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^۲

$$k = 8.98755179 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2 \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$$

در شکل ۱-۸، نیرویی است که بار نقطه‌ای q_1 به بار نقطه‌ای q_2 وارد می‌کند و F_{12} 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 همدیگرند. به عبارتی:

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

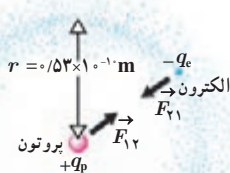


شکل ۱-۸

۱- در این بخش با نیروهای بین ذره‌های باردار (بارهای نقطه‌ای) سر و کار 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 $5/3 \times 10^{-11} \text{ m}$ است (شکل را ببینید). اندازه نیروی الکتریکی که پروتون به الکترون وارد می‌کند را محاسبه کنید.

ب) در هسته اتم هلیوم دو پروتون به فاصله تقریبی $r = 2/4 \times 10^{-15} \text{ m}$ 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:

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

ب) با استفاده از قانون کولن داریم:

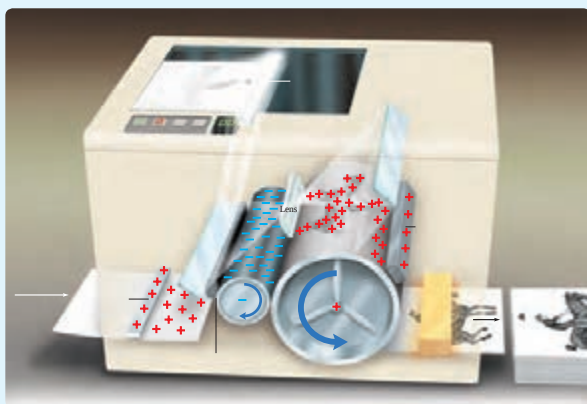
$$F = k \frac{|q_p||q_p|}{r^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2) \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(2/4 \times 10^{-15} \text{ m})^2} = 40 \text{ N}$$

که این به مراتب بزرگ‌تر از نیروی محاسبه شده در قسمت الف است. این نیروی بزرگ، از جنس دافعه است. بنابراین، هسته اتم باید فرو بپاشد. 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 بدانید

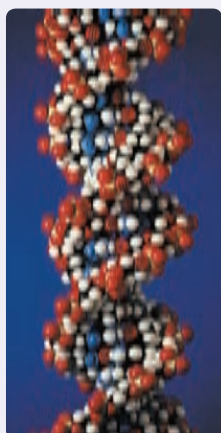
تمامی اجسام به علت جرمشان بر یکدیگر نیروی گرانشی نیز وارد می‌کنند که همواره از نوع جاذبه است. بزرگی این نیرو برای الکترون و پروتون اتم هیدروژن از مرتبه 10^{-47} N است. بنابراین، در حدود 10^4 بار کوچک‌تر از نیروی الکتریکی بین این دو ذره است و این نشان می‌دهد نیروی گرانشی به مراتب ضعیف‌تر از نیروی الکتریکی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

فعالیت ۱-۲



شکل روبه‌رو 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 دستورهای برای تعیین و ایجاد صفات ارثی ما و همهٔ 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 الکتریکی به یکدیگر پیوند خورده‌اند. مثلاً در شکل می‌بینیم که همواره آدنین و تیمین در دو طرف رشته و مقابل هم قرار دارند. به همین ترتیب G و C نیز در دو طرف رشته و مقابل هم قرار دارند.

بارهای مثبت در یک طرف رشته و بارهای منفی در طرف دیگر، دو رشته را به هم زیپ می‌کنند. این جاذبه آن‌قدر هست که رشته‌ها از هم نگسلند، اما به حد کافی ضعیف نیز هست تا در فرایند رونویسی از هم گسیخته گردد.

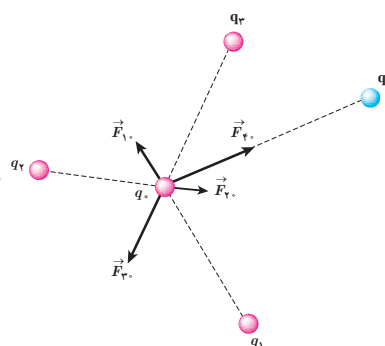
برهم‌نهی نیروهای الکتروستاتیکی: اگر به جای دو ذرهٔ باردار، تعدادی بار نقطه‌ای داشته باشیم، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذرهٔ باردار چگونه تعیین می‌شود؟ تجربه نشان می‌دهد که در این وضعیت، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برآیند نیروهایی است که هر یک از ذره‌های دیگر در غیاب سایر ذره‌ها، بر آن ذره وارد می‌کند.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

فرض کنید n ذرهٔ باردار داشته باشیم که در نزدیکی بار نقطه‌ای q قرار دارند. آن‌گاه نیروی خالص (برآیند) وارد بر بار نقطه‌ای q با جمع برداری زیر داده می‌شود:

$$\vec{F}_{T_q} = \vec{F}_{1_q} + \vec{F}_{2_q} + \dots + \vec{F}_{n_q}$$

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 ذرهٔ باردار در یک راستا قرار دارند یا عمود بر یکدیگرند.^۱



شکل ۱-۹ نیروی برآیند وارد بر بار q .

در اینجا برابر است با

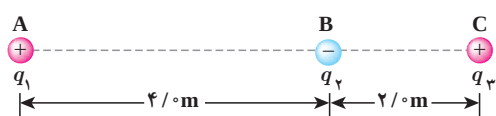
$$\vec{F}_{T_q} = \vec{F}_{1_q} + \vec{F}_{2_q} + \vec{F}_{3_q} + \vec{F}_{4_q}$$

پرسش ۱-۲

سه ذرهٔ باردار مانند شکل روبه‌رو، روی یک خط راست قرار دارند و فاصلهٔ 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 ذرهٔ 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 برنامهٔ درسی این کتاب بوده و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.



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

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

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

$$F_{12} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r_{12}^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/5 \times 10^{-6} \text{ C})(1/5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4.0 \text{ m})^2}$$

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

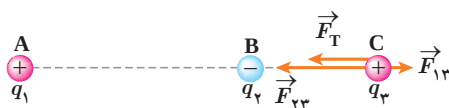
$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2} = (9.0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/5 \times 10^{-6} \text{ C})(4/5 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2.0 \text{ m})^2}$$

$$= 9/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

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

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

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



بنابراین، اندازه نیروی برآیند برابر با تفاضل اندازه آنهاست:

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

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

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

تمرین ۲-۱

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

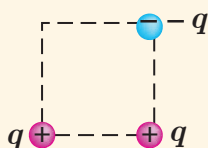
پرسش ۳-۱

سه ذره باردار مطابق شکل روبه‌رو، در سه گوشه یک مربع قرار دارند.

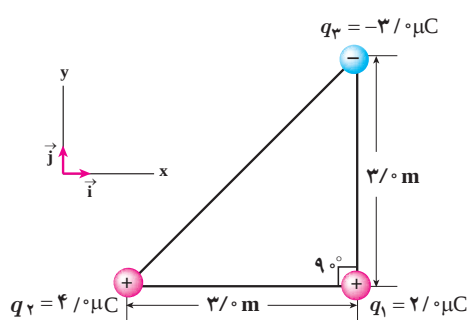
الف) جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار سمت راست پایینی را تعیین کنید.

ب) اگر ذره سمت چپ پایینی به جای q ، بار $-q$ داشته باشد، جهت نیروی الکتریکی خالص وارد

بر بار سمت راست پایینی چگونه خواهد بود؟



مثال ۱-۴



سه ذره باردار مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ای ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی خالص وارد بر ذره واقع در رأس قائمه را به دست آورده و اندازه این نیرو را محاسبه کنید.

پاسخ: نیروی الکتریکی بین بارهای q_1 و q_2 دافعه و نیروی بین بارهای q_2 و q_3 ، جاذبه است. با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

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

با توجه به دستگاه مختصات داده شده، $\vec{F}_{21}$ در جهت مثبت محور x است. بنابراین، $\vec{F}_{21} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$ می‌شود. به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای q_2 و q_3 داریم:

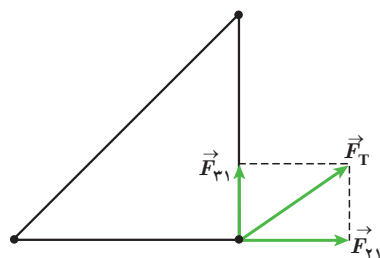
$$F_{32} = k \frac{|q_3||q_2|}{r_{32}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(3 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده، $\vec{F}_{32}$ در جهت مثبت محور y است. بنابراین، $\vec{F}_{32} = (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$ می‌شود. پس برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر بار q_1 برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{32} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

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

$$F_T = \sqrt{F_{21}^2 + F_{32}^2} = \sqrt{(8 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (6 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 10 \times 10^{-3} \text{ N}$$

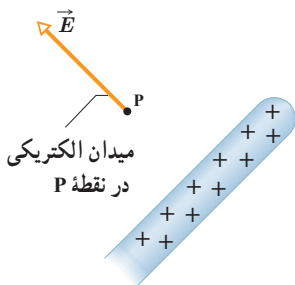
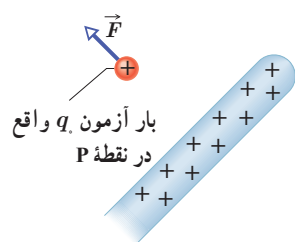


تمرین ۱-۳

- در مثال ۱-۴؛ الف) اگر علامت بار q_3 تغییر کند جهت نیروی برآیند وارد بر بار q_1 چگونه خواهد شد؟
 ب) اگر علامت بار q_2 تغییر کند، جهت نیروی برآیند وارد بر بار q_1 چگونه خواهد شد؟
 پ) آیا اندازه نیروی برآیند وارد بر بار q_1 در قسمت‌های الف و ب با مقدار به دست آمده در مثال ۱-۴ متفاوت است؟

۱-۴ میدان الکتریکی

در بخش ۱-۱ دیدیم که دو بار الکتریکی q_1 و q_2 که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار دارند، برهم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. ولی این پرسش مطرح می‌شود که بارهای q_1 و q_2 چطور حضور یکدیگر را حس می‌کنند؟ به عبارت دیگر، این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می‌توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ در فیزیک پاسخ این پرسش این گونه است که بار q_1 خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می‌کند که به آن اصطلاحاً **میدان الکتریکی** بار q_1 گفته می‌شود. وقتی بار q_2 را در نقطه‌ای از فضای پیرامون بار q_1 قرار دهیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی‌ای قرار می‌گیرد که بار q_1 پیش‌تر در آن نقطه ایجاد کرده است. بنابراین، بار q_1 ، نه با تماس با بار q_2 بلکه به وسیله میدان الکتریکی خودش بر بار q_2 نیرو وارد می‌کند.



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

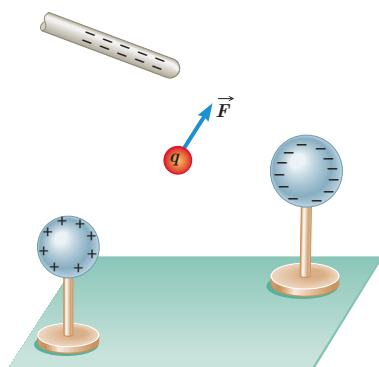
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (۳-۱)$$

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

در رابطه ۳-۱ یکای میدان الکتریکی ($\vec{E}$)، نیوتون بر کولن (N/C) است. بزرگی برخی از میدان‌های الکتریکی در جدول ۲-۱ داده شده است.

جدول ۲-۱ بزرگی برخی از مقادیر میدان‌های الکتریکی			
چشمه	بزرگی میدان (N/C)	چشمه	بزرگی میدان (N/C)
سیم کشی‌های داخل منزل	$۱۰^{-۲}$	در نزدیکی شانه باردار	$\approx ۱۰^۲$
امواج رادیویی	$\approx ۱۰^{-۱}$	در نزدیکی فرستنده رادار	۷×۱۰^۳
گوشی همراه	$۳۵ - ۵۰$	جو (توفان تندری)	$۱۰^۴$
۳۰ سانتی‌متری از یک دستگاه پخش صوت	۹۰	در نزدیکی سطح کلاهک مولد وان دوگراف	۲×۱۰^۶
جو (هوای آرام)	≈ ۱۵۰	فرو ریزش الکتریکی در هوا	۳×۱۰^۶
آفتاب (متوسط)	$۱۰^۳$	در سطح هسته اورانیم	۲×۱۰^{۱۱}

مثال ۱-۵



بار آزمون نشان داده شده در شکل $q = +۳/۰ \times ۱۰^{-۸} \text{ C}$ است و از سوی دو گوی و یک میله باردار نیرویی برابر با $F = ۶/۰ \times ۱۰^{-۵} \text{ N}$ در جهت نشان داده شده بر آن وارد می‌شود.

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

ب) اگر بار $+۱۲ \times ۱۰^{-۸} \text{ C}$ را به جای q قرار دهیم، چه نیرویی به آن وارد می‌شود؟

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

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

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

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

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

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

خوب است بدانید: میدان الکتریکی مخازن نفت کش ها

وقتی آب به سطحی برخورد کند و از آن بپاشد، قطره های آب باردار می شوند. معمولاً قطره های بزرگ تر، دارای بار مثبت و قطره های کوچک تر، دارای بار منفی می شوند. قطره های بزرگ تر نسبتاً سریع فرو می افتند و قطره های کوچک تر که دارای بار منفی اند بیشتر در هوا می مانند. اگر تهویه هوا کم باشد، تعداد قطره های موجود در هوا به طور چشمگیری افزایش می یابد و بدین ترتیب، یک میدان الکتریکی بزرگ (حدود 800 N/C) ایجاد می شود؛ این وضعیتی است که معمولاً در حمام رخ می دهد. به همین ترتیب، در حین تمیز کردن مخازن کشتی های نفت کش، وقتی قطره های آب به صورت افشانه از شیلنگ خارج شده و بر کف مخزن یا دیواره های آن می پاشند، باردار می شوند و در نتیجه مخزن پر از بخار آب باردار می شود. ممکن است این ذرات باردار با نوک فلزی آب فشان شیلنگ جرقه بزنند. اگر مخزن محتوای بخار نفت خام باشد، این جرقه ها می توانند بخار را مشتعل کنند و باعث انفجار مخزن گردند. برای رفع این خطر، پیش از تمیز کردن مخزن، یک گاز بی اثر به درون آن پمپ می شود تا اکسیژن موجود به اندازه ای کاهش یابد که از بروز انفجار جلوگیری کند.

۱-۵ میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار

می خواهیم میدان الکتریکی ناشی از ذره ای با بار q را در نقطه A که به فاصله r از بار q قرار دارد (شکل ۱-۱۱)، محاسبه کنیم. برای این محاسبه از رابطه ۱-۳ استفاده می کنیم. اگر بار آزمون q_0 در نقطه A قرار گیرد، بار q به آن نیروی $\vec{F}$ وارد می کند. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی $\vec{F}$ را محاسبه می کنیم و با جای گذاری در رابطه $E = F/q_0$ ، بزرگی میدان الکتریکی بار q را در نقطه A به دست می آوریم:

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

در نتیجه:

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

رابطه ۱-۴ عامل های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از ذره ای با بار q را مشخص می کند. طبق این رابطه، میدان با اندازه بار q ، نسبت مستقیم و با مربع فاصله از آن، نسبت وارون دارد. همان طور که پیش تر دیدیم جهت بردار میدان الکتریکی $\vec{E}$ در نقطه A ، همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون است که به طور فرضی در نقطه A می گذاریم.



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



مولد وان دوگراف^۱ وسیله‌ای است که با استفاده از تسمه‌ای متحرک، بار الکتریکی را بر روی یک کلاهک توخالی فلزی جمع می‌کند. فرض کنید کلاهک این مولد، کره‌ای با شعاع 1 m است و باری به بزرگی $1\text{ }\mu\text{C}$ 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 m ، 2 m ، 3 m و 4 m از مرکز کره به دست آورید و سپس با نقطه‌یابی، نمودار بزرگی میدان الکتریکی را برحسب فاصله از مرکز کره رسم کنید.

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

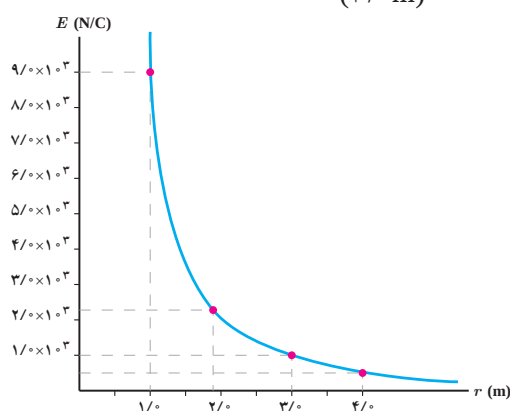
$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

$$E_1 = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1.0 \text{ m})^2} = 9.0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2.0 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2/3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

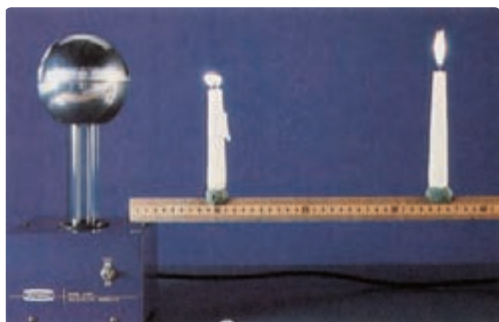
$$E_3 = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3.0 \text{ m})^2} = 1.0 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_4 = (9.0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4.0 \text{ m})^2} = 0.5625 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 0.56 \times 10^3 \text{ N/C}$$



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

برای 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.



تمرین ۴-۱

طبق مدل بور برای اتم هیدروژن، در حالت پایه فاصله الکترون از پروتون هسته برابر با $5/3 \times 10^{-11} \text{ m}$ است. الف) اندازه میدان الکتریکی ناشی از پروتون هسته را در این فاصله تعیین کنید. ب) در چه فاصله‌ای از پروتون هسته، بزرگی میدان الکتریکی برابر با بزرگی میدان الکتریکی حاصل از مولد وان دوگراف مثال پیش در فاصله $1/0 \text{ m}$ از مرکز کلاهیگ 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 ۱-۴ دیدیم اگر چند بار نقطه‌ای مانند $q_1, q_2, \dots$ داشته باشیم نیروی الکتریکی برآیند حاصل از این بارها بر بار آزمون q_0 با استفاده از اصل برهم نهی نیروهای کولنی از رابطه زیر به دست می‌آید:

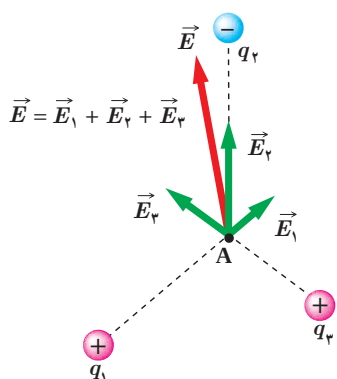
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} + \dots$$

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:

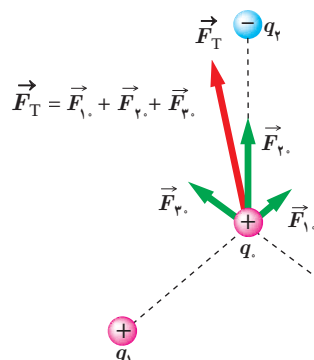
$$\frac{\vec{F}_T}{q_0} = \frac{\vec{F}_{10}}{q_0} + \frac{\vec{F}_{20}}{q_0} + \dots$$

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

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 ۱-۱۲ - 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^۱.



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

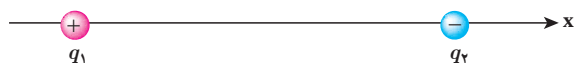


الف) نیروی $\vec{F}_T$ ، نیروی برآیند وارد بر بار آزمون q_0 است.

شکل ۱-۱۲

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

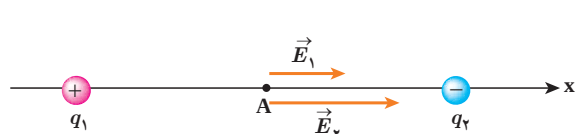
مطابق شکل، دو ذره با بارهای $q_1 = 4 \mu\text{C}$ و $q_2 = -6 \mu\text{C}$ در فاصله 8 m از یکدیگر ثابت شده‌اند. اندازه میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های زیر به دست آورید:



(الف) در وسط خط واصل دو ذره،

(ب) در نقطه‌ای روی خط واصل دو ذره به فاصله 8 m از q_1 و 16 m از q_2 .

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

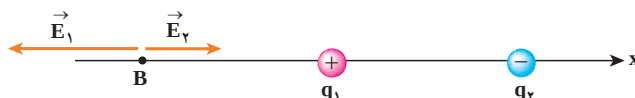
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 2.3 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 3.375 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 3.4 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین:

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

(ب) اکنون 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

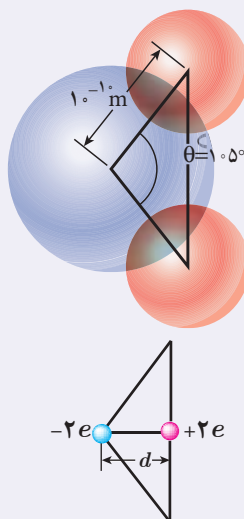
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(8 \text{ m})^2} = 5.625 \times 10^2 \text{ N/C} \approx 5.6 \times 10^2 \text{ N/C}$$

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

بنابراین:

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

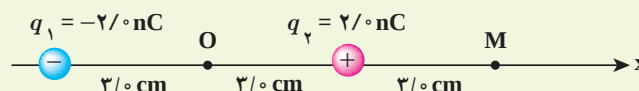
خوب است بدانید



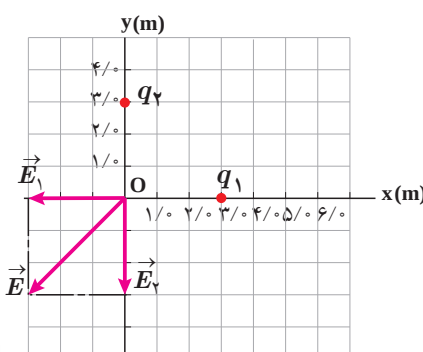
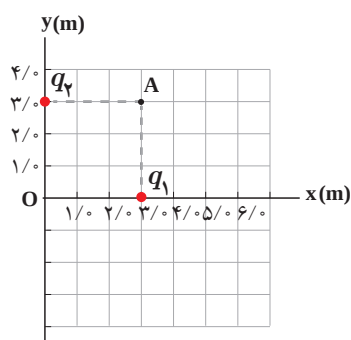
دوقطبی الکتریکی آرایشی از بارهای الکتریکی است که در آن دو ذره با بزرگی بار q یکسان و علامت مخالف در فاصله d از هم روی محوری که به آن محور دوقطبی گفته می‌شود قرار گرفته‌اند. مولکول آب (H_2O) از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن ساخته شده است. اتم اکسیژن الکترون‌های دو اتم هیدروژن را به سمت خود می‌کشد و بدین ترتیب اتم‌های هیدروژن بار مثبت و خودش بار منفی پیدا می‌کند. این سه اتم مطابق شکل به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که خطوط وصل‌کننده مراکز اتم‌های هیدروژن به مرکز اتم اکسیژن، زاویه 105° 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 هم 6 cm است. میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های O و M به دست آورید.



مثال ۱-۸



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

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

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

در نتیجه میدان الکتریکی خالص برابر است با

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

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

و از آنجا اندازه میدان الکتریکی خالص چنین می‌شود:

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

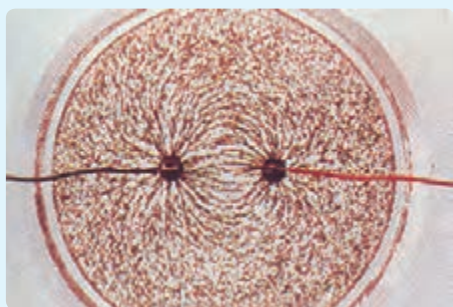
$$= 7.07 \times 10^3 \text{ N/C} \approx 7.1 \times 10^3 \text{ N/C}$$

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

۱-۶ خطوط میدان الکتریکی

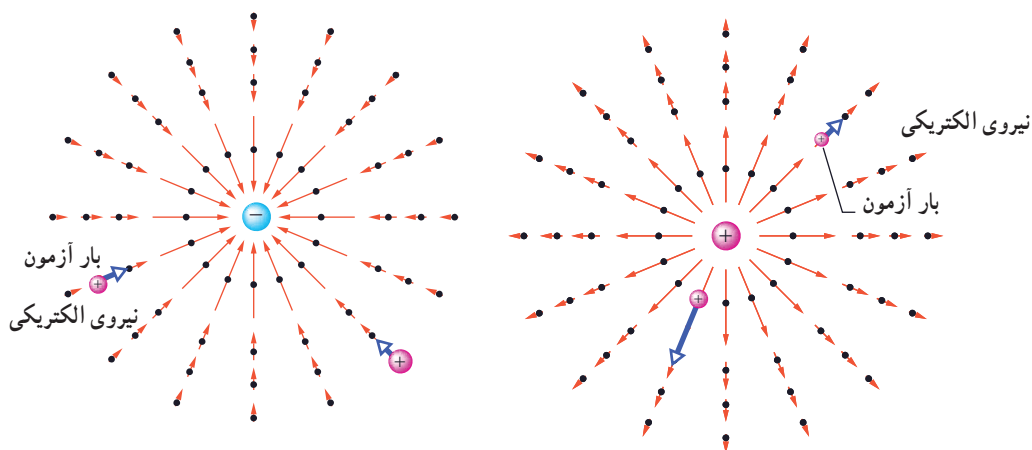
پیش از این دیدیم بارهای الکتریکی در فضای پیرامون خود میدان الکتریکی ایجاد می کنند. آیا می توانید بردار میدان الکتریکی را در نقاط پیرامون یک ذره باردار مثبت یا منفی تجسم کنید؟ مایکل فاراد در نخستین بار در میانه قرن نوزدهم میلادی روشی را برای تجسم این بردارها ارائه کرد. برای مجسم کردن میدان الکتریکی در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

فعالیت ۱-۳ (کاردر کلاس)



درون یک ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی با عمق کم، مقداری پارافین مایع یا روغن کرچک به عمق حدود 5cm بریزید و داخل آن دو الکتروند نقطه‌ای قرار دهید. الکترونها را با سیم به پایانه‌های مثبت و منفی یک مولد ولتاژ بالا، مانند مولد وان دوگراف وصل کنید. روی سطح پارافین، مقدار کمی بذر چمن یا خاکشیر پاشید. مولد را روشن کنید. اکنون به سمت گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروند توجه کنید. شکل سمت گیری دانه‌ها در این فضا را رسم کنید.

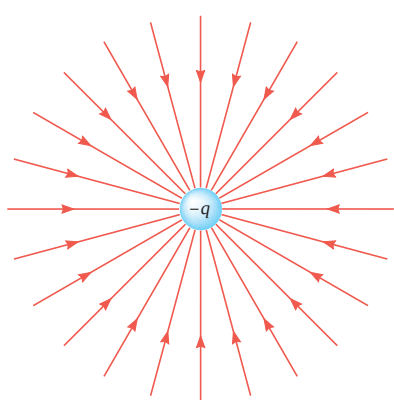
اگر یک بار آزمون را در نزدیکی یک ذره باردار مثبت یا منفی قرار دهیم، بسته به نوع بار، نیروی الکتریکی وارد به بار آزمون در جهت دور شدن از ذره (شکل ۱-۱۳ الف) و یا در جهت نزدیک شدن به آن (شکل ۱-۱۳ ب) خواهد بود.



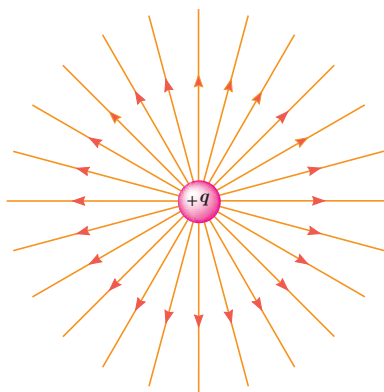
الف) میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار مثبت ساکن. ب) میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار منفی ساکن.

شکل ۱-۱۳

خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت 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 ۱۴-۱

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

قاعده‌های رسم خطوط میدان الکتریکی عبارت‌اند از:

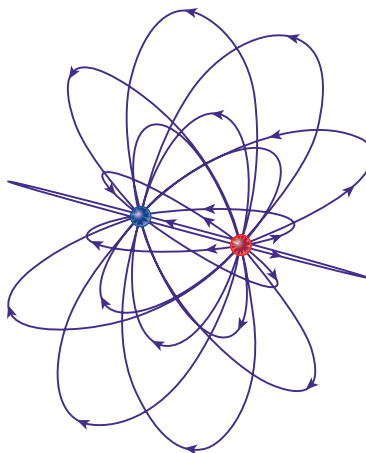
۱- در هر نقطه، بردار میدان الکتریکی باید مماس بر خط میدان الکتریکی عبوری از آن نقطه و در همان جهت باشد (شکل ۱۵-۱).

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

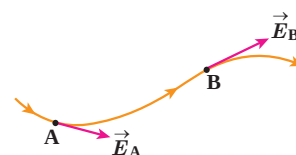
۳- در آرایشی از بارها خطوط میدان الکتریکی از بارهای مثبت شروع و به بارهای منفی ختم می‌شوند.

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

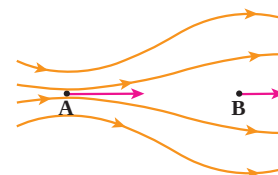
تجسم واقعی خطوط میدان، در فضاست، و بنابراین طرحی سه‌بعدی دارد (شکل ۱۸-۱).



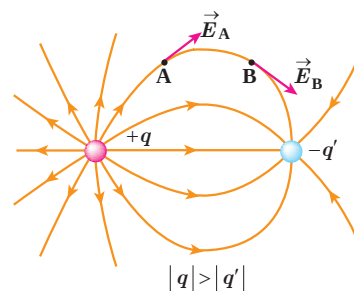
شکل ۱۸-۱ نمایش سه‌بعدی خطوط میدان برای یک دو قطبی الکتریکی



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



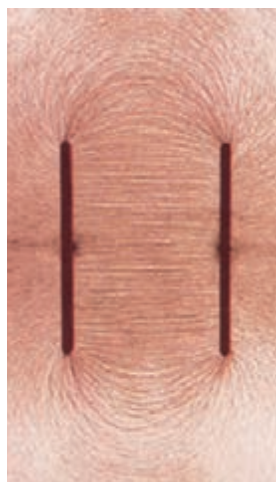
شکل ۱۶-۱ اطراف نقطه A خطوط میدان متراکم‌تر از اطراف نقطه B است. بنابراین، بزرگی میدان در نقطه A بیشتر از نقطه B است.



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

پرسش ۴-۱

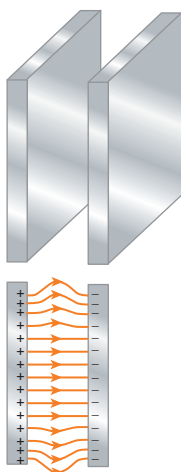
به نظر شما چرا خطوط میدان الکتریکی برآیند هرگز یکدیگر را قطع نمی کنند؟



میدان الکتریکی یکنواخت : اگر دوباره اسباب فعالیت ۱-۳ را سوار کنید و این بار الکترودهای نقطه‌ای را با دو صفحه فلزی موازی جایگزین کنید و دوباره به سمت گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروود توجه کنید، طرحی از خطوط میدان الکتریکی را مشاهده می کنید که در شکل ۱-۱۹ 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 این نقاط هم اندازه و هم جهت است. به چنین میدانی، میدان الکتریکی یکنواخت گفته می شود (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 ذره‌ای q در میدان الکتریکی $\vec{E}$ ناشی از اجسام باردار دیگری قرار گیرد، این میدان بر آن نیروی $\vec{F}$ را وارد می کند. نیروی $\vec{F}$ از رابطه زیر به دست می آید :

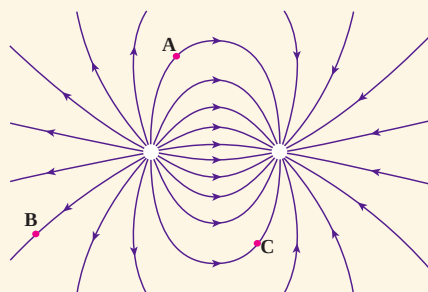
شکل ۱-۱۹ سمت گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکتروود صفحه‌ای موازی



$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (۴-۱)$$

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

پرسش ۵-۱



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

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

فعالیت ۴-۱



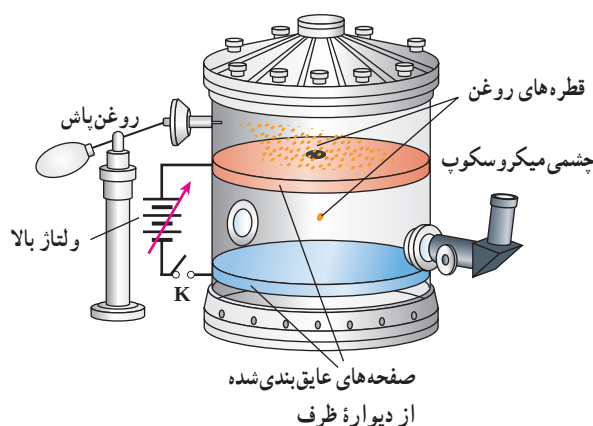
تولیدمثل برخی از گل‌ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده‌ها به واسطه میدان الکتریکی، از یک گل به زنبور و از زنبور به گل دیگر منتقل می‌شوند. در این باره تحقیق کنید.

مثال ۱-۹: آزمایش قطره - روغن میلیکان



رابرت اندرو میلیکان^۲ (۱۸۶۸-۱۹۵۳م)
فیزیک‌دان خبره آمریکایی که در سال
۱۹۲۳ میلادی به خاطر کار خود در تعیین
بار الکترون و نیز اثر فوتوالکتریک برنده
جایزه نوبل گردید.

همان‌طور که پیش‌تر دیدیم بار الکتریکی با هر مقداری ظاهر نمی‌شود؛ بلکه همواره مضرب درستی از بار بنیادی e است ($q = \pm ne$). آزمایش کلاسیک فیزیک‌دان آمریکایی رابرت میلیکان به توضیح این امر می‌پردازد. این آزمایش اکنون به نام آزمایش قطره - روغن میلیکان^۱ معروف است. میلیکان بین دو ورقه فلزی موازی و افقی میدان الکتریکی قائم یکنواخت $\vec{E}$ را توسط یک منبع ولتاژ بالا ایجاد کرد (که می‌توانست آن را قطع و وصل کند). او در مرکز ورقه بالایی چندین روزنه کوچک ایجاد کرده بود که از طریق آنها قطره‌های روغن حاصل از یک روغن پاش به ناحیه بین دو ورقه می‌پاشید. بیشتر این قطره‌ها در اثر مالش با دهانه خروجی روغن پاش، باردار می‌شدند. میلیکان با تغییر دادن میدان الکتریکی بین صفحات به حرکت قطره‌های روغن در این فضا 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 - روغن‌های متفاوت دریافت که بار قطره‌ها 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 می‌دهد.



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 $1.6 \times 10^{-15} \text{ kg}$ و میدان الکتریکی دارای بزرگی $5 \times 10^5 \text{ N/C}$ و رو به پایین باشد، تعداد الکترون‌هایی 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 می‌کند، 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 می‌گیریم که بار قطره روغن باید منفی باشد؛ یعنی باید قطره روغن الکترون به دست آورده باشد. حال به دنبال تعداد الکترون‌هایی هستیم که این قطره به دست آورده است. از شرط تعادل نیروها داریم:

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

نیروی الکتریکی



وزن

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

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

$$n = \frac{8/0 \times 10^{-19} \text{ C}}{1/60 \times 10^{-19} \text{ C}} = 5$$

بنابراین، قطرهٔ روغن ۵ الکترون به‌دست آورده است.

تمرین ۱-۷

روی سطح بادکنکی به جرم 10^{-6} g بار الکتریکی 20 nC ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی قرار می‌دهیم. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را در صورتی که بادکنک معلق بماند، تعیین کنید. اندازهٔ نیروی شنواری روبه بالای وارد بر بادکنک را 50° N فرض کنید.

فعالیت ۱-۵



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

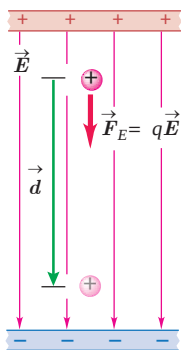
۷-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی

دو ذرهٔ 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 ذرهٔ شکل ۱-۲۱ وابسته است و همان‌طور که در کتاب فیزیک سال دهم دیدید به آن **انرژی پتانسیل الکتریکی** می‌گوییم. برای آنکه به توصیفی کتی از این انرژی دست یابیم، میدان الکتریکی یکنواختی را مطابق شکل ۱-۲۲ در نظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحهٔ باردار برقرار شده است.

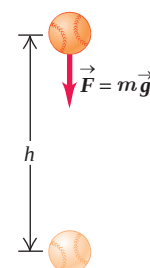
اگر بار الکتریکی $q +$ را از مجاورت صفحه مثبت رها کنیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی (با چشم‌پوشی از گرانش)، به طرف صفحهٔ منفی شروع به حرکت می‌کند و به تدریج تندی و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد. این وضعیت، شبیه چیزی است که در کتاب فیزیک سال دهم دیدیم. در آنجا نیز مشاهده کردیم که وقتی جسمی به جرم m از ارتفاع h رها می‌شود، جسم رو به پایین حرکت کرده و انرژی جنبشی



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



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



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

آن بر اثر کاهش انرژی پتانسیل گرانشی به تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۱-۲۳). همچنین دیدیم که کار نیروی گرانشی برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است ($W_g = -\Delta U_g$).

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

$$W_E = -\Delta U_E \quad (۷-۱)$$

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

بار ذره‌ای q را در میدان الکتریکی یکنواخت $\vec{E}$ در نظر بگیرید که جابه‌جایی $\vec{d}$ را موازی میدان الکتریکی، انجام می‌دهد (شکل ۱-۲۲). طبق تعریف کار که در سال قبل دیدید، کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی ثابت $\vec{F}_E$ در طی جابه‌جایی $\vec{d}$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

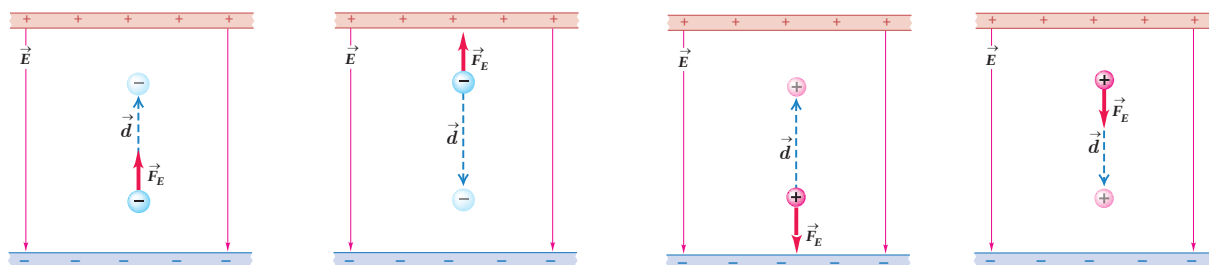
با توجه به اینکه $F_E = |q|E$ است، این رابطه به صورت زیر می‌شود:

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

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

$$\Delta U_E = -W_E = -|q| E d \cos\theta \quad (۸-۱)$$

که در آن، θ زاویه بین نیروی $\vec{F}_E$ و جابه‌جایی $\vec{d}$ است. (در این کتاب، در استفاده از رابطه ۸-۱، صرفاً با جابه‌جایی‌های هم‌راستا با میدان الکتریکی و یا عمود بر میدان الکتریکی سروکار خواهیم داشت). در این رابطه، بار الکتریکی (q) برحسب کولن (C)، بزرگی میدان الکتریکی (E) برحسب نیوتون بر کولن (N/C)، اندازه جابه‌جایی (d) برحسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی (ΔU_E) برحسب ژول (J) است. توجه کنید که این رابطه چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است.



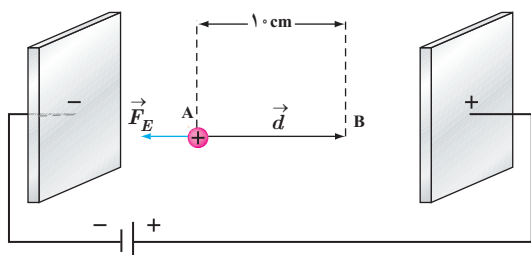
(ت) بار منفی را در خلاف جهت میدان الکتریکی $\vec{E}$ جابه‌جا می‌کنیم: میدان الکتریکی کار مثبت W_E را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی U_E کاهش می‌یابد.

(پ) بار منفی را در جهت میدان الکتریکی $\vec{E}$ جابه‌جا می‌کنیم: میدان الکتریکی کار منفی W_E را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی U_E افزایش می‌یابد.

(ب) بار مثبت را در خلاف جهت میدان الکتریکی $\vec{E}$ جابه‌جا می‌کنیم: 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 $\vec{E}$ جابه‌جا می‌کنیم: میدان الکتریکی کار مثبت W_E را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی U_E کاهش می‌یابد.

شکل ۱-۲۴



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

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

پاسخ:

الف) با توجه به رابطه 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:

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

$$-3.2 \times 10^{-17} \text{ J} = \frac{1}{2}(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(v^2 - v_0^2) \Rightarrow v_0 = 1.96 \times 10^5 \text{ m/s} \approx 2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$$

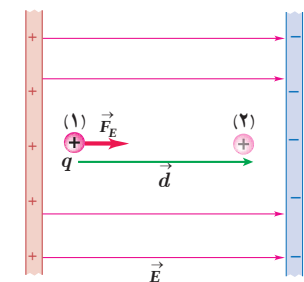
تمرین ۸-۱

در مثال ۱-۱۰ اگر جای قطب‌های باتری عوض شود و پروتون را در نقطه A از حالت سکون رها کنیم، پروتون با چه تندی‌ای به نقطه B می‌رسد؟

۸-۱ پتانسیل الکتریکی

در بخش قبل دیدیم تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک ذره باردار به بار الکتریکی آن بستگی دارد؛ مثلاً با دوبرابر شدن بار ذره، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز دوبرابر می‌شود. بنابراین، نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار ذره، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است. به این نسبت، **اختلاف پتانسیل الکتریکی** دونه‌ای می‌گوییم که ذره میان آنها جابه‌جا شده است (شکل ۲۵-۱) و آن را با ΔV نمایش می‌دهیم:

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



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

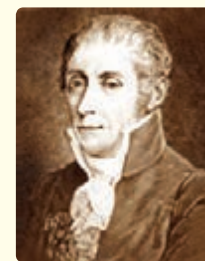
که در آن V کمیتی زرده‌ای موسوم به پتانسیل الکتریکی است که مقدار آن در نقطه‌های ۱ و ۲ به ترتیب V_f و V_i است. در این رابطه، اختلاف پتانسیل الکتریکی (ΔV) برحسب ژول بر کولن (J/C) است که آن را به افتخار *لاندرو ولتا*، ولت می‌نامند و با نماد V نمایش می‌دهند.

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 ۳-۱ برخی از اختلاف پتانسیل‌ها (ولتاژهای) متداول را نشان می‌دهد.

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

$$V = \frac{U_E}{q} \quad (۱-۱۰)$$

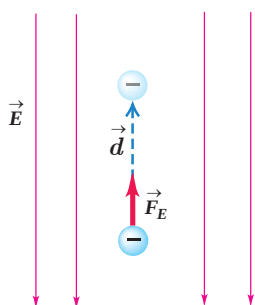
جدول ۳-۱ برخی از ولتاژهای متداول	
۶۰-۹۰ mV	پتانسیل استراحت نورون
۱/۵ V	باتری قلمی
۱۲ V	باتری اتومبیل
۱۱۰-۱۲۰ V	برق خانگی در برخی از کشورها
۲۲۰-۲۴۰ V	برق خانگی در ایران و اغلب کشورها
۲۴۰۰۰ V	مولد نیروگاه برق
۱۰ ^۴ -۱۰ ^۶ V	خطوط انتقال برق ولتاژ بالا
۱۰ ^۸ -۱۰ ^۹ V	آذرخش



الساندرو ولتا (۱۸۲۷-۱۷۴۵م)

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

مثال ۱-۱۱



در نتیجه برخورد پرتوهای کیهانی با مولکول‌های هوا، الکترون‌هایی از این مولکول‌ها کنده می‌شوند. در نزدیکی سطح زمین، میدان الکتریکی با بزرگی 15 N/C و جهت رو به پایین وجود دارد. الف) اگر یکی از این الکترون‌ها، تحت تأثیر این میدان 50 m رو به بالا جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟ ب) اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه‌ای که الکترون بین آنها جابه‌جا شده چقدر است؟

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

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|Ed \cos \theta = -(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})(15 \text{ N/C})(50 \text{ m}) \cos 0^\circ$$

$$= -1/20 \times 10^{-14} \text{ J}$$

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

$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = \frac{-1/20 \times 10^{-14} \text{ J}}{-1/60 \times 10^{-19} \text{ C}} = 7/50 \times 10^4 \text{ V} = 75/0 \text{ kV}$$

تمرین ۹-۱

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



شکل ۹-۱ برخی از باتری‌های متداول



شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا گوشی تلفن همراه از آنها استفاده می‌شود (شکل ۱-۲۶) و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها ولتاژهای متفاوتی دارند؛ مثلاً باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ ولتی یا بیشترند. هر باتری دو پایانه دارد که یکی با مثبت و دیگری با منفی نشان داده می‌شود. بنا به قرارداد، اختلاف پتانسیل الکتریکی دو سر باتری برابر با پتانسیل پایانه مثبت منهای پتانسیل پایانه منفی است. اگر پتانسیل پایانه منفی را با V_- و پتانسیل پایانه مثبت را با V_+ نشان دهیم، داریم:

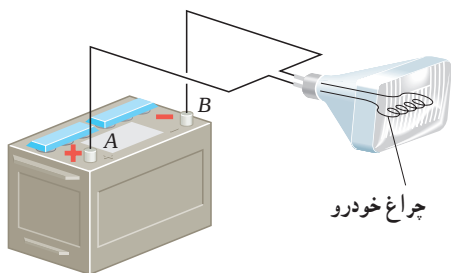
$$\Delta V = V_+ - V_-$$

بنابراین، وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی پتانسیل پایانه مثبت به اندازه ۱۲ ولت از پتانسیل پایانه منفی آن بیشتر است؛ مثلاً اگر پتانسیل پایانه منفی را برابر با $-4V$ فرض کنیم، پتانسیل پایانه مثبت برابر $+8V$ خواهد شد. می‌توان پایانه منفی را مرجع پتانسیل در نظر 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 می‌سنجند. نقطه زمین را در مدارهای الکتریکی با نماد $\perp$ نشان می‌دهند.

تمرین ۱۰-۱

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

مثال ۱۲-۱



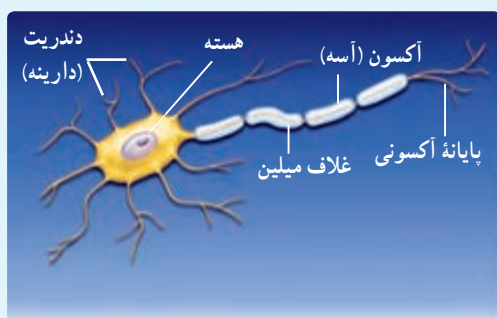
اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر $12V$ است. اگر بار الکتریکی $50C$ - کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟
پاسخ: با استفاده از رابطه ۹-۱ داریم:

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

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_+ - V_-) = (-50C)(+12V) = -600J$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه $600J$ 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 سیگنال‌ها را دریافت می‌کند و اطلاعات به صورت سیگنال‌های الکتریکی در امتداد اعصاب گوناگون منتقل می‌شوند. هنگام انجام هر عمل خاصی، سیگنال‌های الکتریکی زیادی تولید می‌شوند. این سیگنال‌ها حاصل کنش الکتروشیمیایی در یاخته‌های عصبی موسوم به نورون هستند. درباره چگونگی کار نورون‌ها تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

رابطه اختلاف پتانسیل دو نقطه و اندازه میدان الکتریکی یکنواخت: همان‌طور که پیش‌تر گفتیم اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه از میدان الکتریکی، مستقل از نوع و اندازه بار جابه‌جا شده بین دو نقطه است. 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 θ داریم

$$\Delta U_E = -|q|Ed \cos 0^\circ = -qEd$$

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:

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

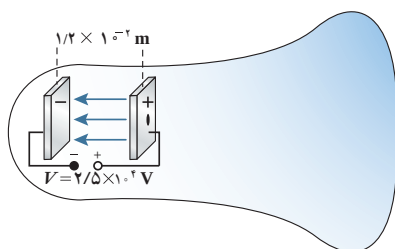
در این رابطه ΔV بر حسب ولت، E بر حسب نیوتون بر کولن، و d بر حسب متر است. بنابراین می‌توان نوشت: $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$.

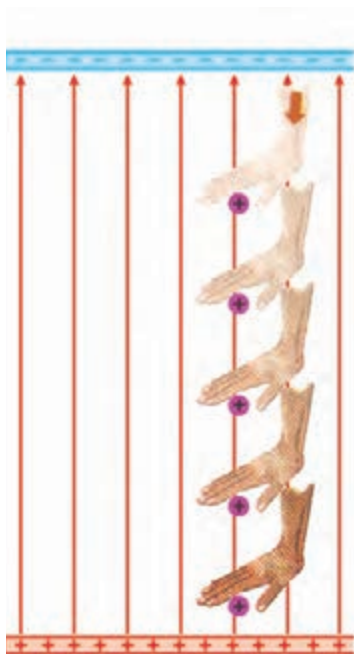
مثال ۱-۱۳

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 ۱-۱۱ داریم:

$$E = \frac{|\Delta V|}{d} = \frac{2/5 \times 10^4 \text{ V}}{1/2 \times 10^{-2} \text{ m}} = 2/0 \times 10^6 \text{ V/m} \approx 2/1 \text{ MV/m}$$





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

کار انجام شده توسط نیروی خارجی: فرض کنید در یک میدان الکتریکی یکنواخت، ذره‌ای با بار q ، با اعمال نیرویی از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر جابه‌جا شود (شکل ۱-۲۷). در حین این حرکت، نیروی خارجی، کار خارجی W را روی بار انجام می‌دهد، در حالی 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:

$$\Delta K = W_{\text{خارجی}} + W_E = W_{\text{خارجی}} - q\Delta V \quad (۱۲-۱)$$

که در آن از رابطه‌های ۷-۱ ($W_E = -\Delta U_E$) و ۹-۱ ($\Delta U_E = q\Delta V$) استفاده کرده‌ایم. حال فرض کنید که تندی بار q در ابتدا و انتهای این جابه‌جایی یکسان باشد (یعنی $\Delta K = 0$). آنگاه معادله بالا به صورت زیر درمی‌آید:

$$W_{\text{خارجی}} = -W_E = q\Delta V \quad (\text{برای } \Delta K = 0) \quad (۱۳-۱)$$

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

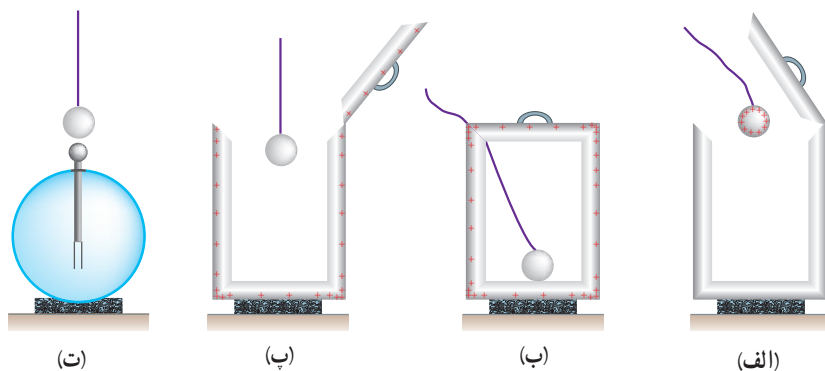
تمرین ۱-۱۱

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

۹-۱ 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 بنیامین فرانکلین برای پی بردن 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 بردار 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 ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود عقربه الکتروسکوپ تکان نمی‌خورد (شکل ۱-۲۸-ت). همچنین اگر ظرف را به الکتروسکوپ نزدیک کنیم، مشاهده می‌شود که عقربه‌های الکتروسکوپ از هم فاصله می‌گیرند.

از این آزمایش نتیجه می‌گیریم که بار اضافی داده شده به یک رسانا روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود. شکل ۱-۲۹ طرحی از توزیع بار داده شده در سطح خارجی یک رسانا را نشان می‌دهد.

بررسی‌های دقیق نشان می‌دهند پس از مدت زمان بسیار کوتاهی از دادن بار به رسانا (برای فلزات این زمان از مرتبه 10^{-14} s است)، 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.

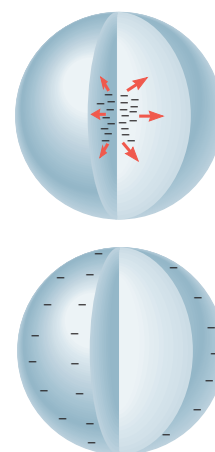
رسانای خنثی در میدان الکتریکی: در علوم هشتم با پدیده القا آشنا شدیم. در شکل ۱-۳۰ جسم رسانای خنثایی که بر روی آن بار القا می‌شود در میدان الکتریکی خارجی میله قرار گرفته است. وقتی یک رسانای خنثی را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، باز هم در مدت زمان بسیار کوتاهی الکترون‌های آزاد تحت تأثیر میدان 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 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 جابه‌جایی دلخواهی در داخل رسانا صفر می‌شود. در نتیجه همه نقاط رسانا پتانسیل یکسانی دارند. به عبارت دیگر:

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

و در نتیجه

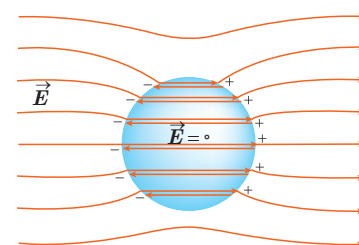
$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = 0 \Rightarrow V_F - V_1 = 0 \Rightarrow V_1 = V_F$$



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



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



شکل ۱-۳۱ 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 منطبق برهم اند و برای آنکه دیده شوند، با فاصله اندکی از هم رسم شده‌اند.)



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

ب) چرا معمولاً شخصی که در داخل اتومبیل یا هواپیماست از خطر آذرخش در امان می ماند.

پ) با اعضای گروه خود آزمایش های دیگری را طراحی و اجرا کنید که نشان دهد بار اضافی داده شده به رسانا، روی سطح داخلی رسانا توزیع نمی شود.

فناوری و کاربرد

یکی از کاربردهای صنعتی پدیده القای بار الکتریکی، رنگ پاشی الکتروستاتیکی است (شکل ۱-۳۲-الف). در نوعی از این روش رنگ پاشی، سطح فلزی ای که قرار است رنگ شود به زمین متصل می شود. از طرفی قطره های ریز رنگ هنگام خروج از دهانه رنگ پاش باردار می شوند. با نزدیک شدن قطره های رنگ به هدف فلزی، بارهای القایی با علامت مخالف بر روی فلز ظاهر می شوند و به این ترتیب، قطره ها را به سطح فلز جذب می کنند (شکل ۱-۳۲-ب). این روش رنگ پاشی، پاشیده شدن رنگ از افشانه قطره ها را کاهش می دهد و رنگ یکنواختی بر سطح جسم فلزی ایجاد می کند.



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



الف) تصویری از رنگ پاشی الکتروستاتیکی

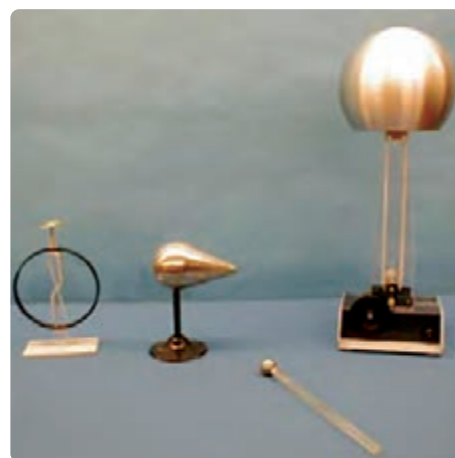
شکل ۱-۳۲

چگالی سطحی بار الکتریکی رسانا: برای اینکه بتوانیم تراکم بار الکتریکی در بخش های مختلف سطح یک جسم را با هم مقایسه کنیم کمیتی به نام **چگالی سطحی بار** را تعریف می کنیم. 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 σ نشان داده می شود از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (۱-۱۴)$$

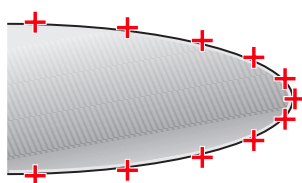
در این رابطه چگالی سطحی بار (σ) برحسب کولن بر مترمربع (C/m^2) می شود. اکنون می خواهیم چگالی سطحی بار الکتریکی در رسانا را بررسی کنیم. دیدیم که بار الکتریکی روی

سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود. برای اینکه دریابیم بار الکتریکی داده‌شده به یک رسانا چگونه روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود از تعریف چگالی سطحی بار استفاده می‌کنیم. 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 وان دوگراف باردار کنید. گلوله‌ای فلزی را که به دسته‌ای عایق متصل است با بخش پهن دوک تماس داده و سپس گلوله را به سر الکتروسکوپ تماس دهید. همین آزمایش را پس از خنثی کردن الکتروسکوپ و گوی فلزی با تماس با دستتان، با نوک تیز دوک انجام دهید. خواهید دید، انحراف صفحه‌های الکتروسکوپ با نوک تیز دوک بیشتر از انحراف صفحه‌ها با بخش پهن 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 میدان الکتریکی در نزدیکی 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 ۸-۱



دو قطعه ورقه آلومینیمی نازک به ابعاد $3\text{cm} \times 4\text{cm}$ را مجاله کنید و به سرهای دو تکه نخ هم اندازه به طول 30cm وصل کنید. پس از آنکه جسم فلزی دوکی شکل را با مولد وان دوگراف 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 ۱۴-۱

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 $2.0 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$ باشد، در بخشی از این سطح به شکل مربعی به ضلع 1.0 mm چقدر بار قرار گرفته است؟

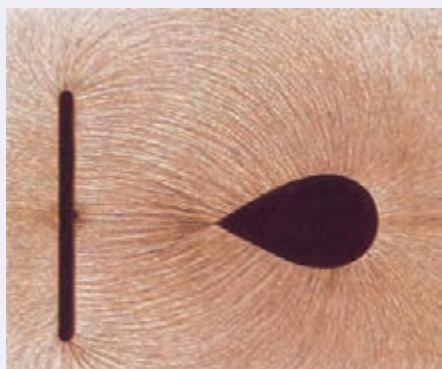
پاسخ: با استفاده از رابطه ۱۴-۱ و تبدیل یکاها در SI، خواهیم داشت:

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



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^۱



(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

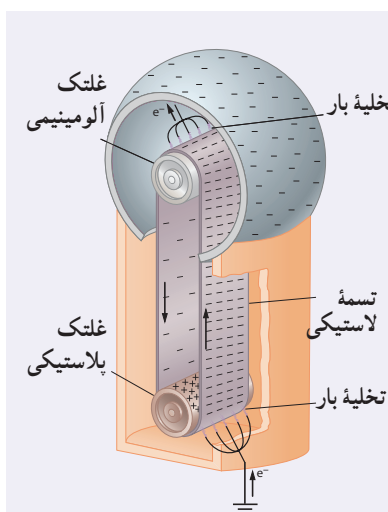
همان‌طور که دیدیم در قسمت‌های نوک تیز اجسام رسانا، چگالی سطحی بار الکتریکی بیشتر است. با اسباب آزمایش فعالیت ۱-۳ می‌توان نشان داد که خطوط میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز متراکم‌تر و در نتیجه میدان الکتریکی قوی‌تر است (شکل الف). اگر بزرگی این میدان از یک مقدار حدی فراتر برود، این میدان شدید می‌تواند الکترون‌ها را از مولکول‌های هوا بکند و به آنها شتاب دهد. برخورد این الکترون‌ها با مولکول‌های دیگر موجب برانگیختگی این مولکول‌ها می‌شود و در نتیجه نوری تولید می‌شود که قابل مشاهده است (شکل ب). هنگام وقوع این پدیده، جنبش مولکولی، دما، و فشار هوا در محل وقوع این پدیده زیاد می‌شود که این معمولاً همراه با صدای جِلَز وِلَز و هیس ماندی است که در حین تخلیه‌های جرقه‌ای شنیده می‌شود. به این جرقه‌های الکتریکی که در نوک تیز اجسام رسانای بلند و نازک ایجاد می‌شود، تخلیه هاله‌ای یا آتش سنت المو^۲ گفته می‌شود.

خوب است بدانید: مولد وان دوگراف

مولد 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 مولد وان دوگراف، غلتک پایینی توسط یک موتور الکتریکی می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود.

^۱ Corona discharge

^۲ St. Elmo fire



معمولاً غلتک پایینی از جنس پلاستیک پلی اتیلن و غلتک بالایی از جنس آلومینیم است. بر اثر مالش تسمه ای لاستیکی با غلتک پایینی، این غلتک بنا بر سری الکتریسیته مالشی، بار مثبت پیدا می کند. غلتک پایینی که بار مثبت دارد، در یک شانه فلزی که متصل به زمین است، بار منفی القا می کند. بار منفی توسط این شانه روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می شود. در غلتک بالایی، تسمه لاستیکی باردار منفی، الکترون ها را از نوک های شانه فلزی دفع می کند و نیز بار منفی از تسمه به شانه و سپس از شانه به سطح خارجی کلاهک منتقل می شود. به این ترتیب، بار الکتریکی منفی روی سطح خارجی کلاهک انباشته می شود. با انتخاب جنس های دیگری برای غلتک که در سری الکتریسیته مالشی پایین تر از لاستیک قرار دارند (مانند تفلون) می توان بار الکتریکی مثبت روی کلاهک ایجاد کرد.

۱-۱۰ خازن

خازن وسیله ای الکتریکی است که می تواند بار و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند؛ مثلاً باتری های یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در خازن فلاش دوربین ذخیره می کنند (شکل ۱-۳۵). باتری ها معمولاً می توانند انرژی را فقط با آهنگ نسبتاً کمی به مدار بدهند که این آهنگ برای گسیل نور از فلاش دوربین بسیار کم است، اما وقتی خازن باردار می شود، می تواند انرژی را با آهنگ بسیار زیادی برای فلاش زدن آماده کند.



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

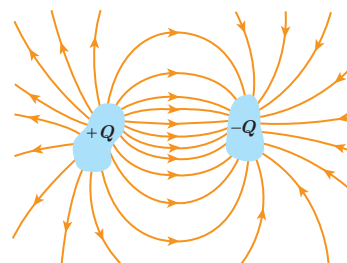
شکل ۱-۳۶ چند خازن را در اندازه ها و شکل های مختلف نشان می دهد. شکل ۱-۳۷ اجزای اصلی یک خازن معمولی را نشان می دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. این رساناها را صفحه های خازن می نامیم.



شکل ۱-۳۶ تصویری از چند خازن مختلف

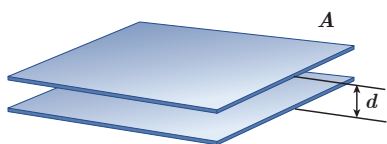
شکل ۱-۳۸ آرایش خازنی موسوم به خازن تخت^۱ را نشان می دهد که شامل دو صفحه رسانای موازی با مساحت A است که به فاصله d (که در برابر ابعاد صفحه ها ناچیز است) از هم قرار گرفته اند. گرچه نمادی که برای نشان دادن یک خازن به کار می بریم (+-) مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن ها با هر شکلی استفاده می شود. خازن ها به طور گسترده ای در مدارهای الکترونیکی وسایلی مانند رادیو، تلویزیون، رایانه، گوشی همراه و... به کار می روند؛ مثلاً شکل ۱-۳۹ مدار یک تقویت کننده (آمپلی فایر) را نشان می دهد که در آن چندین خازن به کار رفته است. برخی از این خازن ها با پیکان هایی مشخص شده اند.

باردار (شارژ) کردن خازن: روش ساده و مرسوم برای باردار کردن خازن قرار دادن آن در مدار الکتریکی ساده ای است که یک باتری دارد (شکل ۱-۴۰ الف). وقتی کلید K بسته (وصل) شود بار از طریق سیم های رسانا جریان می یابد. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحه خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانه باتری یکسان شود. وقتی یک خازن باردار می شود، صفحه های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی با علامت مخالف می شود: $+Q$ و $-Q$. با این حال،



شکل ۱-۳۷ اجزای اصلی یک خازن باردار

^۱ parallel – plate capacitor

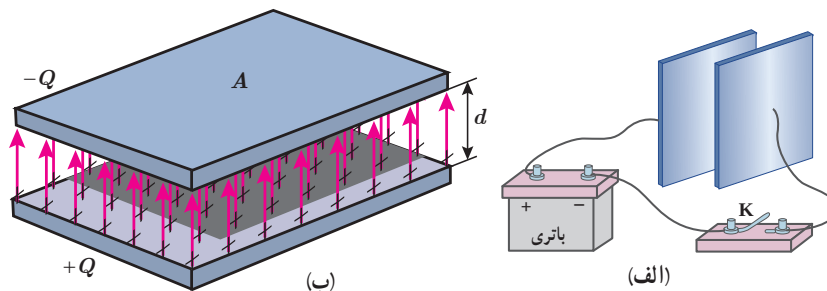


شکل ۱-۳۸ یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت A ساخته شده است که به فاصله d از هم قرار گرفته اند.



شکل ۱-۳۹ مدار یک تقویت کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن ها با پیکان مشخص شده اند.

بار یک خازن را به صورت Q نشان می دهند که همان بار صفحه مثبت است. بین دو صفحه خازن باردار یک میدان الکتریکی ایجاد می شود که خطوط این میدان از صفحه مثبت به منفی است (شکل ۱-۴۰ ب).



شکل ۱-۴۰ الف) یک روش برای باردار کردن خازن، اتصال صفحه های آن به یک باتری است. ب) صفحه های این خازن بارهایی هم اندازه و با علامت مخالف پیدا می کنند. میدان الکتریکی از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است.

ظرفیت خازن: اگر اختلاف پتانسیل بین صفحه های خازن (ΔV) را زیاد کنیم، بار خازن (Q) نیز به همان نسبت زیاد می شود. به عبارتی نسبت $\frac{Q}{\Delta V}$ همواره مقداری ثابت است که به این نسبت ثابت، ظرفیت خازن می گویند و آن را با C نشان می دهند. عبارت ظرفیت الکتریکی را نخستین بار ولتا در تشابه با ظرفیت گرمایی به کار برد. بنابه دلایل تاریخی، قدر مطلق اختلاف پتانسیل ΔV بین دو صفحه خازن را با V نمایش می دهند. بنابراین:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (۱-۱۵)$$

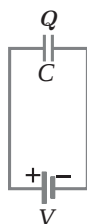
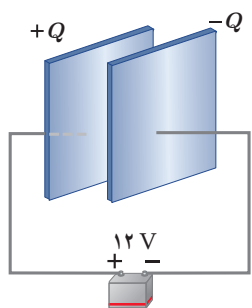
در رابطه ۱-۱۵ یکای بار الکتریکی، کولن (C)، یکای اختلاف پتانسیل، ولت (V) و بنابراین یکای ظرفیت، کولن بر ولت (C/V) می شود که به پاس خدمات مایکل فاراد، فاراد (F) نامیده شده است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و عملاً ظرفیت اکثر خازن های متداول در محدوده میکوفاراد (10^{-12} تا میلی فاراد ($10^{-3} F$)) است. گرچه امروزه فناوری ساخت خازن ها، دستیابی به ظرفیت هایی بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

ظرفیت خازن به ویژگی های هندسی و جنس عایق بین صفحه های خازن بستگی دارد و با تغییر بار یا اختلاف پتانسیل خازن، تغییر نمی کند.

مثال ۱-۱۵

صفحه های خازنی را مطابق شکل به پایه های یک باتری با اختلاف پتانسیل ۱۲V وصل می کنیم. اگر بار خازن $24 \mu C$ شود، الف) ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

ب) اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل ۳۶V وصل کنیم، بار الکتریکی آن چقدر می شود؟



پاسخ:

(الف) با استفاده از رابطه ۱-۱۵ داریم:

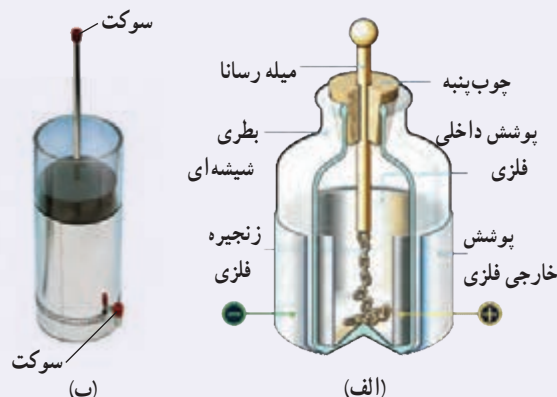
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{24 \times 10^{-6} \text{ C}}{12 \text{ V}} = 2 \times 10^{-6} \text{ F} = 2 \mu\text{F}$$

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

استفاده از رابطه ۱-۱۵ می‌توان نوشت:

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

خوب است بدانید: بطری لیدن^۱

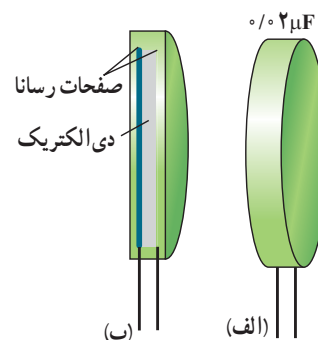


بطری لیدن، قدیمی‌ترین نوع خازن است که در میانه سده هجدهم در شهر لیدن که امروزه در هلند واقع شده است، ساخته شد. در یک نوع ابتدایی، این خازن از یک بطری شیشه‌ای ساخته شده است که سطح درونی و بیرونی آن با ورقه نازک قلع پوشیده شده است. ورقه درونی توسط سیم یا زنجیری فلزی به میله فلزی ثابت داخل بطری اتصال دارد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

۱۱-۱ خازن با دی الکتریک

اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با ماده‌ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن دی الکتریک گفته می‌شود پُر کنیم (شکل ۱-۴۱) برای ظرفیت خازن چه پیش می‌آید؟ مایکل فاراده نخستین بار در سال ۱۸۳۷ میلادی، با استفاده از وسایل ساده‌ای دریافت که ظرفیت خازن با ضریبی موسوم به ثابت دی الکتریک ماده عایق (که آن را با κ نشان می‌دهند) افزایش می‌یابد؛ یعنی اگر ظرفیت خازن بدون دی الکتریک را با C_0 نمایش دهیم آن‌گاه ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر است با

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



شکل ۱-۴۱ (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 می‌دهد.

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 می‌کنیم. توجه کنید که دی الکتریک‌ها بر دو نوع اند: قطبی و غیرقطبی. وقتی یک دی الکتریک قطبی (مانند آب، NH_3 ، HCl) در میدان الکتریکی بین دو صفحه

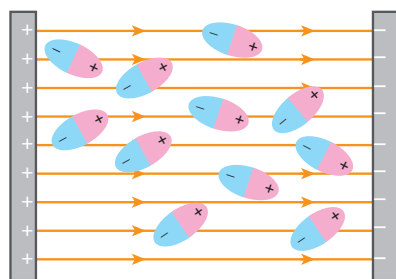
^۱ – Leyden jar

^۲ – Wimshurst Machine

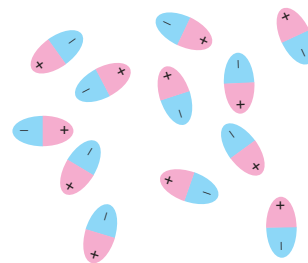
^۳ – از حروف الفبای یونانی که کاپا خوانده می‌شود.

جدول ۱-۴ ثابت دی الکتریک برخی عایق‌ها در دمای 20°C	
ماده دی الکتریک	ثابت دی الکتریک
هوای ۱ atm	۱/۰۰۰۶
تفلون	۲/۱
پارافین	۲/۲
پلی استیرن	۲/۶
میلار	۳/۱
پی وی سی	۳/۴
کاغذ	۳/۵
کوارتز	۴/۳
شیشه پیرکس	۵
میکا	۷
آب خالص	۸۰
تیتانید استرانسیوم	۳۱۰

خازن قرار می‌گیرد، سر منفی مولکول‌های دوقطبی به طرف صفحه مثبت و سر مثبت آنها به طرف صفحه منفی کشیده می‌شود و در نتیجه این مولکول‌های دوقطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی بین دو صفحه خازن هم ردیف کنند (شکل ۱-۴۲).



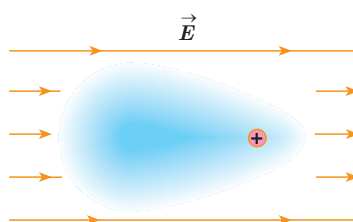
(ب) در حضور میدان الکتریکی، مولکول‌های قطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی خارجی هم ردیف کنند.



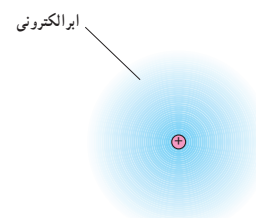
(الف) در نبود میدان الکتریکی، سمت‌گیری مولکول‌های دوقطبی نامنظم است.

شکل ۱-۴۲

وقتی یک دی الکتریک غیرقطبی (مانند متان، بنزن و...) در میدان بین دو صفحه خازن قرار می‌گیرد بر اثر القا قطبیده می‌شود؛ یعنی میدان الکتریکی اعمال شده باعث می‌شود که ابر الکترونی مولکول‌های دی الکتریک در خلاف جهت میدان جابه‌جا شود (شکل ۱-۴۳) و به این ترتیب، مرکز بارهای مثبت و منفی مولکول‌ها از هم جدا شده و اصطلاحاً مولکول‌ها **قطبیده** شوند.



(ب) در حضور میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند و ابر الکترونی در خلاف جهت میدان جابه‌جا می‌شود.



(الف) در نبود میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی بر هم منطبق‌اند.

شکل ۱-۴۳

می‌توان نشان داد این رفتار مولکول‌های دی الکتریک (قطبی یا غیرقطبی) در میدان الکتریکی بین صفحه‌های خازن، سبب افزایش ظرفیت خازن می‌شود.

ظرفیت خازن تخت: آزمایش و محاسبه نشان می‌دهد که ظرفیت یک خازن تخت با مساحت صفحه‌های A و فاصله جدایی صفحه‌های d، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (۱۷-۱)$$

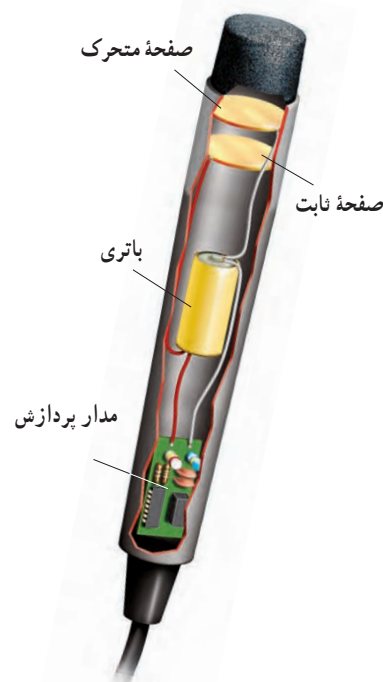
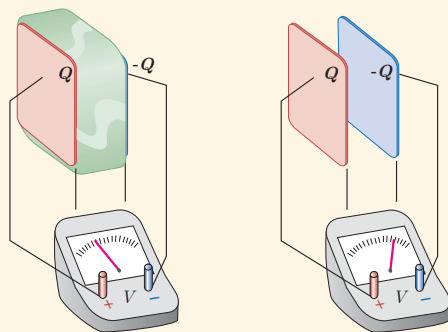
که در آن ϵ_0 همان ضریب گذردهی الکتریکی خلأ ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) است. مثالی کاربردی از این رابطه، میکروفون خازنی است که بر اثر تغییر ظرفیت یک خازن تخت سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کند (شکل ۱-۴۴).

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

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1-18)$$

پرسش ۱-۶

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.)

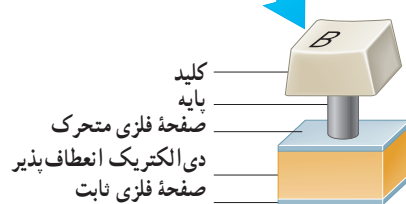


شکل ۱-۴۴ در یک میکروفون خازنی، با ارتعاش صفحه متحرک (دیافراگم) خازن بر اثر صدا، فاصله صفحه‌های خازن تغییر می‌کند بنابراین ظرفیت خازن تخت تغییر می‌کند که به ایجاد یک سیگنال الکتریکی می‌انجامد.

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 $5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$ است که این فاصله با فشار دادن کلید به $1.50 \times 10^{-3} \text{ m}$ می‌رسد. مساحت صفحه‌ها $9.50 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ است و خازن از ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک 3.50 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

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

$$= 0/589 \times 10^{-12} \text{ F} = 0/589 \text{ pF}$$

پس از فشردن کلید، فاصله بین صفحه‌ها به $1/50 \times 10^{-3} \text{ m}$ می‌رسد و با محاسبه‌ای مشابه به می‌رسیم. بنابراین، تغییر ظرفیت خازن که به صورت سیگنالی آشکار می‌شود از تفاضل دو مقدار بالا به دست می‌آید:

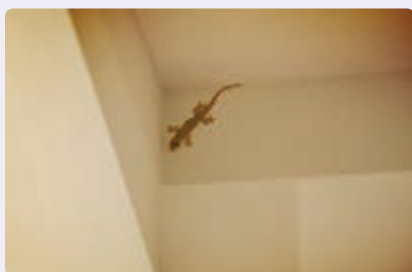
$$\Delta C = 19/6 \text{ pF} - 0/589 \text{ pF} = 19/0 \text{ pF}$$

فعالیت ۱۰-۱



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

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



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

پای مارمولک تعداد بی‌شماری مو موسوم به ستا دارد که هر مو صدها برجستگی یا سرمثلی دارد که به کاردک معروف‌اند. وقتی مارمولک یک مو را بر دیوار می‌فشارد تمام این کاردک‌ها توسط نیروی وان دروالس به دیوار می‌چسبند. این نیرو ناشی از برهم‌کنش الکتریکی دوقطبی‌های موجود در کاردک‌ها و دوقطبی‌هایی است که این کاردک‌ها بر سطح دیوار القا می‌کنند. وقتی مارمولک پای خود را بر دیوار قرار می‌دهد دوقطبی‌های موجود در دو سطح، یکدیگر را جذب می‌کنند. گرچه نیروی وان دروالس ضعیف است، اما مجموع این نیروهای بی‌شمار می‌تواند مارمولک را بر سطح دیوار نگه دارد.

فروریزش الکتریکی: اثر دیگر حضور دی الکتریک‌ها در خازن، افزایش حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن است. اگر اختلاف پتانسیل دو صفحه یک خازن را به اندازه کافی زیاد کنیم، تعدادی از الکترون‌های اتم‌های ماده دی الکتریک، توسط میدان الکتریکی ایجاد شده بین دو صفحه، کنده می‌شوند و مسیرهایی رسانا درون دی الکتریک^۱ ایجاد می‌شود (شکل ۴۵-۱) که سبب تخلیه خازن می‌گردد. به این پدیده **فروریزش الکتریکی**^۲ ماده دی الکتریک می‌گویند. فروریزش الکتریکی در عایق بین دو صفحه خازن‌ها معمولاً، با ایجاد یک جرقه همراه است و در بیشتر مواقع خازن را می‌سوزاند. خازن‌ها معمولاً با مقدار ظرفیت آنها و اختلاف پتانسیل بیشینه‌ای که می‌توانند تحمل کنند مشخص می‌شوند (شکل ۴۶-۱).

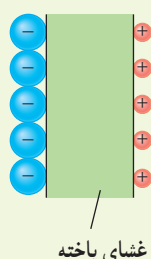


شکل ۴۵-۱ نقش‌های لیچنبرگ. فروریزش الکتریکی باعث تشکیل مسیرهای رسانشی سرخس شکلی در دی الکتریک شده است.



شکل ۴۶-۱ تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل بیشینه قابل تحمل نوشته شده است.

تمرین ۱۲-۱



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 روبه‌رو). ظرفیت یک سلول عصبی و تعداد یون‌های لازم (بافرض آنکه هر یون یک بار یونیده باشد)، برای آنکه یک اختلاف پتانسیل 85mV ایجاد شود چقدر است؟ فرض کنید غشا دارای ثابت دی الکتریک $\epsilon_r = 3$ ، ضخامت 10nm و مساحت سطح 10^{-10}m^2 است.

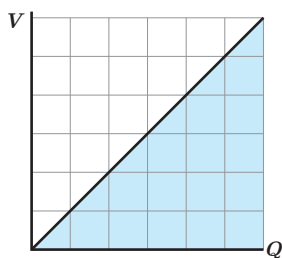
فعالیت ۱۱-۱

خازن‌ها انواع متعددی دارند؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند. درباره خازن‌های مختلف مانند خازن‌های ورقه‌ای، میکا، سرامیکی، الکتrolیتی، خازن‌های متغیر، ابرخازن‌ها 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 پر شده 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. در هنگام شارژ شدن خازن توسط باتری، دائماً 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)

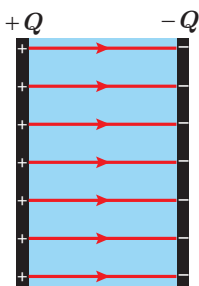


شکل ۱۴۷-۱ نمودار ولتاژ بر حسب بار برای خازنی که توسط یک باتری باردار می شود.

$(W_{\text{خارجی}} = Q \Delta V)$ ، باتری روی این بار کار انجام می دهد. هنگام انتقال بار، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن نیز به آهستگی افزایش می یابد. بنابراین، برای انتقال بارهای بعدی به کار بیشتری نیاز است. بنا به رابطه ۱۵-۱ $(V = Q/C)$ 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 $V_{av} = \frac{V + 0}{2}$ برای دو صفحه خازن در نظر گرفت. آنگاه 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:

$$W = Q V_{av} = Q \left(\frac{V}{2} \right) = \frac{1}{2} Q V$$

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



$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2} Q V = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (19-1)$$

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

که در آن انرژی پتانسیل الکتریکی خازن ($U_{\text{خازن}}$) بر حسب ژول (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 $330V$ ، در یک خازن $660 \mu F$ ، ذخیره می کند. الف) چه مقدار انرژی الکتریکی در این خازن ذخیره می شود؟ ب) اگر تقریباً همه این انرژی در مدت $1/10 \text{ ms}$ آزاد شود، توان متوسط خروجی فلاش چقدر است؟
پاسخ: با توجه به رابطه ۱۹-۱ داریم

$$U = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} (660 \times 10^{-6} F) (330 V)^2 = 35.9 J$$

با توجه به تعریف توان داریم:

$$P_{av} = \frac{U}{t} = \frac{35.9 J}{1/10 \times 10^{-3} s} = 3.59 \times 10^4 J/s = 35.9 kW$$

که این در تأیید گفته ای است که در ابتدای بخش ۱-۱۰ 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 ۱-۱۹: دستگاه رفع لرزش نامنظم قلب (دیفیبریلاتور)



توانایی خازن برای ذخیره انرژی پتانسیل الکتریکی، اساس کار دستگاه‌های رفع لرزشی است که برای توقف لرزش بطنی افراد دچار حمله قلبی به کار می‌رود. در این بیماری، انقباض انقباض ناهماهنگ قلب باعث می‌شود خون به درستی به مغز فرستاده نشود. در این دستگاه یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود 6 kV باردار می‌کند. صفحه‌های رابط (کفشک‌ها) روی قفسه سینه بیمار قرار داده می‌شوند و خازن بخشی از انرژی ذخیره شده خود را از طریق کفشک‌ها به بدن بیمار منتقل می‌کند. هدف از این کار این است که قلب به طور موقت از کار بیفتد و پس از آن با آهنگ منظم و طبیعی خود به کار افتد.

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

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

پاسخ: الف) انرژی ذخیره شده در خازن با استفاده از رابطه ۱-۱۹ به دست می‌آید:

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

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

ب) بار اولیه روی صفحات خازن برابر است با

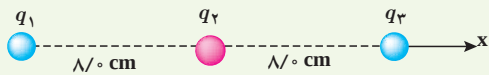
$$Q = CV \Rightarrow Q = (11 \times 10^{-6} \text{ F}) (6 \times 10^3 \text{ V}) = 66 \times 10^{-3} \text{ C}$$

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

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

$$P_{av} = \frac{U}{t} = \frac{198 \text{ J}}{2 \times 10^{-3} \text{ s}} = 99 \text{ kW}$$

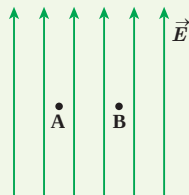
۶ بارهای الکتریکی نقطه‌ای $q_1 = -4 \text{ nC}$ ، $q_2 = +5 \text{ nC}$ و $q_3 = -4 \text{ nC}$ مطابق شکل، در جای خود ثابت شده‌اند. نیروی خالص الکتریکی وارد بر هر یک از بارهای q_1 و q_2 را محاسبه کنید.



۷ در شکل روبه‌رو، دو گوی مشابه به جرم 25 g و بار یکسان مثبت q در فاصله 1 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 کنده‌شده از هر گوی چقدر است؟

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

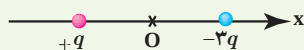
۸ یک ذره باردار را یک بار در نقطه A و بار دیگر در نقطه B قرار می‌دهیم. نیرویی که از طرف میدان الکتریکی بر این ذره باردار در این دو نقطه وارد می‌شود را مقایسه کنید.



۹ هسته اتم آهن شعاعی در حدود 10^{-15} m دارد و تعداد پروتون‌های آن ۲۶ عدد است. الف) بزرگی نیروی دافعه بین دو پروتون این هسته که به فاصله 10^{-15} m از هم قرار دارند چقدر است؟ ب) اندازه میدان الکتریکی ناشی از هسته در فاصله 10^{-10} 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 برآیند برابر با صفر است؟ ب) بزرگی و جهت میدان الکتریکی برآیند در مبدأ مختصات را بیابید.



۱-۱ و ۲-۱ بار الکتریکی، پایداری و کوانتیده بودن بار

۱ چگونه توسط برق‌نما (الکتروسکوپ) می‌توانیم تشخیص دهیم که: الف) یک میله باردار است یا نه؟ ب) میله رساناست یا نارسنا؟ پ) نوع بار میله باردار چیست؟



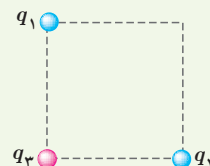
۲ یک میله پلاستیکی را با پارچه پشمی مالش می‌دهیم. پس از مالش، بار الکتریکی میله پلاستیکی $12/8 \text{ nC}$ می‌شود. الف) بار الکتریکی ایجاد شده در پارچه پشمی چقدر است؟ ب) تعداد الکترون‌های منتقل شده از پارچه پشمی به میله پلاستیکی را محاسبه کنید.

۳ الف) بار الکتریکی اتم و هسته اتم کربن ($^{12}_6\text{C}$) چند کولن است؟ ب) بار الکتریکی اتم کربن یک بار یونیده (C^+) چقدر است؟

۱-۳ قانون کولن

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

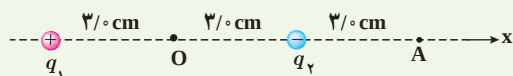
۵ سه ذره باردار q_1 ، q_2 و q_3 مطابق شکل در سه رأس مربعی به ضلع 3 m ثابت شده‌اند. اگر $q_1 = q_2 = -5 \text{ nC}$ و $q_3 = +2 \text{ nC}$ باشد، نیروی خالص الکتریکی وارد بر بار q_3 را برحسب بردارهای یکه $\hat{i}$ و $\hat{j}$ تعیین کنید.



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 روی محور، نقطه‌ای وجود دارد که میدان الکتریکی خالص در آن صفر شود؟



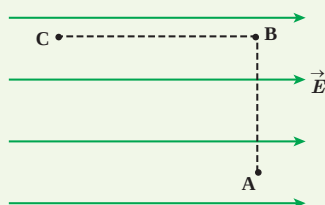
۷-۱ و ۸-۱ انرژی پتانسیل الکتریکی و پتانسیل الکتریکی

۱۶ مطابق شکل زیر، بار $q = +5/0 \text{ nC}$ را در میدان الکتریکی یکنواخت $8/0 \times 10^5 \text{ N/C}$ نخست از نقطه A تا نقطه B و سپس تا نقطه C جابه‌جا می‌کنیم. اگر $AB = 0/2 \text{ m}$ و $BC = 0/4 \text{ m}$ باشد، مطلوب است:

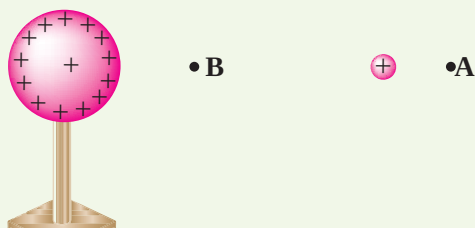
الف) نیروی الکتریکی وارد بر بار q ،

ب) کاری که نیروی الکتریکی در این جابه‌جایی انجام می‌دهد،

پ) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار q در این جابه‌جایی.

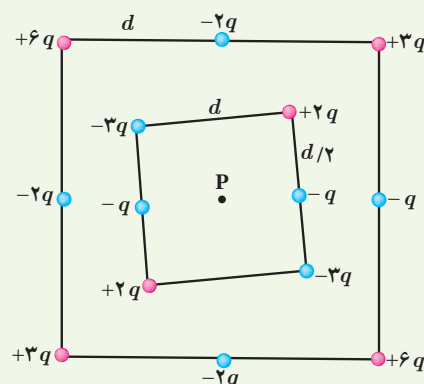


۱۷ در شکل زیر ذره باردار مثبت و کوچکی را از حالت سکون، از نقطه A به سمت کره باردار که روی پایه عایقی قرار دارد، نزدیک می‌کنیم و در نقطه B قرار می‌دهیم. (الف) در این جابه‌جایی، کار نیروی الکتریکی مثبت است یا منفی؟ (ب) کاری که ما در این جابه‌جایی انجام می‌دهیم مثبت است یا منفی؟ (پ) انرژی پتانسیل ذره باردار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

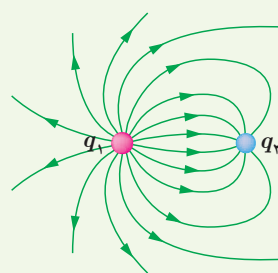


۱۱ در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $4/9 \times 10^5 \text{ N/C}$ که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره بارداری به جرم $2/0 \text{ g}$ معلّق و به حال سکون قرار دارد. اگر $g = 9/8 \text{ N/kg}$ باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.

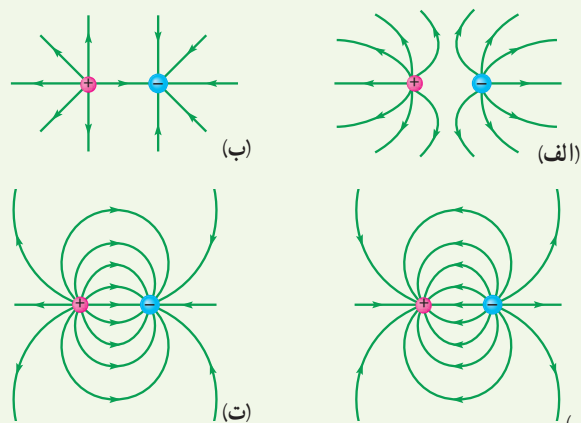
۱۲ شکل زیر دو آرایه مربعی از ذرات باردار را نشان می‌دهد. مربع‌ها که در نقطه P هم‌مرکزند، هم‌ردیف نیستند. ذره‌ها روی محیط مربع به فاصله d یا $d/2$ از هم قرار گرفته‌اند. بزرگی و جهت میدان الکتریکی برآیند در نقطه P چیست؟



۱۳ خطوط میدان الکتریکی برای دو کره رسانای باردار کوچک در شکل روبه‌رو 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 دهید.



۲۲ یک صفحه پلاستیکی باردار (تلق یا ورق باردار) را به براده‌های ریز آلومینیومی بدون بار نزدیک 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 40 cm است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود).



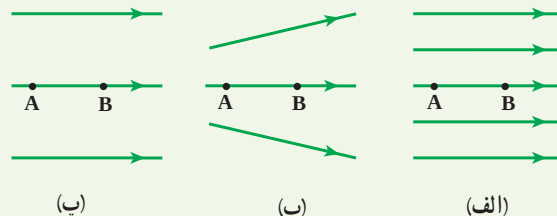
۱۰-۱ خازن

۲۴ اگر ساختمان یک خازن را تغییر ندهیم، در هریک 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 بین دو صفحه یک خازن را از 28 V ولت به 40 V ولت افزایش می‌دهیم. اگر با این کار $15 \text{ } \mu\text{C}$ میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

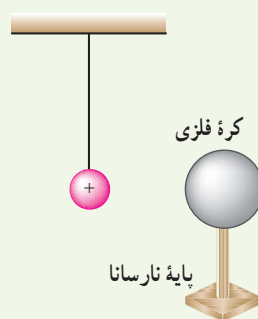
۱۸ شکل زیر سه آرایش خطوط میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. در هر آرایش، یک پروتون از حالت سکون در نقطه A رها می‌شود و سپس توسط میدان الکتریکی تا نقطه B شتاب می‌گیرد. نقطه‌های A و B در هر سه آرایش در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. در کدام شکل سرعت پروتون در نقطه B بیشتر است؟ توضیح دهید.



۱۹ دو صفحه رسانا با فاصله $2/00 \text{ cm}$ را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را به اختلاف پتانسیل 100 V وصل می‌کنیم. در نتیجه، یکی از صفحه‌ها به طور منفی و دیگری به طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی به وجود می‌آید. اندازه این میدان الکتریکی را حساب کنید و با توجه به جهت خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه توضیح دهید که کدام یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیشتری دارند.

۲۰ بار الکتریکی $q = -40 \text{ nC}$ از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی $V_1 = -40 \text{ V}$ 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.

۹-۱ میدان الکتریکی در داخل رساناها



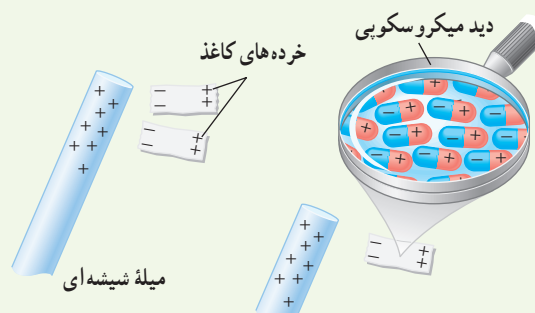
۲۱ یک کره فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه نارسانایی قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می‌کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می‌افتد.

۱۱-۱ خازن با دی الکتریک

۲۶ با دکنک بارداد 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 میلهٔ بارداد، خرده‌های کاغذ را می‌رباید؟



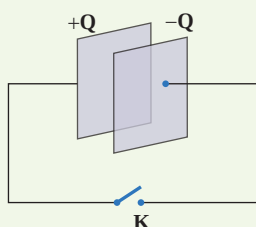
۲۸ ظرفیت یک خازن تخت با فاصله صفحات $1/0\text{ mm}$ که بین صفحه‌های آن هوا قرار دارد، برابر $1/0\text{ F}$ است. مساحت صفحه‌های این خازن چقدر است؟ از این مسئله چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

۲۹ یک خازن تخت به یک باتری بسته شده است تا بارداد شود. پس از مدتی، درحالی که باتری همچنان به خازن متصل است، فاصلهٔ 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، $1/00\text{ m}^2$ و فاصلهٔ دو صفحه از هم، 500 mm است. عایقی با ثابت دی الکتریک $4/9$ بین دو صفحه قرار داده شده است. ظرفیت خازن را تعیین کنید.

۱۲-۱ انرژی خازن

۳۱ دو صفحهٔ خازن تخت بارداری را همانند شکل با بستن کلید به هم وصل می‌کنیم، در نتیجه جرقه‌ای زده می‌شود. حال اگر دوباره صفحات را به همان اندازه بارداد کنیم ولی فاصلهٔ آنها را دو برابر کنیم و سپس دو صفحه را به هم وصل کنیم، آیا جرقهٔ حاصل بزرگ‌تر از قبل می‌شود، یا کوچک‌تر و یا تغییری نمی‌کند؟ توضیح دهید.



۳۲ ظرفیت خازنی ۱۲ میکروفاراد و بار الکتریکی آن q است. اگر $3/0\text{ mC}$ بار الکتریکی از صفحهٔ منفی به صفحهٔ مثبت منتقل شود، انرژی ذخیره‌شده در خازن به اندازهٔ $8/0\text{ J}$ زیاد می‌شود. q را محاسبه کنید.

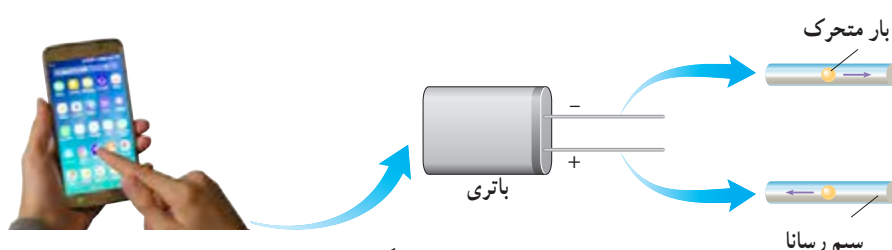
جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



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

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

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

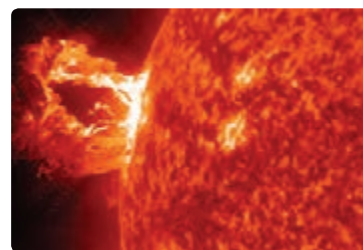


شکل ۲-۱ انرژی از باتری به صفحه نمایشگر تلفن، از طریق سیم‌های رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند، منتقل می‌شود.

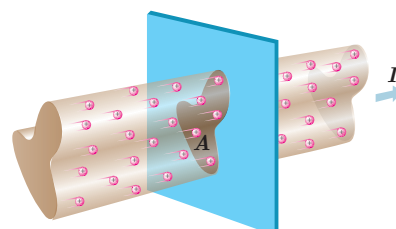
اکنون با این پرسش شروع می‌کنیم که چرا هر مجموعه‌ای از بارهای متحرک لزوماً جریان الکتریکی ایجاد نمی‌کنند؟ در واقع برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم، باید یک انتقال خالص بار از یک سطح مقطع معین رخ دهد (شکل ۲-۳) که به این منظور نیاز به ابزاری مانند باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را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

۲-۱ جریان الکتریکی

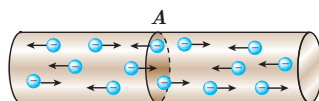
جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همه بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. برای داشتن جریان الکتریکی باید یک شارش خالص بار از یک سطح مقطع معین داشته باشیم. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. الکترون‌های آزاد در طول این سیم با تندی‌هایی از مرتبه 10^6 m/s در حرکت‌اند، ولی این حرکت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



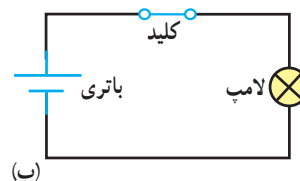
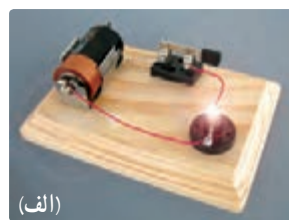
شکل ۲-۲ فوران عظیمی از الکترون‌ها و یون‌ها که از سطح خورشید پرتاب می‌شوند.



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

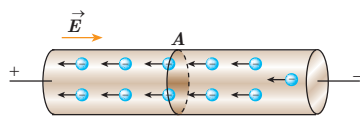


شکل ۲-۴ در نبود اختلاف پتانسیل، شارش بار خالصی از مقطع معین A سیم، نداریم.



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

^۱ - drift velocity



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

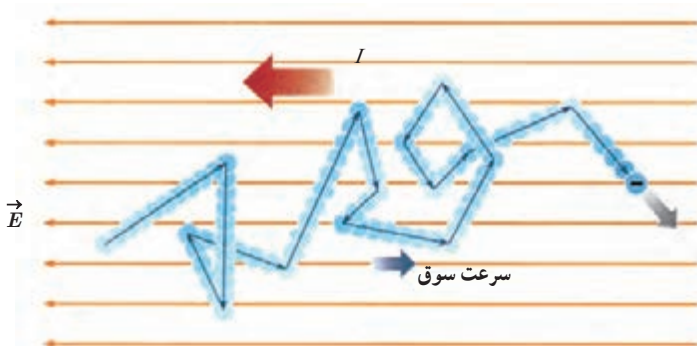


آندره ماری آمپر (۱۸۳۶-۱۷۷۵م)

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

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

برقراری جریان الکتریکی در رسانا می شود (شکل ۲-۷). اندازه سرعت سوق در یک رسانای فلزی در مقایسه با تندی کاتوره‌ای الکترون‌های آزاد، بسیار کم و مثلاً در سیم‌های مسی از مرتبه بزرگی 10^{-5} m/s یا 10^{-4} m/s است. توجه کنید که جهت قراردادی جریان الکتریکی I ، برخلاف جهت سوق الکترون‌هاست.



شکل ۲-۷ مسیر زیگزاگ یک الکترون آزاد در یک رسانای فلزی. در حضور میدان الکتریکی، این مسیر زیگزاگ در خلاف جهت میدان سوق یافته است.^۱

فعالیت ۲-۱

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

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

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

در رابطه ۱-۲ بار الکتریکی (Δq) برحسب کولن (C)، مدت زمان (Δt) برحسب ثانیه (s) و جریان (I) برحسب آمپر (A) است. برخی از مقادیر تقریبی جریان‌های متداول عبارت‌اند از ۱ A برای لامپ‌های جابجایی ۲۰۰ W، ۲۰۰ A برای استارت خودرو، ۱ mA برای تأمین انرژی نمایشگر گوشی همراه، ۱ nA برای جریان نوروهای مغزی، ۱۰ kA در یک یورش آذرخش نوعی، و ۱ GA در بادهای خورشیدی.^۲

در این فصل با جریان‌های الکتریکی سروکار داریم که در آن جهت جریان با زمان تغییر نمی‌کند و مقدار جریان نیز ثابت می‌ماند. این نوع جریان، نمونه‌ای از جریان مستقیم^۳ است.

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

۳- Direct Current (DC)

مثال ۲-۱



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

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

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

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

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

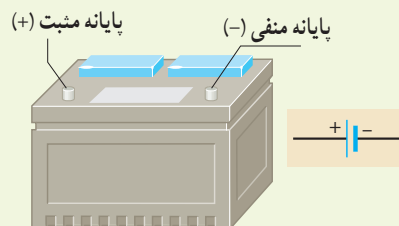
$$\Delta V = (0/61 C)(3/0 V) = 1/8 J$$

تمرین ۲-۱

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

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

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

خوب است بدانید: یون‌رانی^۱

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

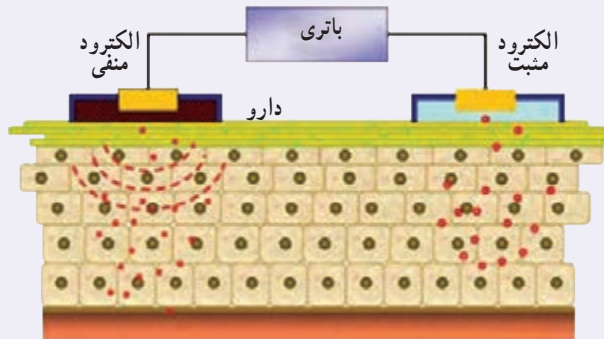
۱- Iontophoresis

۲- Dexamethasone

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



(ب)



(الف)

۲-۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم

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

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

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

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



جورج سیمون اهم (۱۸۵۴-۱۷۸۷م)

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

۱- Resistance

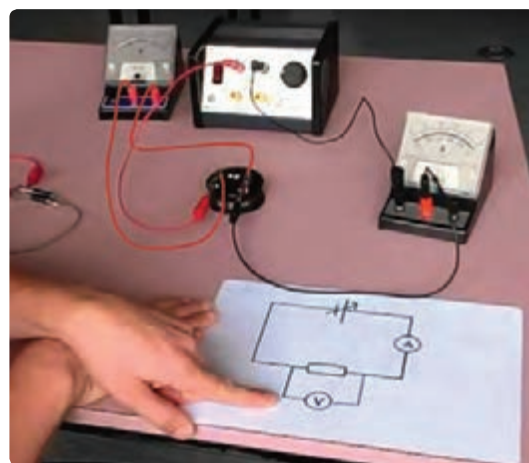
۲- Resistor

۲- از حروف الفبای یونانی که امگا خوانده می‌شود.

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

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

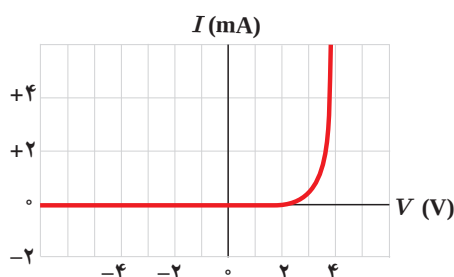
با این حال وسیله‌های زیادی نیز یافت می‌شود که از این قانون پیروی نمی‌کنند. یکی از این وسیله‌های غیر اهمی، دیود نورگسیل (LED) است که با آن بعداً آشنا می‌شویم. نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل چنین دیودی تقریباً شبیه شکل ۲-۱۰ است.



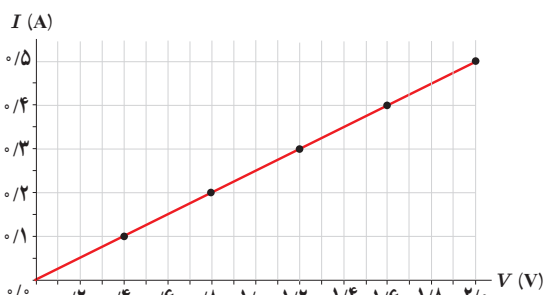
شکل ۲-۸ اسباب تحقیق قانون اهم. توجه کنید که آمپرسنج در مدار به‌صورت متوالی و ولت‌سنج به‌صورت موازی بسته شده است.

جدول ۲-۱ مقادیری نوعی برای یک رسانای اهمی

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

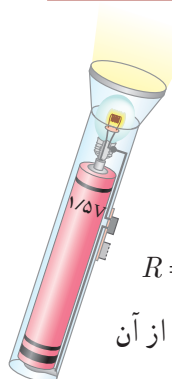


شکل ۲-۱۰ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل برای یک دیود نورگسیل



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

مثال ۲-۲



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

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

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

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

چنین می‌شود:

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

۳-۲ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

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

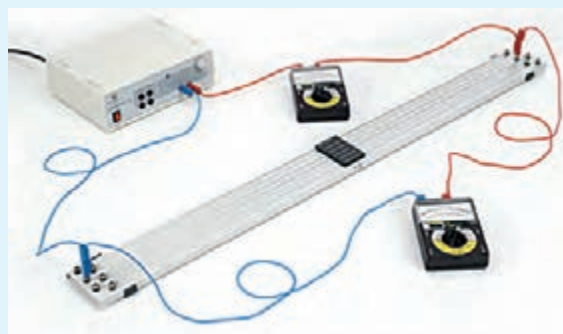
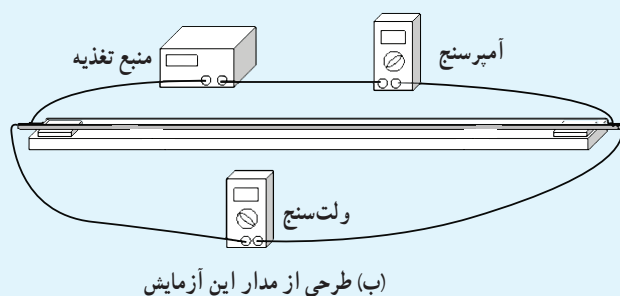
فعالیت ۲-۲

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

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

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

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



(الف) اسباب آزمایش اندازه‌گیری مقاومت یک سیم رسانا

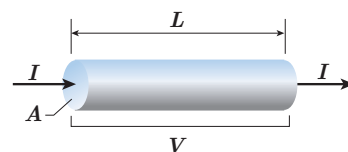
با انجام فعالیت بالا درمی‌یابیم که مقاومت جسم در دمای ثابت به طول، مساحت مقطع، و جنس آن بستگی دارد. این آزمایش‌ها که با محاسبات نظری نیز تأیید شده‌اند نشان می‌دهد اگر سطح مقطع جسم در تمام طول آن یکسان باشد (شکل ۲-۱۱)، مقاومت آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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

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

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



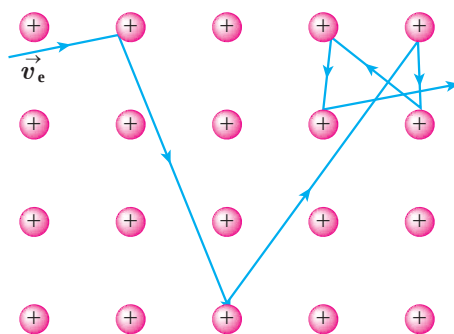
شکل ۲-۱۱ از سیمی به طول L و مقطع یکنواخت A ، تحت اختلاف پتانسیل V ، جریان I می‌گذرد.

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

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

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

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



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

۱- 60° درصد مس، 40° درصد نیکل

۲- 59° درصد نیکل، 23° درصد مس، 16° درصد کرم و ...



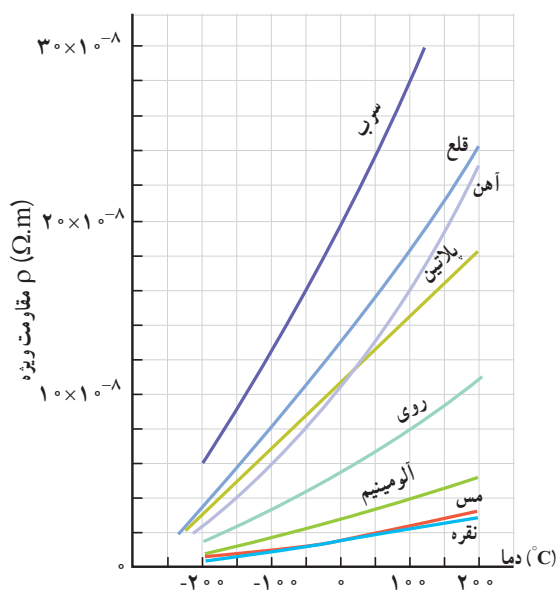
شکل ۲-۱۳ عبور جریان از رشته
(فیلامان) تنگستنی موجب درخشش
لامب حیایی شده است.

عبور جریان زياد مي‌شود؛ مثلاً در يك لامپ رشته‌اي حبابي (شكل ۲-۱۳) مقاومت آن با افزايش دماي رشته به شدت افزايش مي‌يابد. آزمون نشان مي‌دهد كه مقاومت ويژه فلزات در يك گستره دمايي نسبتاً بزرگ، با دما تقريباً به طور خطي تغيير مي‌كند. شكل ۲-۱۴، مقاومت ويژه برخي از فلزات را در محدوده‌اي از دما نشان مي‌دهد. يك تقريب تجريبي خوب كه براي اغلب مقاصد، به حد كافي مناسب است توسط رابطه زير داده مي‌شود :

$$\rho = \rho_* [1 + \alpha(T - T_*)] \quad (2-2)$$

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

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

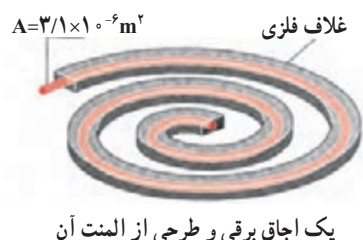


شکل ۲-۱۴ نمودار مقاومت ویژه چند فلز در یک گستره دمایی

در برخی مواد، مانند جیوه و قلع با کاهش دما، مقاومت ویژه در دمای خاصی به صورت ناگهانی به صفر افت می‌کند و در دماهای پایین‌تر، هم‌چنان صفر می‌ماند. این پدیده را **ابر رسانایی** می‌گویند.

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

مثال ۲-۳



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

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

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

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

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

مثال ۲-۴: دماسنج مقاومت پلاتینی



همان‌طور که در کتاب فیزیک ۱ دیدید دماسنج مقاومت پلاتینی یکی از سه دماسنج معیار برای اندازه‌گیری دماست. از دماسنج مقاومت پلاتینی می‌توان برای اندازه‌گیری دقیق دما در گستره‌ی دمایی حدوداً از 14 K تا 1235 K استفاده کرد. اساس کار دماسنج‌های مقاومت پلاتینی مبتنی بر تغییر مقاومت الکتریکی با دماست. در این دماسنج‌ها از پلاتین استفاده می‌کنند که تقریباً دچار خوردگی نمی‌شود و نقطه‌ی ذوب بالایی دارد.

تصویری از یک دماسنج مقاومت پلاتینی

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

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

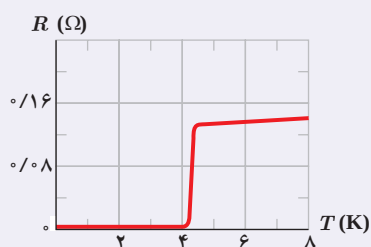
پاسخ: چون مقاومت R رابطه‌ی مستقیمی با مقاومت ویژه ρ دارد ($R = \rho L / A$)، آن‌گاه از رابطه ۲-۴ نتیجه می‌گیریم:

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

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

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

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



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

عنصر	دمای بحرانی (K)
تنگستن	۰/۰۱۵۴
بریلیم	۰/۰۲۶
تیتانیوم	۰/۰۳۹
کادمیم	۰/۰۵۲
اُسمیم	۰/۰۶۵۵
مولیبدن	۰/۰۹۱۶
گالیم	۱/۰۸۳۳
آلومینیم	۱/۱۷۵
پروتاکتینیم	۱/۴
ایندیم	۳/۴۰۵
قلع	۳/۷۲۱
جیوه	۴/۱۵۴
تانتال	۴/۴۷
سرب	۷/۲۳
نیوبیم	۹/۲۵

در اوایل قرن بیستم میلادی پدیده شگفت‌انگیزی برای برخی از فلزات در دمای خیلی پایین مشاهده شد و دریافتند با کاهش دما، مقاومت ویژه این فلزات در دمای خاصی موسوم به دمای بحرانی^۲، ناگهان به صفر افت می‌کند و از آن دما پایین‌تر همچنان صفر باقی می‌ماند. به این پدیده ابررسانایی می‌گویند. فیزیک‌دان هلندی کامرلینگ/ونتر^۳ در سال ۱۹۱۱ برای نخستین بار، این پدیده را برای جیوه مشاهده کرد و دریافت که در دمای حدود ۴K مقاومت ویژه جیوه به‌طور ناگهانی صفر می‌شود (شکل را ببینید). دمای بحرانی برای فلزات ابررسانای مختلف، متفاوت است، ولی برای اغلب آنها نزدیک به صفر کلون است. مثلاً همان‌طور که جدول روبه‌رو نشان می‌دهد این دما برای آلومینیم ۱/۱۷۵K و برای قلع ۳/۷۲۱K است. البته در سال ۱۹۸۶ میلادی در یک نمونه غیر فلزی سرامیک که از باریم، لانتانیم، مس و اکسیژن ساخته شده بود این پدیده در دمای ۳۵K مشاهده شد. در اوایل ۱۹۸۷ میلادی فیزیک‌دان‌ها سرامیک دیگری با دمای بحرانی ۹۸K و در سال ۱۹۸۸ میلادی سرامیکی با دمای بحرانی ۱۲۵K ساختند.

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

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

۱— Super — Conductivity

۲— Critical Temperature

۳— Kamerlingh Onnes

۴— P. L. Kapitza

۵— T. Collins

خوب است بدانید: نمره بندی سیم‌ها

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

در صنعت تولید سیم، سیم‌ها را با ضخامت‌های معینی می‌سازند و معلوم می‌کنند هر سیم چه جریان بیشینه‌ای را می‌تواند تحمل کند. بدیهی است هر چه ضخامت سیم بزرگ‌تر باشد، جریان بیشتری را می‌تواند تحمل کند. به هر سیم با ضخامت معین کُد (نمره) مشخصی را اختصاص می‌دهند. جدول روبه‌رو، برخی از این نمره‌بندی‌ها با جریان مجاز بیشینه چند سیم را براساس استاندارد بین‌المللی SWG^۱ و استاندارد آمریکایی AWG^۲ نشان می‌دهد.

مثال ۲-۵

سیم کشی خانه‌ها معمولاً با سیم‌های مسی نمره ۱۴ براساس استاندارد SWG صورت می‌گیرد که قطری برابر با ۲/۰۳۲ mm دارد. مقاومت ۱۰۰ m از این سیم‌ها در دمای اتاق چقدر است؟

پاسخ: مساحت مقطع این سیم برابر است با

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

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

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

انواع مقاومت‌ها و کدگذاری رنگی مقاومت‌های کربنی: در بسیاری از مدارها به‌خصوص

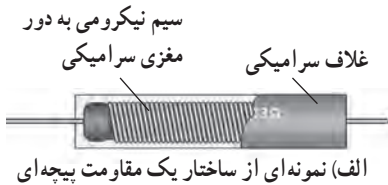
در وسایل الکترونیکی مقاومت‌ها برای کنترل جریان و ولتاژ استفاده می‌شود. انواع اصلی مقاومت‌ها بر دو نوع‌اند.

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

۱- Standard Wire Gauge

۲- American Wire Gauge

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



الف) نمونه‌ای از ساختار یک مقاومت پیچ‌ای

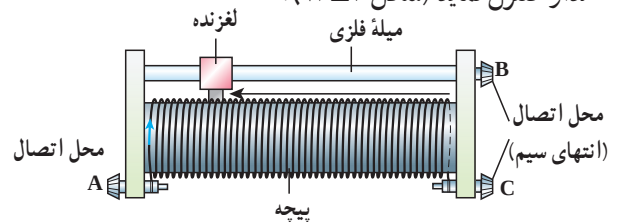


ب) تصویری از یک مقاومت پیچ‌ای

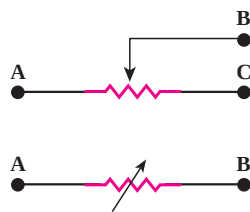
شکل ۲-۱۵

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

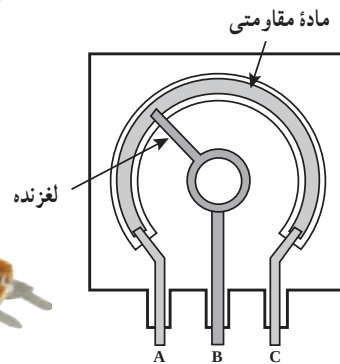
یکی از انواع مشهور مقاومت‌های پیچ‌ای، **رئوستا**^۳ نام دارد که یک نوع مقاومت متغیر است. در مدارهای الکترونیکی وسیله‌ای به نام **پتانسیومتر**^۴ به نوعی همان نقش را انجام می‌دهد. این نوع مقاومت‌ها، متغیرند. یک رئوستا از سیمی با مقاومت ویژه نسبتاً زیاد ساخته شده است. در یکی از انواع رئوستا (رئوستای خطی)،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



الف) طرحی از ساختار یک رئوستای خطی



ب) نماد یک رئوستا یا پتانسیومتر در مدار الکتریکی



ت) طرحی از یک پتانسیومتر



ث) تصویری واقعی از یک پتانسیومتر



پ) تصویر واقعی یک رئوستای خطی

شکل ۲-۱۶

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

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

۱- Nichrome (آلیاژ نیکل و کرم)

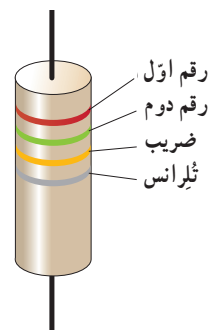
۲- Manganin (نیکل و منگنز)

۳- Rheostat

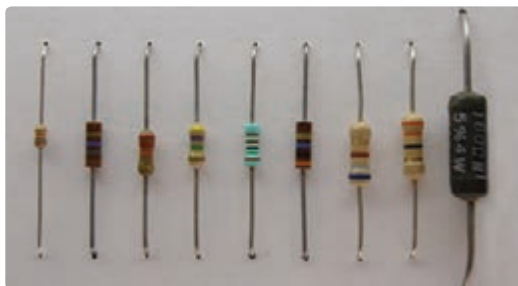
۴- Potentiometer. پتانسیومتر می‌تواند نقش پتانسیل‌سنجی نیز در مدارها داشته باشد که در آن صورت به آن پتانسیل‌سنج گفته می‌شود. این موضوع خارج از موضوع درسی این کتاب است.

۵- composition resistors

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



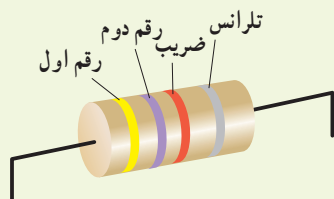
شکل ۲-۱۸ مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل $25k\Omega$ با تولرانس ۱۰ درصد است.



شکل ۲-۱۷ تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی

تمرین ۲-۲

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

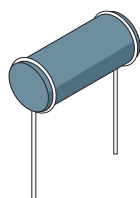


مقاومت‌های خاص و دیودها :

۱- **ترمیستور**^۲: ترمیستور نوعی از مقاومت است که بستگی مقاومت الکتریکی آن به دما با مقاومت‌های الکتریکی معمولی تفاوت دارد. اغلب از ترمیستورها به عنوان حسگر دما در مدارهای حساس به دما مانند زنگ خطر آتش و دماپاها و نیز در دماسنج‌ها استفاده می‌شود. ترمیستورها در ابعاد کوچکی ساخته می‌شوند و شکل‌های متفاوتی دارند که رایج‌ترین آنها دیسکی، مهره‌ای، و میله‌ای است (شکل ۲-۱۹).

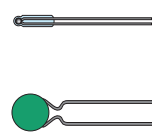


(ب)

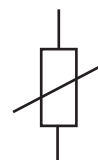


ترمیستور میله‌ای

ترمیستور مهره‌ای



ترمیستور دیسکی



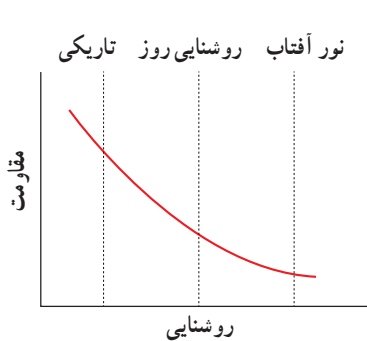
نماد ترمیستور در مدار الکتریکی

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

^۱ - tolerance

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

ترمیستورها به دو نوع NTC و PTC تقسیم بندی می شوند. در مورد ساختار و کارکرد آنها تحقیق کرده و به کلاس گزارش دهید.



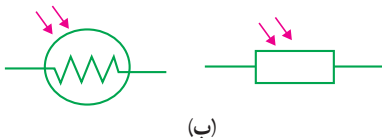
شکل ۲-۲۰ مقاومت بر حسب روشنایی برای یک LDR نوعی

۲- مقاومت های نوری^۱ (LDR): مقاومت نوری، نوعی مقاومت است که مقاومت الکتریکی آن به نور تابیده شده به آن بستگی دارد، به طوری که با افزایش شدت نور، از مقاومت آن کاسته می شود. مثلاً یک LDR نوعی در تاریکی مقاومتی چند مگا اهمی دارد، در حالی که در یک نور مناسب، مقاومت آن به چند صد اهم می رسد. نوعی از این مقاومت ها از جنس نیم رسانای خالص، مانند سیلیسیم هستند که با افزایش شدت نور تابیده شده، بر تعداد حامل های بار الکتریکی آنها افزوده شده و در نتیجه از مقاومت آنها کاسته می شود. مثلاً شکل ۲-۲۰ مقاومت الکتریکی چنین LDR هایی را بر حسب روشنایی^۲ (که با یکای LUX سنجیده می شود) نشان می دهد. شکل ۲-۲۱ الف تصویری از چند LDR و شکل ۲-۲۱ ب دو نماد این مقاومت ها در مدارهای الکتریکی را نشان می دهد.

برای اینکه به درکی از ساز و کار این مقاومت ها برسید، شکل ۲-۲۲ را در نظر بگیرید که در آن یک LDR در مداری ساده به یک لامپ LED متصل شده است. تا هنگامی که لامپ روشنایی شکل خاموش باشد، LDR مقاومت بالایی دارد و مانع از روشن شدن لامپ LED می شود. با روشن شدن لامپ روشنایی از مقاومت LDR کاسته می شود و لامپ LED روشن می گردد. با تنظیم لامپ روشنایی به ترتیبی که LDR در معرض نور بیشتری قرار گیرد، شدت نور لامپ LED بیشتر می شود. از این ویژگی LDR ها در تجهیزات گوناگونی از جمله چشم های الکترونیکی، دزدگیرها، کنترل کننده های خودکار، و چراغ های روشنایی خیابان ها استفاده می شود.

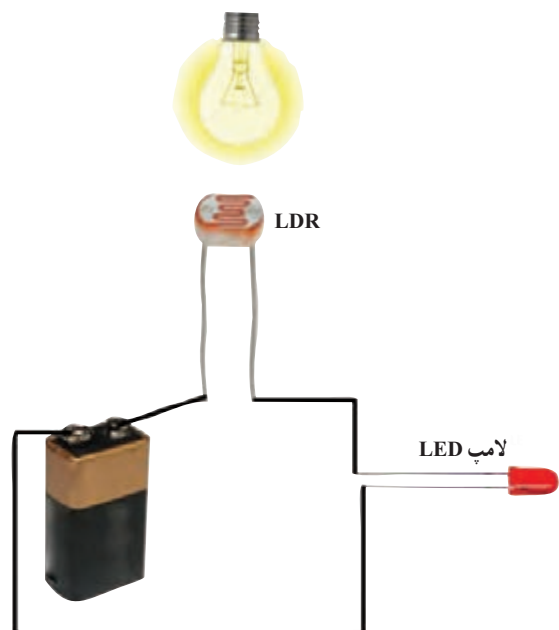


(الف)



(ب)

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



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

^۱ Photoresistor

^۲ Light Dependent Resistor

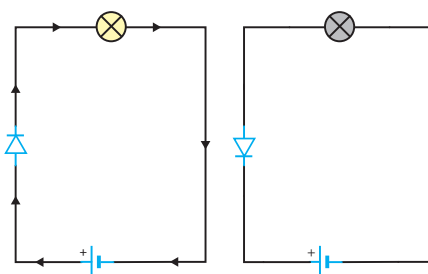
^۳ Illumination



شکل ۲-۳۳ 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 دماپا، 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 ۲-۲۳).

۳- دیودها^۱: دیود قطعه‌ای است که هرگاه در مداری قرار گیرد، جریان را تنها از یک سو عبور می‌دهد و مقاومت آن در برابر عبور جریان در این سو ناچیز است. به همین دلیل، دیود را اغلب به عنوان یک سوکننده جریان در نظر می‌گیرند و آن را با نماد $\rightarrow|$ در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهند. پیکان در این نماد جهتی را نشان می‌دهد که جریان می‌تواند از دیود عبور کند. مثلاً مدارهای ساده شکل ۲-۲۴ نشان می‌دهد که با تعویض جهت دیود، جریان از مدار عبور نمی‌کند و لامپ خاموش می‌شود. همچنین از دیود در مدارهای یک سوکننده برای تبدیل جریان‌های متناوب به جریان‌های مستقیم استفاده می‌شود که در فصل ۴ با آن آشنا می‌شوید.

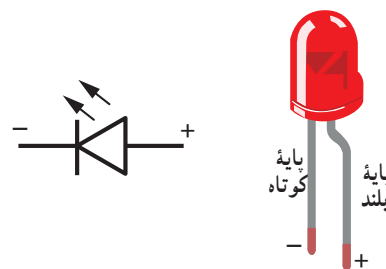


شکل ۲-۲۴ دیود در یک جهت جریان را عبور می‌دهد و در جهت مخالف مانع عبور جریان می‌شود.

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

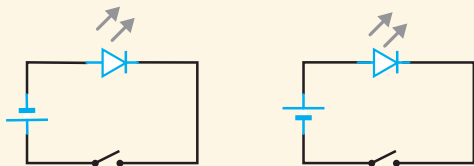


شکل ۲-۲۵ تصویری از چند دیود نورگسیل



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

در کدام شکل با بستن کلید، LED روشن می‌شود؟

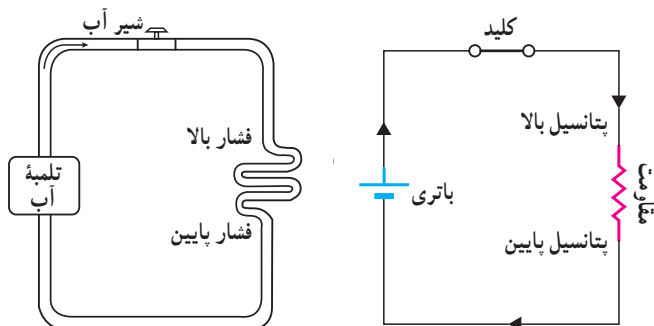


۲-۴ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

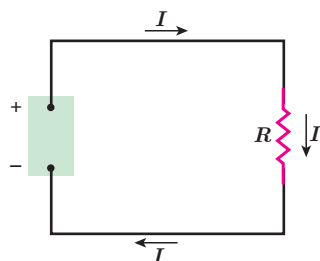
برای بالا بردن آب از سطح زمین به یک تلمبه آب نیاز است تا آب را به ارتفاع معینی برساند. بدین ترتیب، آب انرژی پتانسیل گرانشی لازم برای جریان یافتن و انجام کار معینی را کسب می‌کند (شکل ۲-۲۷). برای اینکه بارهای الکتریکی نیز در مدار جریان پیدا کنند و بتوانند از یک مقاومت الکتریکی عبور کنند، لازم است بین دو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



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



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



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

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

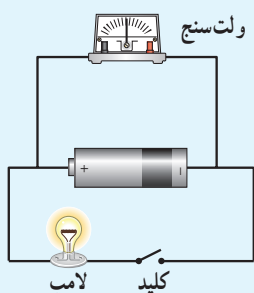
مدار ساده الکتریکی شکل ۲-۲۹ را در نظر بگیرید. منبع نیروی محرکه هنگام عبور بار Δq از منبع کاری به اندازه ΔW روی آن انجام می‌دهد تا آن را در مدار به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی محرکه الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا آن را از پایانه با پتانسیل کمتر به پایانه با

پتانسیل بیشتر ببرد، اصطلاحاً نیروی محرکه الکتریکی (emf)^۱ نامیده و با رابطه زیر تعریف می‌شود^۲:

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

یکای کمیت نیروی محرکه الکتریکی همان یکای اختلاف پتانسیل الکتریکی، یعنی ولت (V) است (۱V=۱J/۱C). پس اگر نیروی محرکه یک باتری مثلاً ۱/۵V باشد، به این معناست که باتری روی هر کولن باری که از آن می‌گذرد ۱/۵J کار انجام می‌دهد و به این ترتیب انرژی پتانسیل الکتریکی آن را ۱/۵J افزایش می‌دهد (باتری بدون اتلاف انرژی).

فعالیت ۲-۴



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

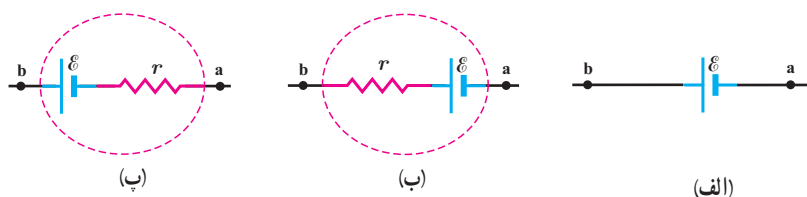
منبع‌های نیروی محرکه الکتریکی، یا آرمانی هستند و یا واقعی. اگر پایانه‌های منفی و مثبت یک منبع نیروی محرکه را به ترتیب با a و b نمایش دهیم، اختلاف پتانسیل میان این دو پایانه برای یک منبع آرمانی برابر با نیروی محرکه الکتریکی $\mathcal{E}$ آن است:

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

فعالیت ۲-۵

میدان الکتریکی درون باتری از 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

۲- توجه کنید که نیروی محرکه الکتریکی واژه نامناسبی است؛ زیرا emf نیرو نیست؛ بلکه مانند پتانسیل یک کمیت انرژی به ازای واحد

بار است.

خوب است بدانید: ماهی الکتریکی



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

خوب است بدانید: آثار تخریبی الکتریسته بر بدن انسان

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

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

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

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

نظر بگیرید. این مدار شامل باتری آرمانی B با نیروی محرکه $\mathcal{E}$ ، مقاومت R ، و دو سیم رابط است. فرض کنید می‌خواهیم از نقطه دلخواهی شروع کنیم و مدار را به‌طور ذهنی در یک جهت دور بزنیم و هرجا با اختلاف پتانسیل‌ها مواجه شدیم، آنها را به‌طور جبری جمع کنیم. اگر از نقطه a مثلاً به‌طور ساعتگرد شروع کنیم، نخست با باتری B مواجه می‌شویم. همان‌طور که دیدیم با حرکت از پایانه منفی باتری به سمت پایانه مثبت آن پتانسیل الکتریکی به اندازه $\mathcal{E} +$ افزایش می‌یابد. وقتی در طول سیم بالایی حرکت می‌کنیم، هیچ تغییر پتانسیلی وجود ندارد؛ زیرا در بستن مدارها فرض کرده‌ایم از سیم‌های رابط با مقاومت ناچیز استفاده شده است. وقتی از مقاومت می‌گذریم پتانسیل طبق رابطه $\Delta V = IR$ تغییر می‌کند، ولی توجه کنید پتانسیل باید کاهش یابد؛ زیرا ما از طرف پتانسیل بالاتر به سمت پتانسیل پایین‌تر حرکت کرده‌ایم (شکل ۲-۳۲). بنابراین، در شکل ما تغییر پتانسیل هنگام عبور از مقاومت برابر با $-IR$ است؛ یعنی اصطلاحاً در مقاومت افت پتانسیلی رخ می‌دهد. اگر با حرکت در طول سیم پایینی به نقطه a بازگردیم چون مقاومت این سیم نیز ناچیز فرض شده است باز تغییر پتانسیل نخواهیم داشت. با بازگشت به نقطه a، پتانسیل دوباره برابر با پتانسیل نقطه a می‌شود؛ یعنی می‌توان نوشت :

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

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

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

این رابطه نشان می‌دهد که جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در مدار ما برابر با صفر است. توجه کنید که اگر حلقه را در خلاف جهت نشان داده شده در شکل دور می‌زدیم به رابطه $-\mathcal{E} + IR = 0$ می‌رسیدیم که همان رابطه بالاست. در حالت کلی جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در هر حلقه صفر است. به این قاعده، **قاعده حلقه** می‌گویند. قاعده حلقه یا قانون ولتاژها بیان می‌دارد : **در هر دور زدن کامل حلقه‌ای از مدار، جمع جبری اختلاف پتانسیل‌های اجزای مدار صفر است.**

نشان داده می‌شود که قاعده حلقه چیزی جز پایداری انرژی نیست (تمرین ۲-۴ را ببینید). اکنون اگر باتری آرمانی مدار شکل ۲-۳۱ را با یک باتری واقعی که مقاومت داخلی r دارد جایگزین کنیم (شکل ۲-۳۳)، با به کار بستن قاعده حلقه به رابطه زیر می‌رسیم :

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

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

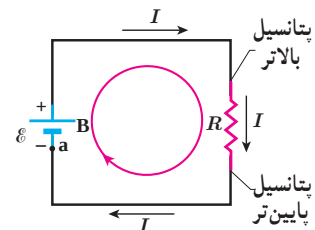
$$V_a + \mathcal{E} - Ir = V_b$$

و یا

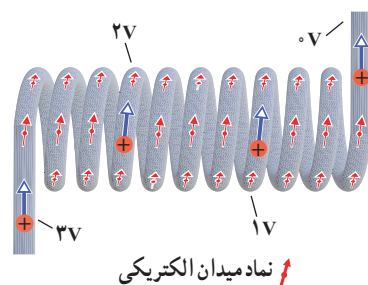
$$V_b - V_a = \mathcal{E} - Ir \quad (2-7)$$

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

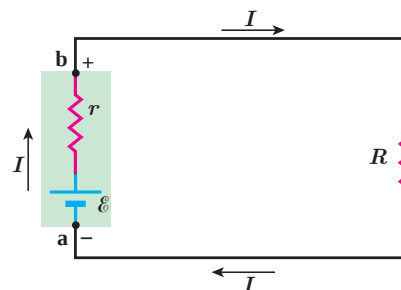
- ۱- هرگاه در مدار در جهت جریان از مقاومت مثلاً R بگذریم، پتانسیل به اندازه IR کاهش می‌یابد و اگر در خلاف جهت جریان حرکت کنیم پتانسیل به همان اندازه افزایش می‌یابد.



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



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



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



گوستاو کیرشهوف (۱۸۸۷-۱۸۲۴ م.)
گوستاو رابرت کیرشهوف^۱ در غرب آلمان کنونی به دنیا آمد. کیرشهوف سهمی اساسی در درک مدارهای الکتریکی، طیف‌نگاری، ترمودینامیک و تابش اجسام گرم داشته است. در واقع او نخستین کسی بود که واژه جسم سیاه را در سال ۱۸۶۲ به کار برد و دو قانون مهم در نظریه مدارهای الکتریکی (قاعده‌های حلقه و انشعب) و ترمودینامیک به افتخار او نام‌گذاری شده است. کیرشهوف قانون مدارهای الکتریکی خود را در سال ۱۸۴۵ در حالی بی‌ریزی کرد که دانشجوی دانشگاه آلبرتوس بود. او قانون تابش گرمایی خود را در سال ۱۸۵۹ پیشنهاد داد و آن را در سال ۱۸۶۱ اثبات کرد. او سپس عازم دانشگاه هایدلبرگ شد و در آنجا کارهای بدیعی در طیف‌نگاری به انجام رسانید. کیرشهوف سرانجام در سال ۱۸۸۷ میلادی در سن ۶۳ سالگی در برلین دیده از جهان فرو بست.

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

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

مثال ۲-۶

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

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

و در نتیجه

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

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

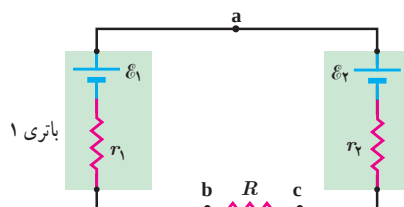
$$V_b - V_a = \mathcal{E} - Ir = 12\text{V} - (2/\text{A})(2/\Omega) = 8\text{V}$$

تمرین ۲-۳

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

^۱ Gustav Robert Kirchhoff

مثال ۲-۷



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

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

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

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

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

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

و از آنجا

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

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

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

در نتیجه

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

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

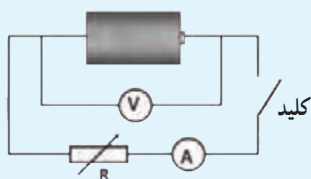
برای محاسبه اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ حتماً باید مسئله را از نو حل کرد. به این منظور، از نقطه c به سمت نقطه a حرکت می‌کنیم:

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

و در نتیجه:

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

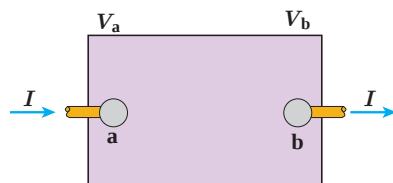
فعالیت ۲-۶ (کار در کلاس)



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

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

۵-۲ توان در مدارهای الکتریکی



شکل ۳۴-۲ یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی بین دوسر آن برقرار است.

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

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

اکنون می خواهیم رابطه هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به دست آوریم. جعبه شکل ۳۴-۲ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می دهد که می تواند شامل باتری، مقاومت و یا هر چیز دیگری باشد که اختلاف پتانسیلی بین پایانه های آن برقرار است. فرض کنید بار q در مدت زمان t تحت اختلاف پتانسیل $\Delta V = V_b - V_a$ از پایانه a به پایانه b برود. در فصل پیش دیدیم کار نیروی خارجی برای چنین انتقالی برابر با $W = q \Delta V$ است. از طرفی توان الکتریکی، آهنگ انجام این کار است:

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

$$P = I \Delta V \quad (۸-۲)$$

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

توان الکتریکی مصرفی در یک مقاومت: همان طور که گفتیم رابطه ۸-۲ برای مقاومت های الکتریکی نیز برقرار است. برای یک مقاومت، همان طور که پیش از این دیدیم ΔV را با V نشان می دهیم. برای محاسبه مقدار توان مصرفی، کافی است در این رابطه به جای V از رابطه تعریف مقاومت ($R = V/I$) استفاده کنیم:

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

در نتیجه:

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

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

مثال ۸-۲

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

پاسخ: الف) بنا به رابطه ۸-۲ توان مورد نیاز بخاری چنین می شود:

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

ب) انرژی مصرفی بخاری برابر Pt می شود که بر حسب یکاهای SI، P بر حسب وات (W)، t بر حسب ثانیه (s) است و انرژی مصرفی بر حسب ژول (J) می شود. اما برای محاسبه مصرف برق، P را بر حسب کیلووات (kW) و t را بر حسب ساعت (h) می گیرند. بنابراین، انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت (kWh) می شود $(3600s)(2200W) = 7.92 \times 10^6 J = 2.2kWh$.

پس انرژی مصرفی بخاری در یک ماه، برابر است با

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

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

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

فعالیت ۲-۷



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

فعالیت ۲-۸



الف) همانند شکل با یک اهم متر، مقاومت رشته سیم داخل لامپ 100 وات را اندازه گیری کنید. سپس با استفاده از رابطه $2-10$ و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. نتیجه محاسبه را با مقدار اندازه گیری شده مقایسه کنید و نتیجه را پس از گفت و گوی گروهی گزارش دهید.

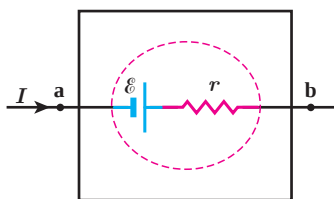
ب) اکنون با استفاده از نتیجه به دست آمده، دمای رشته سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشته سیم لامپ از جنس تنگستن و ضریب دمایی مقاومت ویژه آن $4/5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ است).

پرسش ۲-۲



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

۱- مقاومت ویژه تنگستن در یک گستره بزرگ دمایی تا نزدیکی نقطه ذوبش در 3400°C رفتاری خطی دارد.



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

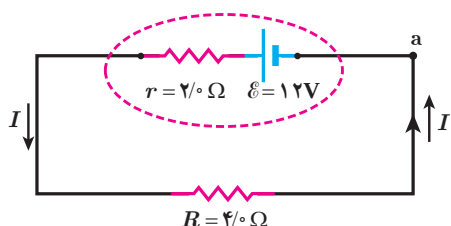
توان خروجی یک منبع نیروی محرکه واقعی: در بخش پیش اختلاف پتانسیل ΔV دو سر یک باتری واقعی را مانند شکل ۳۵-۲ به صورت $\mathcal{E} - Ir$ به دست آوردیم. با قرار دادن این اختلاف پتانسیل در رابطه توان الکتریکی خواهیم داشت:

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

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

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

مثال ۹-۲



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

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

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

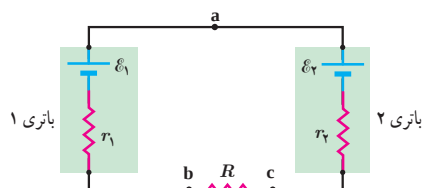
اکنون توان الکتریکی خروجی از باتری با استفاده از رابطه ۱۱-۲ چنین می‌شود:

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

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

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

مثال ۱۰-۲



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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} P_{\text{ورودی}} &= |P| = |I\Delta V| = I(\mathcal{E}_2 + Ir_2) = \mathcal{E}_2 I + r_2 I^2 \\ &= (2V)(0.5A) + (1\Omega)(0.5A)^2 = 1.4W \end{aligned}$$



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

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

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

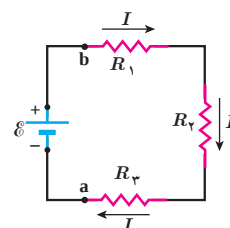
$$2/1W + 1/4W = 3/5W$$

تمرین ۲-۴

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

۲-۶ ترکیب مقاومت ها

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



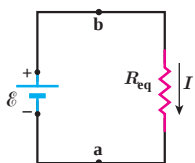
شکل ۲-۳۶ سه مقاومت که به طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده اند.

به آن، داریم :

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

و در نتیجه

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



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

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

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

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

با تعریف مقاومت معادل، به صورت

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

شکل ۳۷-۲ مدار معادل شکل ۳۶-۲

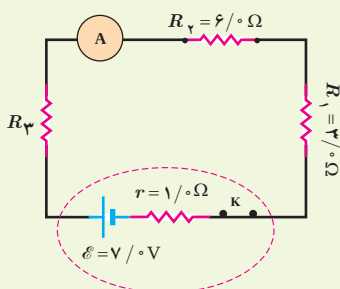
که در آن سه مقاومت با مقاومت R_{eq} جایگزین شده است.

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

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

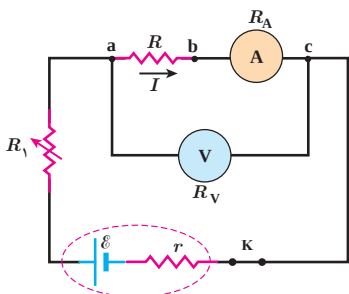
توجه کنید وقتی مقاومت‌ها به طور متوالی بسته شده‌اند، مقاومت معادل آنها بزرگ‌تر از مقاومت هریک از آنهاست.

تمرین ۵-۲



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

مثال ۱۱-۲



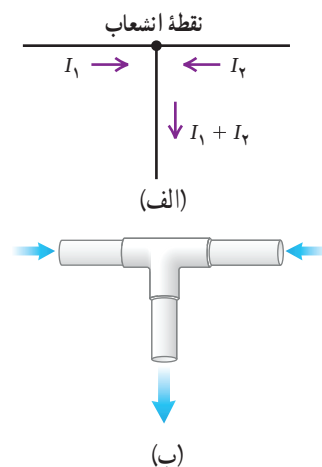
شکل روبه‌رو مداری را برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول R نشان می‌دهد. فرض کنید در این مدار ولت‌سنج $24V$ و آمپرسنج $200mA$ را نشان دهد. مقاومت ولت‌سنج $R_V = 10 \times 10^4 \Omega$ و مقاومت آمپرسنج $R_A = 10 \Omega$ است. مقاومت R را به دست آورید. **پاسخ:** مقاومت‌های R و R_A به طور متوالی به هم بسته شده‌اند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

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

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

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

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



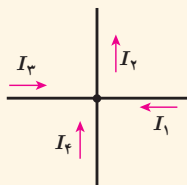
شکل ۲-۳۸ الف) طرحی از قاعده انشعاب. ب) مشابهت سازی اتصال لوله آب برای قاعده انشعاب

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

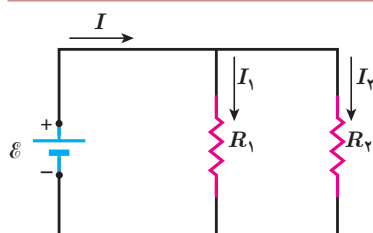
قاعده انشعاب در واقع مبتنی بر پایداری بار الکتریکی است و اینکه هیچ باری نمی تواند در یک نقطه انشعاب جمع گردد. بنابراین، مجموع بار وارد شده به هر نقطه انشعاب در واحد زمان باید برابر با مجموع بار خارج شده از آن نقطه در واحد زمان باشد (شکل ۲-۳۸ الف). همان طور که می دانیم بار عبوری در واحد زمان همان جریان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

پرسش ۲-۲

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



مثال ۲-۱۲ *



در شکل روبه رو، یک باتری آرمانی اختلاف پتانسیل $\mathcal{E} = 12\text{ V}$ را به دو سر مقاومت های $R_1 = 4/0\ \Omega$ و $R_2 = 6/0\ \Omega$ اعمال می کند. الف) جریان عبوری از هر مقاومت و ب) جریانی که از باتری می گذرد چقدر است؟

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

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

$$V_1 = \mathcal{E} = I_1 R_1 \Rightarrow I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1} = \frac{12\text{ V}}{4/0\ \Omega} = 3/0\text{ A}$$

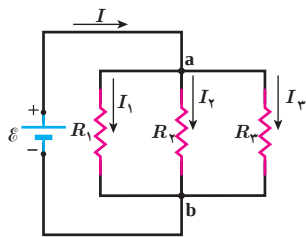
$$V_2 = \mathcal{E} = I_2 R_2 \Rightarrow I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} = \frac{12\text{ V}}{6/0\ \Omega} = 2/0\text{ A}$$

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

$$I = I_1 + I_2 = 3/0\text{ A} + 2/0\text{ A} = 5/0\text{ A}$$

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

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



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

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

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

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

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

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

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

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

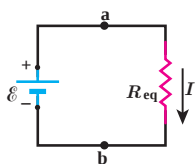
$$I = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

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

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

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

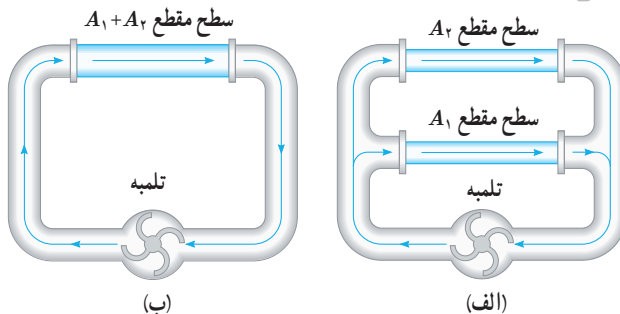
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2-13)$$



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

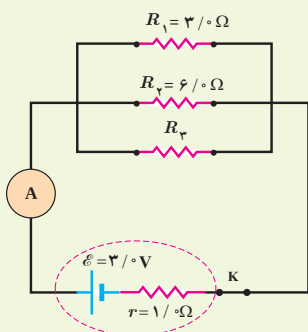
مدار شکل ۲-۳۹ به مدار معادل شکل ۲-۴۰ تبدیل می‌شود. توجه کنید هرگاه چند مقاومت به صورت موازی به هم بسته شوند، مقاومت معادل آنها کوچک‌تر از هریک از مقاومت‌های موجود در آن ترکیب است. برای اینکه به درکی از این نتیجه برسیم، دوباره مشابَه‌سازی با لوله‌های آب می‌تواند راه‌گشا باشد. شکل ۲-۴۱ الف دو لوله هم‌طول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

که به طور موازی به یک تلمبه آب متصل شده اند. در شکل ۲-۴۱ ب این دو لوله با یک تک لوله به همان طول آنها، ولی با سطح مقطعی برابر با مجموع سطح مقطع های آن دو لوله جایگزین شده است. اکنون تلمبه، آب بیشتری از لوله عریض تر در مقایسه با هر یک از لوله ها عبور می دهد. به عبارتی، لوله عریض تر مقاومت کمتری نسبت به شارش آب در مقایسه با هر یک از دو لوله باریک تر دارد.



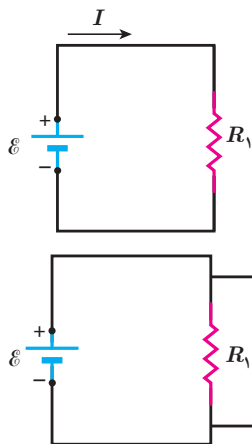
شکل ۲-۴۱ (الف) دو لوله هم طول با سطح مقطع های A_1 و A_2 به طور موازی به تلمبه آبی متصل شده اند. (ب) دو لوله بخش الف معادل با تک لوله ای با همان طول و سطح مقطع مجموع آنهاست.

تمرین ۲-۶



در شکل روبه رو سه مقاومت موازی به همراه یک آمپرسنج آرمانی به دو سر یک باتری وصل شده اند. اگر مقاومت معادل این ترکیب $1/6 \Omega$ باشد، (الف) مقاومت R_3 چقدر است؟ (ب) جریانی که آمپرسنج نشان می دهد را به دست آورید. (پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان های مصرفی مقاومت های R_1 ، R_2 و R_3 برابر است.

مثال ۲-۱۳



مدار ساده شکل روبه رو را که شامل یک منبع نیروی محرکه الکتریکی آرمانی با $\mathcal{E} = 15 \text{ V}$ و یک مقاومت با $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ است، در نظر بگیرید.

(الف) جریان عبوری از منبع را به دست آورید.

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

مدار چقدر می شود و چه جریانی از منبع می گذرد؟

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

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1} = \frac{15 \text{ V}}{10 \times 10^3 \Omega} = 1/50 \times 10^{-3} \text{ A} = 1/50 \text{ mA}$$

(ب) با استفاده از رابطه ۲-۱۳ داریم:

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

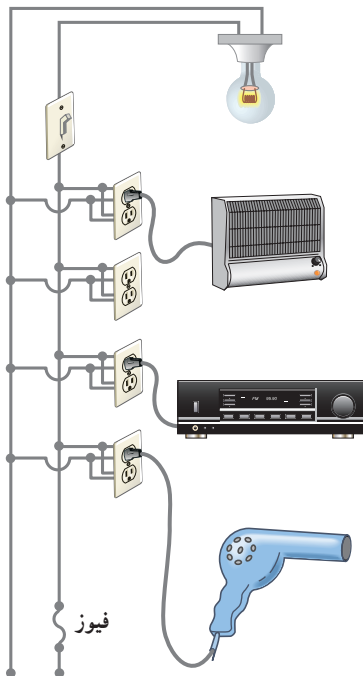
در نتیجه

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(10 \times 10^3 \Omega)(10 \times 10^6 \Omega)}{10 \times 10^3 \Omega + 10 \times 10^6 \Omega} = 99/10 \text{ k}\Omega$$

و بنابراین، جریان عبوری از منبع برابر است با

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{eq}} = \frac{15 \text{ V}}{9/90 \times 10^4 \Omega} = 1/52 \times 10^{-3} \text{ A} = 1/52 \text{ mA}$$

همان طور که می بینید، مقاومت معادل در این حالت که یکی از مقاومت ها خیلی بزرگ تر از مقاومت دیگر است ($R_2 \gg R_1$) تقریباً برابر با مقاومت کوچک تر (R_1) است.



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

(الف) فیوز قطعه‌ای حفاظتی در مسیر سیم‌کشی‌های الکتریکی است که وقتی جریان الکتریکی بخواهد از حد مجاز بیشتر شود، جریان را قطع می‌کند. اگر فیوز شکل، 15 A باشد، یعنی حداکثر بتواند جریان 15 A را تحمل کند، آیا فیوز خواهد پرید؟

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

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

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

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

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

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

بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر است با:

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

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

(ب) دیدیم که همه مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، مقاومت معادل مصرف‌کننده‌های شکل از رابطه ۲-۱۳ به دست می‌آید. بنابراین، برای محاسبه مقاومت لازم است مقاومت هریک از وسیله‌ها را به‌طور جداگانه محاسبه کنیم. مقاومت

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

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

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

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

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

پس مقاومت معادل چنین محاسبه می شود :

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

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

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

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

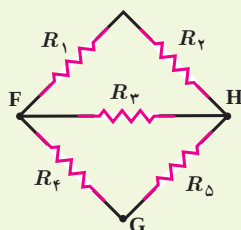
اکنون می خواهیم این نتیجه را با مجموع توان های هریک از مصرف کننده ها مقایسه کنیم.

مجموع توان مصرف کننده ها برابر است با :

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

که همان توان مصرفی مقاومت معادل است.

تمرین ۲-۷

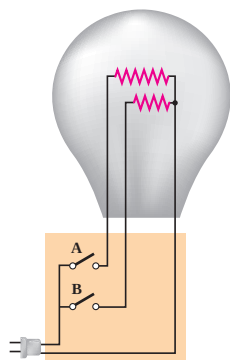


شکل روبه رو پنج مقاومت $8/00$ اهمی را نشان می دهد.

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

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

مثال ۲-۱۵



یک لامپ سه راهه $220V$ که دو رشته دارد مطابق شکل برای کار در سه توان مختلف ساخته شده است. کمترین و بیشترین توان مصرفی این لامپ به ترتیب $500W$ و $1500W$ است. مقاومت هریک از رشته ها را بیابید.

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

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

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

$$R_{eq} = R_{\min} = \frac{V^2}{P_{\max}} = \frac{(220V)^2}{1500W} = 322/7\Omega$$

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

$$R_1 = R_{\max} = \frac{V^2}{P_{\min}} = \frac{(220\text{V})^2}{50/10\text{W}} = 968\Omega$$

R_1 نمایش دهیم، داریم:

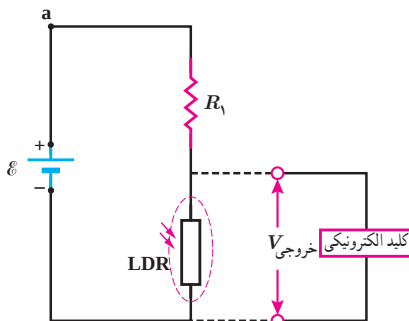
بنابراین، مقاومت مجهول R_2 از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{\text{eq}}} - \frac{1}{R_1} = \frac{1}{322/7\Omega} - \frac{1}{968\Omega} = 2/0.66 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$$

$$R_2 = \frac{1}{2/0.66 \times 10^{-3} \Omega^{-1}} = 484\Omega$$

در نتیجه

مثال ۲-۱۶



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

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

پاسخ: با استفاده از قاعده حلقه داریم:

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

از طرفی بدیهی است

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

از ترکیب دو معادله بالا خواهیم داشت:

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

و از آنجا برای R_1 چنین به دست می آوریم:

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

خوب است بدانید: باتری اشکانی

اولین نشانه چگونگی تولید الکتریسیته در اواخر قرن هجدهم میلادی را به دانشمند ایتالیایی، لوییجی گالوانی نسبت می‌دهند. گالوانی با یک مشاهده معمولی، ولی کاملاً اتفاقی به پدیده الکتریسیته جاری در مقابل الکتریسیته ساکن، پی برد. هموطن وی الکساندر ولتا دستگاهی براساس تجربه گالوانی اختراع کرد که در تاریخ به عنوان اولین باتری الکتریکی ثبت گردید و پیل ولتا لقب گرفت و از آن پس به عنوان منبع الکتریسیته به کار گرفته شد.

بیش از یک قرن پس از اختراع ولتا، کشف یک ظرف کوچک در نزدیکی بغداد در سال ۱۹۳۶ میلادی، این احتمال را قوت بخشید که ولتا اولین مخترع باتری نبوده بلکه آن را مجدداً اختراع کرده است. استخراج این ظرف به همراه سایر یافته‌های باستانی موجب شد تا ویلهلم کونینگ^۱ باستان‌شناس اتریشی، فرضیه جسورانه‌ای را مبنی بر ساخت باتری در دوره اشکانیان، در سال ۱۹۳۸ ارائه نماید.

این باتری شامل ظرف سفالی کوچک، با ارتفاع ۱۴ و قطر ۸ سانتی‌متر، و یک استوانه مسی و یک میله آهنی باریک بود که در نزدیکی شهر تیسفون کشف شد. از آنجایی که این محدوده، یک منطقه مسکونی اشکانی در دوره اشکانیان بوده است، باستان‌شناسان این یافته را متعلق به دوران امپراطوری اشکانیان دانسته و این باتری، باتری اشکانی یا باتری بغداد، نامیده شد. درچه تنگ و توخالی این ظرف سفالی، با درپوشی از جنس قیر پوشیده شده بود و استوانه‌ای که از جنس مس به شکل لوله درآمده بود، در پایین به یک صفحه مسی متصل شده و با قیر در مکان خود محکم شده و میله آهنی کاملاً زنگ زده بود. برخی از باستان‌شناسان مانند ویلهلم کونینگ؛ معتقد بودند که آنها اجزای یک باتری الکتریکی هستند و چنین استنتاج نمودند که اگر تعدادی از آنها به هم متصل شوند، توان الکتریکی کافی برای آبرکاری لایه‌های طلا روی اشیای فلزی را دارند. این آبرکاری به منظور ارتقای کیفی و افزایش بهای آنها انجام می‌شده است.

هنگامی که مدلی از این باتری، با سولفات مس، سرکه و یا حتی آب گریپ فروت ترش به عنوان محلول الکترولیت پرشد، مشاهده شد که این مجموعه می‌تواند اختلاف پتانسیل مناسبی تولید کند و براساس این مشاهدات نظرات متنوعی مطرح شد. البته همه دانشمندان با کاربرد این یافته باستانی به عنوان یک منبع تغذیه که زرگران اشکانی برای آبرکاری طلا از آن استفاده می‌کردند، موافق نبودند. برخی از آنها اعتقاد داشته و دارند که احتمالاً این باتری، یک منبع آماده الکتریکی و یا وسیله‌ای مشابه برای دادن شوک الکتریکی به بیماران بوده است.

پس از کشف این یافته‌های باستانی، تا امروز، دانشمندان زیادی تحقیقات گسترده‌ای روی انواع مدل‌های شبیه‌سازی شده از آن، جهت تأیید و یا رد فرضیه کونینگ انجام داده‌اند.



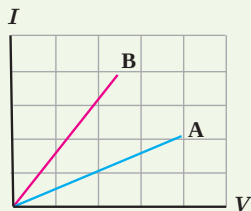
با استفاده از این اطلاعات الف) مقدار بار کل منتقل شده بین ابر و زمین، ب) جریان متوسط در یک یورش آذرخش و پ) توان الکتریکی آزادشده در 2×10^{-8} s را به دست آورید.

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

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

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

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



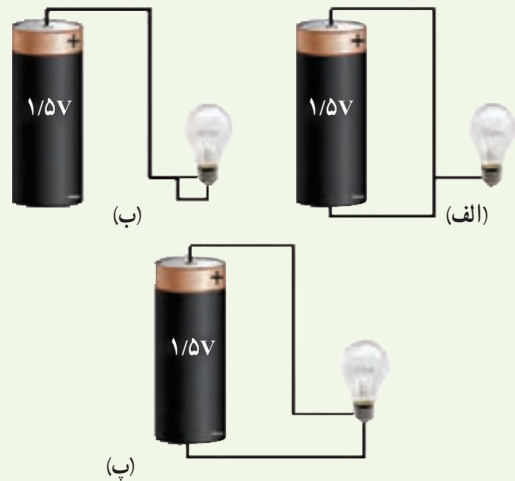
۲-۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

۷ دورسانای فلزی از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توپری به قطر $1/0$ mm است. رسانای B لوله‌ای توخالی به شعاع خارجی $2/0$ mm و شعاع داخلی $1/0$ mm است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟

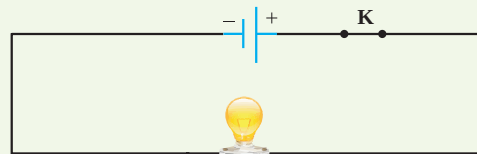
۸ در ماشین‌های چمن‌زنی برقی برای مسافت‌های حداکثر تا ۳۵ m از سیم‌های مسی نمره ۲۰ (قطر $0/08$ cm) و برای مسافت‌های طولانی‌تر از سیم‌های ضخیم‌تر نمره ۱۶ (قطر $0/13$ cm) استفاده می‌کنند تا بدین ترتیب مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. الف) مقاومت یک سیم ۳۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ ب) مقاومت یک

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

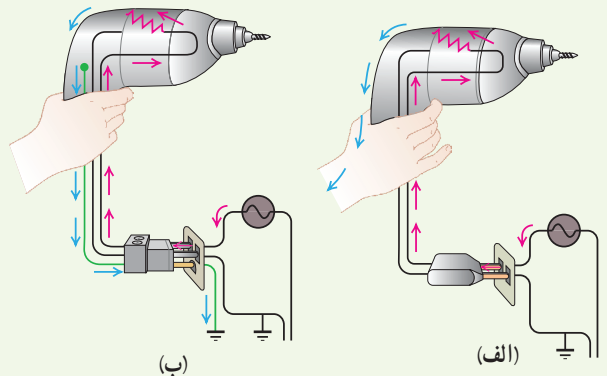
۱ در کدام یک از شکل‌های زیر، لامپ روشن می‌شود؟



۲ در مدار شکل زیر اختلاف پتانسیل دو سر لامپ $4/0$ V و مقاومت آن $5/0 \Omega$ است. در مدت ۵ دقیقه چه تعداد الکترون از لامپ می‌گذرد؟

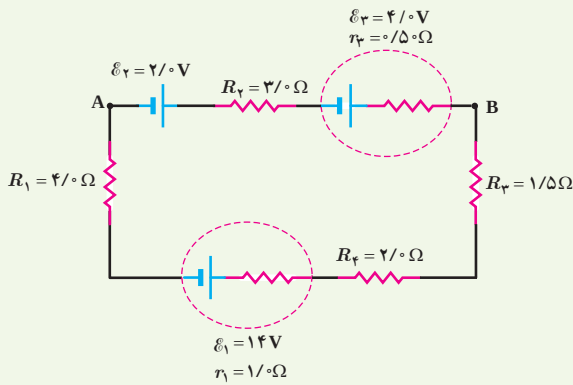


۳ بررسی کنید اگر مت‌برقی (دریل) معیوب شکل‌های زیر را با دوشاخه (شکل الف) یا سه‌شاخه (شکل ب) به پریز وصل کنیم، چه رخ می‌دهد؟



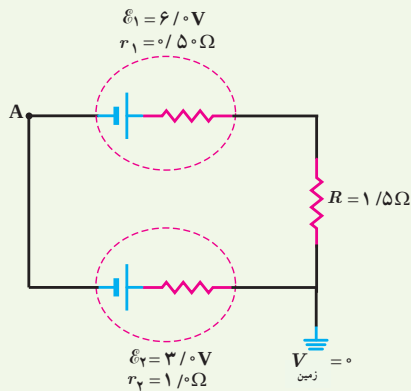
۴ آذرخش مثالی جالب از جریان الکتریکی در پدیده‌های طبیعی است. در یک آذرخش نوعی $1/0 \times 10^9$ J انرژی تحت اختلاف پتانسیل $5/0 \times 10^7$ V در بازه زمانی $2/0 \times 10^{-8}$ s آزاد می‌شود.

سیم ۷ متری ماشین چمن زنی چقدر است؟ (دمای سیم ها را 20°C در نظر بگیرید.)



۱۴ در شکل زیر

الف) اختلاف پتانسیل دو سر منبع های نیروی محرکه را به دست آورید.
ب) پتانسیل نقطه A را تعیین کنید.



۲-۵ توان در مدارهای الکتریکی

۱۵ دو لامپ رشته ای در اختیار داریم که جنس و طول رشته آنها یکسان است، ولی رشته لامپ B ضخیم تر از رشته لامپ A است. وقتی لامپ ها به ولتاژ یکسانی وصل شوند، کدام لامپ پرنورتر خواهد بود و چرا؟

۱۶ بر روی وسیله های الکتریکی، اعداد مربوط به ولتاژ و توان نوشته می شود. برای دو وسیله زیر،



۲۲۰V، ۲۴۰۰W، کتری برقی

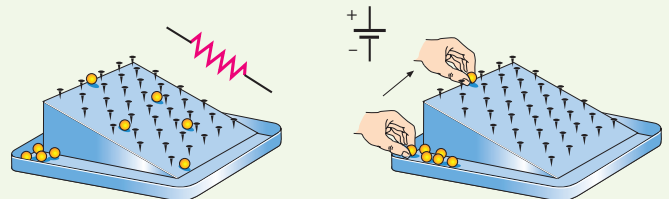


۲۲۰V، ۸۵۰W، اتوی برقی

الف) سیم های اتصال به برق آنها باید بتواند حداقل چه جریانی را از خود عبور دهد؟
ب) مقاومت الکتریکی هر وسیله در حالت روشن چقدر است؟

۲-۴ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

۱۰ شکل زیر یک مشابهت سازی مکانیکی برای درک مقاومت و نیروی محرکه الکتریکی را نشان می دهد که در آن بر سطح شیب داری میخ هایی تعبیه شده و تیل ها از ارتفاع بالای سطح شیب دارها می شوند و سپس دوباره به بالای سطح شیب دار بازگردانده می شوند. این مشابهت سازی مکانیکی را توجیه کنید.



۱۱ اختلاف پتانسیل دو سر باتری خودروهای سواری برابر ۱۲ ولت است. اگر هشت باتری قلمی ۱/۵ ولتی را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه آنها نیز برابر ۱۲ ولت می شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از هشت باتری قلمی استفاده نمی شود.
۱۲ یک باتری را در نظر بگیرید که وقتی به مدار بسته نیست اختلاف پتانسیل دو سرش برابر ۱۲/۰V است. وقتی یک مقاومت $10/5 \Omega$ به این باتری بسته شود، اختلاف پتانسیل دو سر باتری به $9/9V$ کاهش می یابد. مقاومت داخلی باتری چقدر است؟

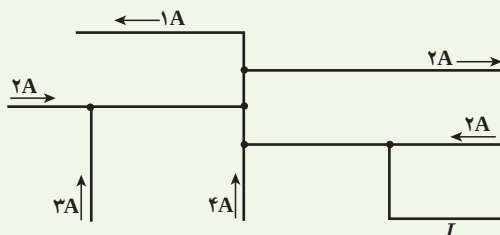
۱۳ در مدار شکل زیر جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه A و B ($V_B - V_A$) را محاسبه کنید.

۲-۶ ترکیب مقاومت‌ها

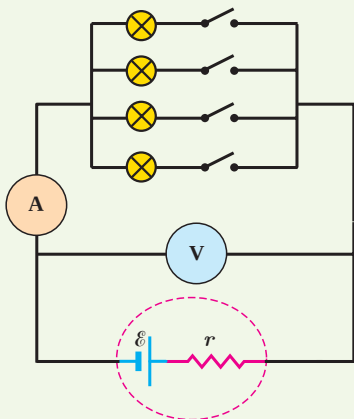
۲۱ به نظر شما چرا چراغ‌های خودرو (چراغ‌های جلو، عقب و ...)، به طور موازی بسته می‌شوند؟

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، نزدیک 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، عددی که آمپرسنج و ولت سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟

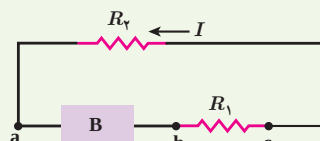


۲۵ دو لامپ با مقاومت مساوی R را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و آنها را هر بار به ولتاژ V وصل می‌کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متوالی چقدر است؟

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

۱۷ لامپ یک چراغ قوه معمولی با ولتاژ $2/9V$ کار می‌کند و در این حالت توان مصرفی آن $87W$ می‌شود. اگر مقاومت رشته تنگستنی این لامپ در دمای اتاق ($20^\circ C$) برابر $1/1\Omega$ باشد، دمای این رشته وقتی که لامپ روشن است، چقدر می‌شود؟

۱۸ شکل زیر جریان I را در یک مدار تک حلقه‌ای با باتری B و مقاومت‌های R_1 و R_2 (و سیم‌هایی 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.

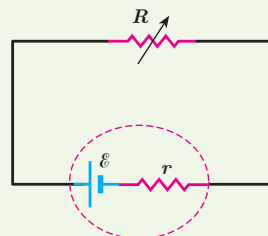


۱۹ تلویزیون و یکی از لامپ‌های خانه خود را در نظر بگیرید و فرض کنید که هر کدام روزی ۸ ساعت با اختلاف پتانسیل $220V$ ولت روشن باشد. الف) انرژی الکتریکی مصرفی هر کدام در یک دوره یک ماهه (30 روز) چند kWh است؟ (توان مصرفی هر وسیله را از روی آن بخوانید.)

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

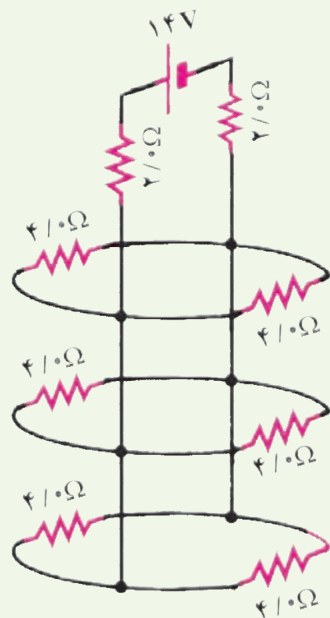
پ) اگر در شهر شما هر خانه یک لامپ $100W$ وات اضافی را به مدت 3 ساعت در شب روشن کند، در طول یک ماه تقریباً چند کیلووات ساعت انرژی الکتریکی اضافی مصرف می‌شود؟

۲۰ در شکل زیر، الف) نیروی محرکه الکتریکی و مقاومت داخلی

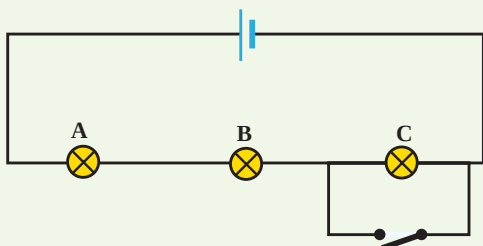


منبع را که توان خروجی آن به ازای $I_1 = 5/00A$ برابر $9/50W$ و به ازای $I_2 = 7/00A$ برابر $12/6W$ است، محاسبه کنید. ب) نمودار اختلاف پتانسیل در سربطی بر حسب جریان گذرنده از آن را رسم کنید.

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



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



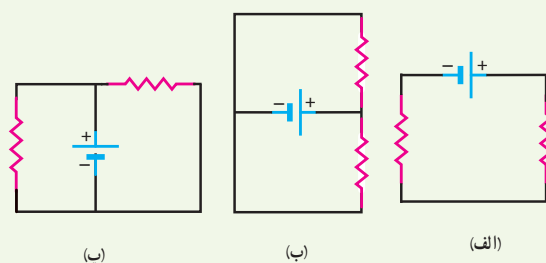
(الف) اختلاف پتانسیل دو سر A و B تغییر نمی‌کند.

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

(پ) هر یک از اختلاف پتانسیل‌های دو سر A و B به اندازه ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

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

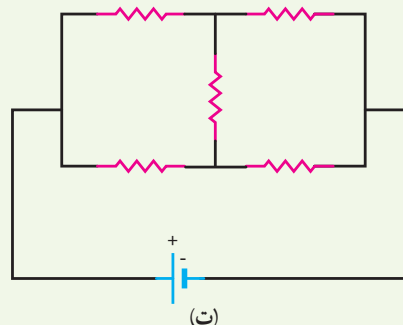
۳۳ درسیم‌کشی منازل، همه مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. یک اتوی ۱۱۰۰ W، یک نان برشته‌کن (توستر) ۱۸۰۰ W، پنج لامپ رشته‌ای ۱۰۰ W و یک بخاری ۱۱۰۰ W به یک مدار سیم‌کشی خانگی ۲۲۰ V که فیوز آن حداکثر می‌تواند جریان ۱۵ A را تحمل کند وصل شده‌اند. آیا این ترکیب مصرف‌کننده‌ها باعث پریدن این فیوز می‌شود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



(پ)

(ب)

(الف)

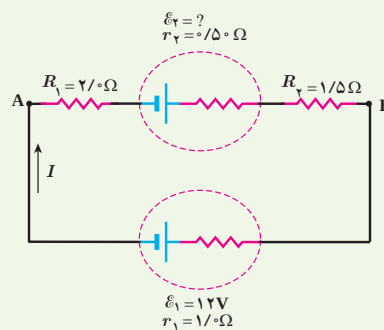


(ت)

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

(الف) نیروی محرکه $\mathcal{E}_2$ و $V_B - V_A$ چقدر است؟

(ب) انرژی مصرف‌شده در R_1 و R_2 در مدت ۵ ثانیه چقدر است؟



۳۵ سه مقاومت مشابه ۱۲ اهمی را یک‌بار به‌طور متوالی و بار دیگر

به‌طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت

وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۳۶ دو مقاومت موازی ۶ اهمی و ۱۲ اهمی به‌طور متوالی

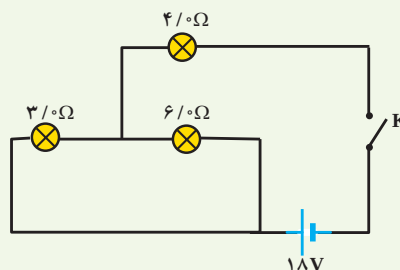
به یک مقاومت ۲ اهمی وصل شده است. اکنون، مجموعه

مقاومت‌ها را به دو سریک باتری آرمانی ۳۶ ولتی می‌بندیم. توان

مصرفی در مقاومت ۶ اهمی را محاسبه کنید.

۳۷ در شکل زیر، وقتی کلید بسته شود چه جریانی از هر لامپ

رشته‌ای می‌گذرد؟



مغناطیسی



پرواز مغناطیسی یا ترابری مگ لُو

قطارهای معمولی با ریل‌های آهنی در تماس اند؛ در حالی که 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 (محدود ۱۴۰ متر بر ثانیه) رسیده است.

کاربرد مغناطیس و آهنربا در جنبه‌های مختلف زندگی بشر، رشدی روزافزون دارد. فراتر از یک قرن، ضبط صدا و تصویر روی محیط‌هایی انجام می‌گرفت که مغناطیس در آنها نقش اصلی داشت. اگرچه فناوری دیجیتال به میزان زیادی جایگزین ضبط مغناطیسی به شیوه‌های سنتی 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. پزشکی امروز نیز در تشخیص بیماری‌ها به کمک دستگاه‌هایی از قبیل ام‌آر‌آی (MRI)، بهره فراوانی از مغناطیس و آثار آن می‌برد.



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

۳-۱ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی

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



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

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

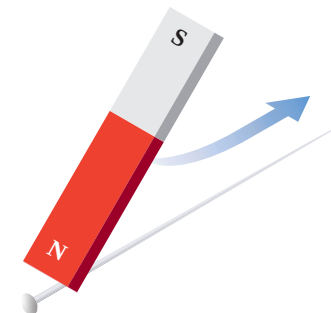


شکل ۳-۳ در آهنربا، دو ناحیه وجود دارد که خاصیت مغناطیسی در آنجا بسیار بیشتر از قسمت‌های دیگر است.

پرسش ۳-۱

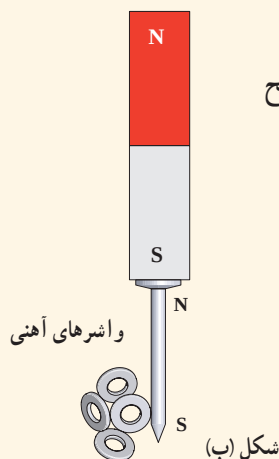
فرض کنید دو میله کاملاً مشابه، یکی از جنس آهن و دیگری آهنربا در اختیار دارید. باگفت‌وگو در گروه خود، روشی را پیشنهاد کنید که با استفاده از آن و بدون استفاده از هیچ وسیله دیگر، بتوان میله‌ای را که از جنس آهنرباست مشخص کرد.

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



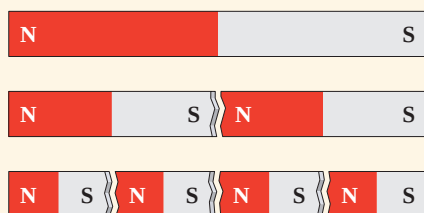
شکل ۳-۴ وقتی یکی از قطب‌های یک آهنربای دائمی را چندین بار و در یک جهت به یک سوزن ته‌گرد بکشید، سوزن برای مدتی دارای خاصیت مغناطیسی می‌شود.

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



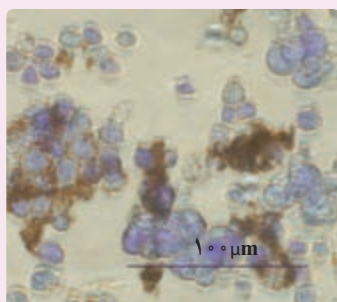
شکل (ب)

- ۱- دریافت خود را از شکل الف بیان کنید.
- ۲- در علوم هشتم با پدیده القای مغناطیسی آشنا شدید. با توجه به شکل ب این پدیده را توضیح دهید و بیان کنید چرا در پدیده القای مغناطیسی همواره جذب وجود دارد؟



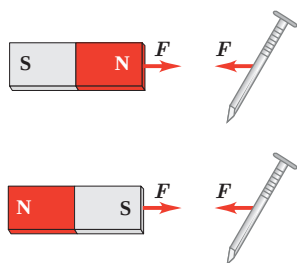
شکل (الف)

فناوری و کاربرد: نانو ذره‌های مغناطیسی برای درمان



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

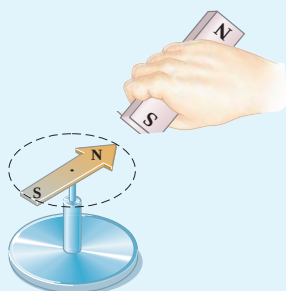
۲-۳ میدان مغناطیسی



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

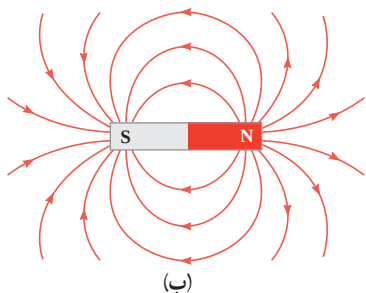
هرگاه آهنربایی را به یک میخ آهنی نزدیک کنید می‌بینید که میخ به طرف آهنربا حرکت می‌کند و به سمت آن جذب می‌شود (شکل ۳-۵). مشابه آنچه درباره اجسام باردار دیدید، برای توجیه این پدیده می‌گوییم در فضای اطراف آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد که سبب جذب میخ شده است. میدان مغناطیسی نیز مانند میدان الکتریکی که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

۱-۳ فعالیت

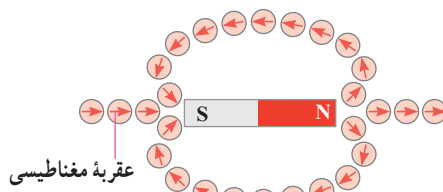


یکی از قطب‌های یک آهنربای میله‌ای را به یک عقربه مغناطیسی نزدیک کنید (شکل روبه‌رو). آنچه را می‌بینید توضیح دهید. با دور کردن آهنربا از قطب‌نما چه اتفاقی می‌افتد؟ دلیل آن را شرح دهید. در صورتی که قطب‌نما در اختیار ندارید، یک سوزن ته‌گرد مغناطیسی شده را روی سطح آب، درون ظرفی شناور سازید. به این ترتیب،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

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



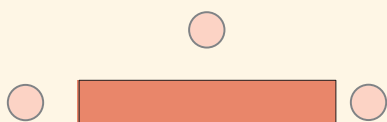
(ب)



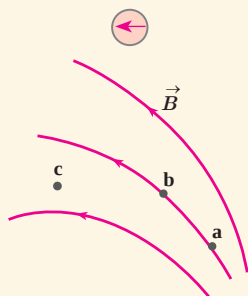
(الف)

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

پرسش ۳-۳

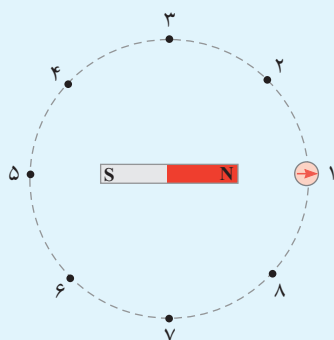


۱- شکل روبه رو، یک آهنربای میله ای و تعدادی عقربه مغناطیسی را نشان می دهد. (الف) کدام سر آهنربا قطب N و کدام سر قطب S است؟
(ب) جهت گیری عقربه های مغناطیسی را در دیگر مکان های روی شکل تعیین کنید.



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

فعالیت ۳-۲

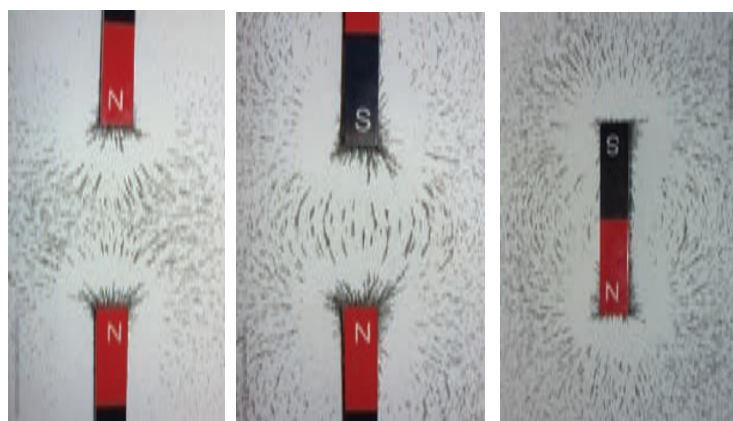


یک آهنربای میله ای را روی سطح افقی میزی قرار دهید. یک قطب نما یا عقربه مغناطیسی را مقابل یکی از قطب های آهنربا قرار دهید. عقربه را روی مسیری دایره ای شکل دور آهنربا، به آرامی حرکت دهید (شکل روبه رو) تا یک دور کامل دور آهنربا بچرخد و به جای اولش برگردد.
(الف) جهت گیری عقربه را در نقطه های ۱ تا ۸، روی شکل نشان دهید.
(ب) در این حرکت، عقربه چند دور پیرامون محور خودش می چرخد؟

هدف: مشاهده طرّح خط‌های میدان مغناطیسی با استفاده از براده آهن

وسیل‌ه‌های 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 بگذارید.
- به کمک نمک پاش، کمی براده آهن را به طور یکنواخت روی شیشه (مقوا) بپاشید.



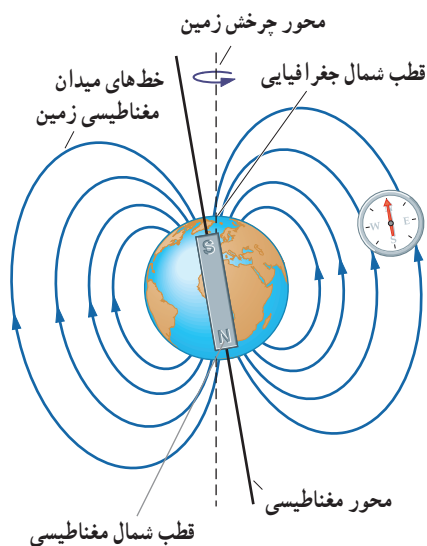
(پ)

(ب)

(الف)

- چند ضربه آرام به صفحه شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرّحی 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 طرّح ساده‌ای از میدان مغناطیسی زمین. عقربه مغناطیسی قطب‌نما در هر نقطه در امتداد خط‌های این میدان قرار می‌گیرد.

میدان مغناطیسی زمین: زمین مانند یک آهنربای بسیار بزرگ رفتار می‌کند و طرّح خط‌های میدان مغناطیسی آن مانند طرّح 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 زمین‌شناختی نشان می‌دهند که جهت این میدان در بازه‌های زمانی نامنظم از ده هزار تا یک میلیون سال به طور کامل وارون می‌شود. قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. در واقع، قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین فاصله نسبتاً زیادی از یکدیگر دارند؛ مثلاً قطب جنوب مغناطیسی تقریباً در فاصله ۱۸۰۰ کیلومتری قطب شمال جغرافیایی قرار دارد. این بدان معناست که عقربه مغناطیسی قطب‌نما در جهت شمال واقعی جغرافیایی قرار نمی‌گیرد و تا حدودی از شمال جغرافیایی انحراف دارد.

فعالیت ۳-۳

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

خوب است بدانید: جهت یابی مغناطیسی در جانداران

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

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

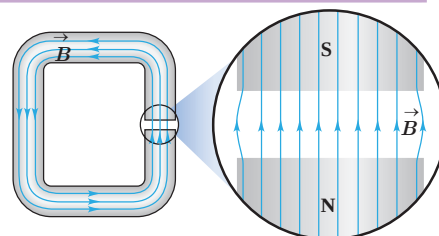


(ب)



(الف)

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



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

۱- می‌توانید به سایت www.magnetic-declination.com بروید و درستی شیب مغناطیسی (magnetic inclination) به دست آمده در فعالیت ۳-۳ را بررسی کنید.

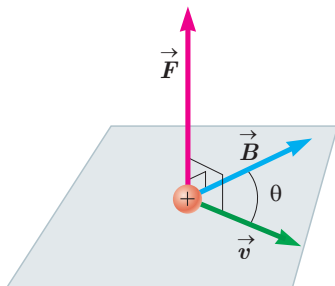
با نصب برنامه inclination meter روی گوشی تلفن همراه خود، شیب مغناطیسی را در محل زندگی خود اندازه بگیرید. شیب مغناطیسی در ایران از حدود ۴۰° تا حدود ۶۰° از مناطق جنوبی تا مناطق شمال غربی متغیر است.



نیکولا تسلا (۱۸۵۶-۱۹۴۳)

تسلا در کرواسی به دنیا آمد. او بعدها به آمریکا مهاجرت و مدتی با ادیسون همکاری کرد. ادیسون همواره با جریان مستقیم (dc) کار می‌کرد، با این وجود، وی کار کردن با جریان متناوب (ac) با ولتاژهای بسیار بالا را عملی ساخت. تسلا از اینکه جریان متناوب برای اولین بار در 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 می‌دهند.

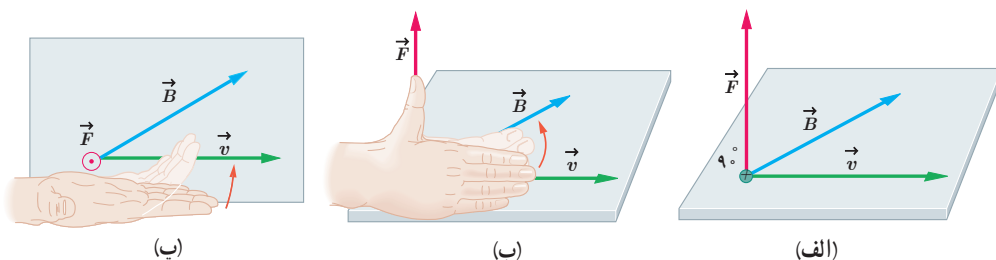
⊙ نماد بردار عمود بر صفحه به طرف بیرون (برون سو)
⊗ نماد بردار عمود بر صفحه به طرف درون (درون سو)



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

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

آزمایش نشان می‌دهد 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 ۹-۳ الف بر راستای سرعت و میدان مغناطیسی عمود است. این نیرو را نیروی مغناطیسی می‌نامند و جهت آن، مطابق شکل ۹-۳ ب و پ به کمک قاعده دست راست تعیین می‌شود. اگر دست راست خود را طوری نگه داریم که انگشتان باز شده ما در جهت $\vec{v}$ باشد - به گونه‌ای که وقتی آنها را روی زاویه کوچک‌تری که $\vec{v}$ با $\vec{B}$ می‌سازد، 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 ۹-۳ الف) بر ذره باردار q که با سرعت $\vec{v}$ در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ حرکت می‌کند، نیروی مغناطیسی $\vec{F}$ وارد می‌شود. (ب) و (پ) جهت این نیرو به کمک قاعده دست راست تعیین می‌شود.

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

$$F = |q|vB\sin\theta \quad (۱-۳)$$

در این رابطه $|q|$ ، بزرگی بار الکتریکی، v تندی (اندازه سرعت) بار الکتریکی، B اندازه میدان مغناطیسی و θ زاویه بین جهت حرکت بار الکتریکی (بردار $\vec{v}$) با جهت میدان مغناطیسی (بردار $\vec{B}$) است (شکل ۱-۳).

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

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

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

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

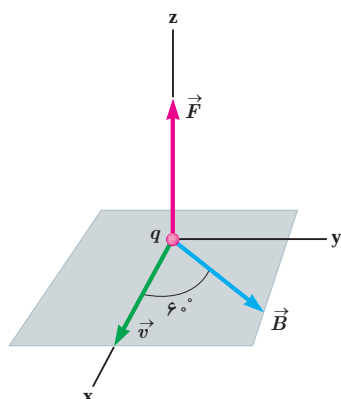
تسلا یکای بزرگی است و در برخی موارد از یکای قدیمی (غیر SI) و کوچک‌تری به نام گاوس (با نماد G) استفاده می‌کنند به طوری که داریم $1\text{ T} = 10^4\text{ G}$. اندازه میدان مغناطیسی زمین در نزدیکی سطح زمین در قطب‌ها بیشترین (65°) و در استوا کمترین (25°) است. بزرگی میدان مغناطیسی در نزدیکی آهنرباهای میله‌ای کوچک حدود 1° تا 1° تسلا است. همچنین بزرگ‌ترین میدان مغناطیسی مداوم^۱ که امروزه در آزمایشگاه تولید شده، حدود 45 تسلا است.



کارل فریدریش گaus (۱۸۵۵-۱۷۷۷)

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

مثال ۳-۱



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

پاسخ: با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

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

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

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

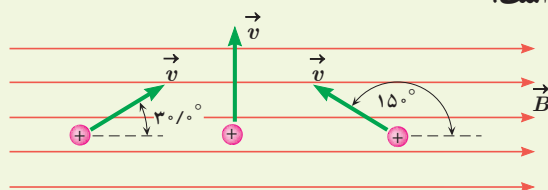
$$F = |q|vB \sin \theta$$

$$= (4 \times 10^{-9}\text{ C})(2 \times 10^6\text{ m/s})(12 \times 10^{-4}\text{ T}) \sin 6^\circ \approx 8/3 \times 10^{-1}\text{ N}$$

تمرین ۳-۱

۱- پروتونی که با زاویه $\theta = 3^\circ$ نسبت به میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه $B = 32 \times 10^{-4}\text{ T}$ در حرکت است نیروی به اندازه

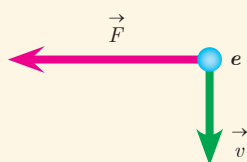
$F = 5/12 \times 10^{-14}\text{ N}$ وارد می‌شود. تندی پروتون چند کیلو متر بر ثانیه است؟



۲- سه ذره، هر کدام با بار $q = 6/15\text{ nC}$ و تندی $v = 46\text{ m/s}$ ،

در میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه $B = 0/165\text{ T}$ در حرکت اند (شکل روبه‌رو). اندازه نیروی وارد بر هر ذره را حساب کنید.

پرسش ۳-۴

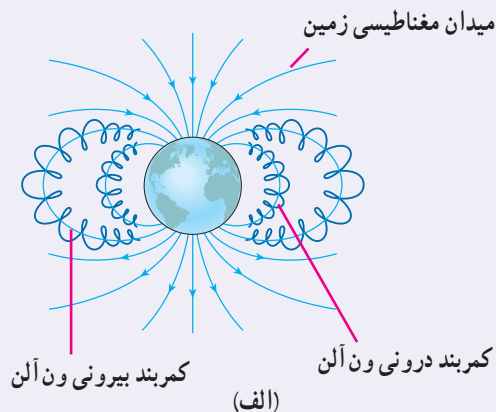


الکترونی عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. با توجه به شکل،

جهت میدان $\vec{B}$ کدام است؟

☐ بالا ☐ راست ☐ درون سو ☐ برون سو

خوب است بدانید: کمرندهای تابشی ون آلن



در بیرون از جو زمین، ذره‌های باردار بسیاری با تندی‌های بسیار زیادی در حرکت‌اند. این ذره‌های سریع را که معمولاً از جنس پروتون، هستهٔ اتم هلیوم (ذرهٔ آلفا) و الکترون هستند پرتوهای کیهانی می‌نامند. این پرتوها افزون‌بر فضاوردان، 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 می‌افتند، کمرندهای تابشی ون آلن را تشکیل می‌دهند (شکل الف).



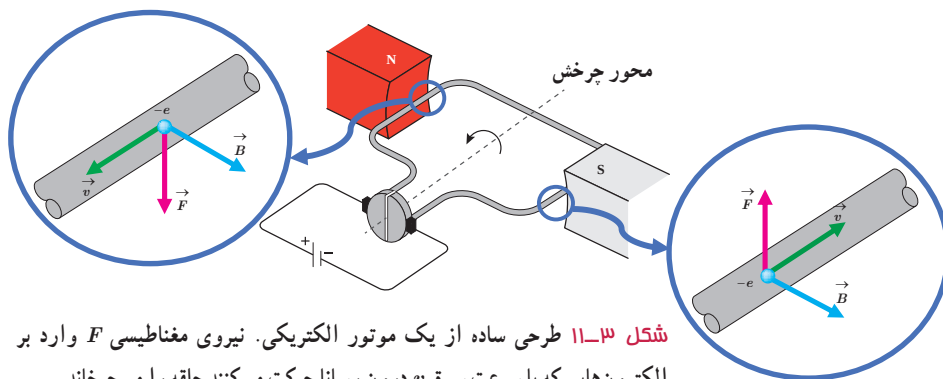
(ب) تصویری خیره‌کننده از شفق قطبی در نیمکرهٔ شمالی. در نیمکرهٔ جنوبی این پدیده شفق جنوبی نامیده می‌شود.

این کمرندها در سال ۱۹۵۸ میلادی و براساس داده‌های گردآوری شده توسط ماهوارهٔ اکسپلورر I کشف شده و به نام جیمز ون آلن (۱۹۱۴-۲۰۰۶) یکی از کاشفان آن، نام‌گذاری شدند. فضاوردان در فاصله‌های ایمن بسیار پایین‌تر از این کمرندهای تابشی دور زمین می‌گردند.

هرگاه توفان‌های خورشیدی، ذره‌های باردار را به صورت فوران‌های عظیمی پرتاب کنند، بسیاری از آنها از نزدیکی زمین می‌گذرند و در کمرند ون آلن به دام می‌افتند. شفق قطبی (نورهای شمالی) پدیدهٔ زیبایی است که بر اثر برخورد ذره‌های باردار موجود در کمرند ون آلن با مولکول‌های جو زمین به وجود می‌آید (شکل ب).

۴-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان

موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند و اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها نظیر جاروی برقی، مت‌برقی، آسیاب برقی، ماشین لباسشویی، پنکه و... را تشکیل می‌دهند. شکل ۱۱-۳ ساده‌ای از اجزای اصلی یک موتور الکتریکی را نشان می‌دهد که در علوم سال هشتم با نحوهٔ 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 سوق v درون رسانا حرکت می‌کنند حلقه را می‌چرخاند.

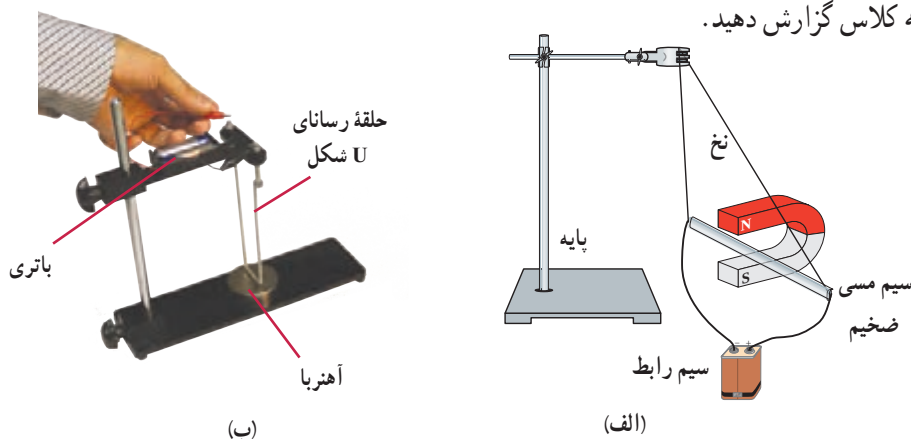
در هر موتور الکتریکی، سیم‌هایی وجود دارند که حامل جریان‌اند (یعنی بارهای الکتریکی در آنها در حرکت‌اند) و آهنرباهایی نیز وجود دارند که بر بارهای متحرک نیرو وارد می‌کنند. از این رو، بر هر سیم حامل جریان، نیروی مغناطیسی وارد می‌شود و این نیروها حلقه را می‌چرخاند.

آزمایش ۲-۳

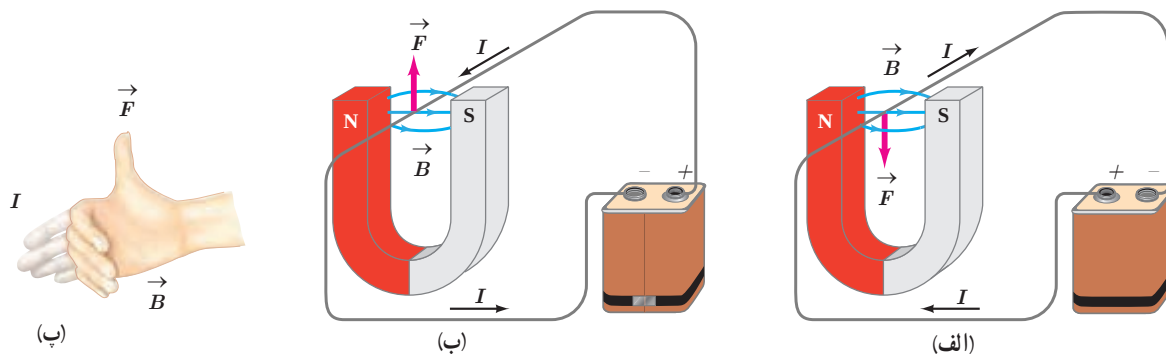
هدف: بررسی نیروی وارد بر سیم حامل جریان

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

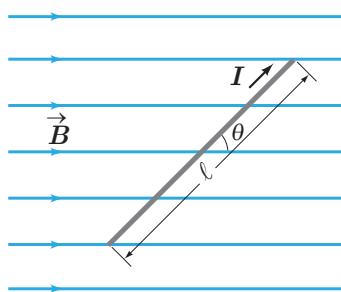
- مداری مطابق شکل الف ببندید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، در گروه خود به بحث بگذارید.
- در صورتی که وسیله‌ای مشابه شکل ب را در آزمایشگاه مدرسه در اختیار دارید می‌توانید از آن استفاده کنید.
- مدار را قطع کنید و جهت جریان را تغییر داده و مراحل بالا را دوباره انجام دهید.
- نتیجه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



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



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

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

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

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

پرسش ۳-۵

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

مثال ۳-۲

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی $G = 40^\circ$ در راستایی قرار دارد که با جهت میدان زاویه 3° می‌سازد. اگر جریان عبوری از سیم $5^\circ A$ باشد، بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر $1^\circ m$ از این سیم را حساب کنید.
پاسخ : با توجه به فرض‌های مسئله داریم :

$$B = 40^\circ \times 10^{-4} T, \quad \theta = 3^\circ, \quad I = 5^\circ A \quad \text{و} \quad \ell = 1^\circ m$$

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

$$F = I\ell B \sin\theta = (5^\circ A)(1^\circ m)(40^\circ \times 10^{-4} T) \sin 3^\circ = 0.1^\circ N$$

تمرین ۳-۲

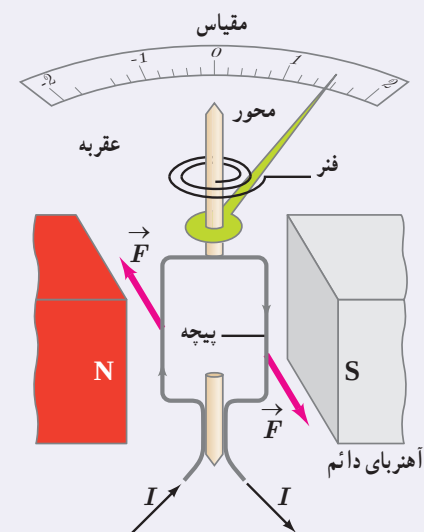
سیم مستقیمی به طول $2/4 m$ حامل جریان $2/5 A$ از شرق به غرب است. اندازه میدان مغناطیسی زمین در محل این سیم 45° و جهت آن از جنوب به شمال است. اندازه و جهت نیروی مغناطیسی وارد بر این سیم را تعیین کنید.

$$\vec{B} \quad (\text{میدان مغناطیسی زمین به طرف شمال}) \quad \otimes \quad I = 2/5 A$$

فعالیت ۳-۴

آزمایشی را طراحی کنید که به کمک آن بتوان نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی درون میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری کرد. در صورت لزوم، برای اجرای این آزمایش می‌توانید از ترازوهای دیجیتال (رقمی) با دقت $1^\circ g$ 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 بسیار کوچک از مرتبه میکروآمپر را اندازه گرفت. با استفاده از مطالبی که تاکنون فرا گرفته‌ایم، 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 روبه‌رو) 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.

۳-۵ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

تا اینجا بی‌بردی که در فضای اطراف آهنرباهای دائمی میدان مغناطیسی وجود دارد. در ادامه این فصل با چشمه‌های دیگر ایجاد میدان مغناطیسی آشنا خواهیم شد.

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



هانس کریستیان اورستد (۱۸۵۱-۱۷۷۷) فیزیک‌دان

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

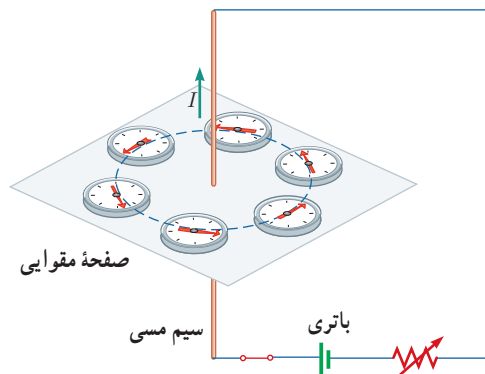


شکل ۳-۱۴ میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را می‌توان با قرار دادن تعدادی عقربه مغناطیسی پیرامون آن نشان داد.

هدف: بررسی آثار مغناطیسی جریان الکتریکی (آزمایش اورستد)

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

شرح آزمایش:



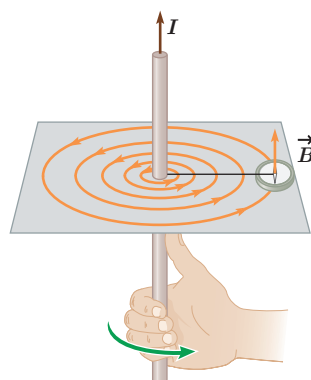
- سیم مسی را از صفحه مقوایی بگذرانید و با آن مداری مطابق شکل روبه‌رو تشکیل دهید.
- قبل از برقراری جریان الکتریکی، عقربه مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرار گرفتن آن توجه کنید.
- با وصل کردن مدار، جریان الکتریکی را از سیم مسی عبور دهید و به جهت‌گیری عقربه مغناطیسی توجه کنید.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

● با توجه به جهت‌گیری عقربه در نقاط مختلف صفحه مقوایی، چند خط میدان مغناطیسی را رسم کنید.

● این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.

● به کمک چند باتری دیگر یا تغییر مقاومت رنوستا، تحقیق کنید که افزایش یا کاهش جریان چه تأثیری در نتیجه آزمایش دارد؟

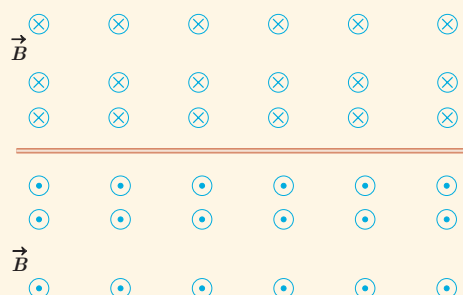
● نتیجه این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.



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

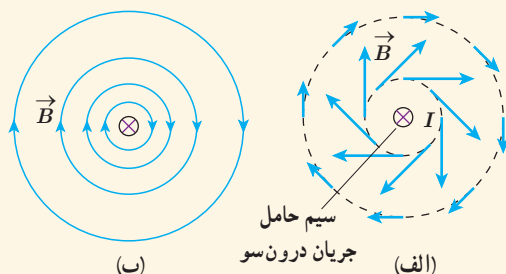
با انجام این آزمایش می‌بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان، مطابق شکل ۳-۱۵ به صورت دایره‌های هم‌مرکز در اطراف سیم حامل جریان هستند. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم مستقیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقربه مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن، با استفاده از قاعده دست راست نیز می‌توان این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

پوشش ۳-۶



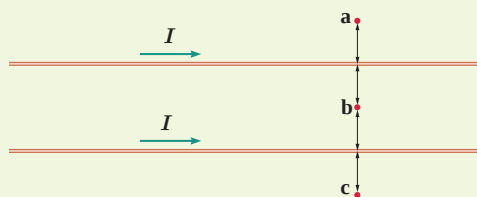
شکل روبه‌رو، جهت میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم افقی و مستقیم حامل جریان را نشان می‌دهد. در ناحیه بالای سیم، جهت میدان مغناطیسی درون‌سو و در ناحیه پایین آن برون‌سو است. جهت جریان را در سیم تعیین کنید.

پرسش ۳-۷



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

تمرین ۳-۳



جهت میدان مغناطیسی برآیند (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.

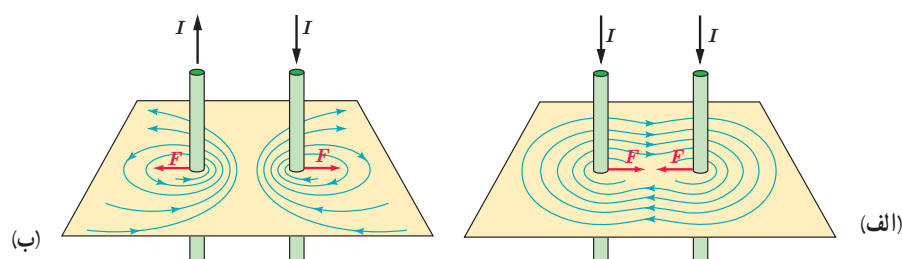
فناوری و کاربرد: میدان‌های مغناطیسی بدن



تمام یاخته‌های زنده بدن انسان به‌طور الکتریکی فعال‌اند. جریان‌های الکتریکی ضعیف در بدن، میدان‌های مغناطیسی ضعیف ولی قابل اندازه‌گیری تولید می‌کنند. اندازه میدان‌های حاصل از عضله‌های اسکلتی کوچک‌تر از 10^{-10} T ، یعنی در حدود یک میلیونیم میدان مغناطیسی زمین است. میدان‌های مغناطیسی حاصل از مغز بسیار ضعیف‌تر و در حدود 10^{-12} T هستند و برای اندازه‌گیری آنها باید مغناطیس‌سنج‌های بسیار حساس به کار برد. در حال حاضر، چنین مغناطیس‌سنج‌هایی به نام اسکویید^۱ ساخته شده‌اند. شکل روبه‌رو یک دستگاه اسکویید را نشان می‌دهد که در حال اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تولید شده در مغز است.

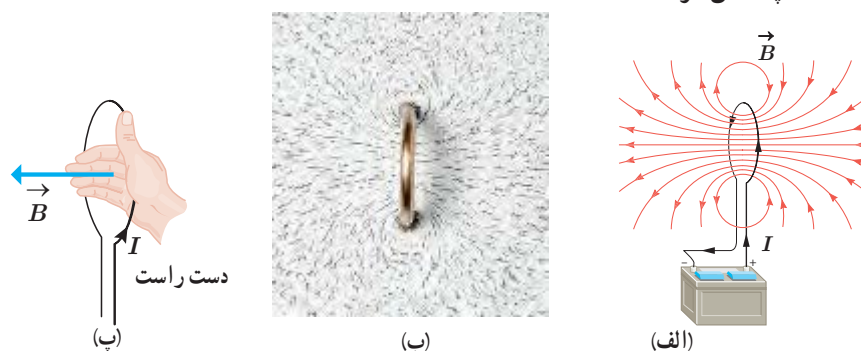
نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان : در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی وجود دارد. همچنین در بخش ۳-۴ با نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان آشنا شدیم. حال فرض کنید برای تولید میدان مغناطیسی به جای آهنربا، از یک سیم حامل جریان استفاده کنیم. اگر سیم حامل جریان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

۱- SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)



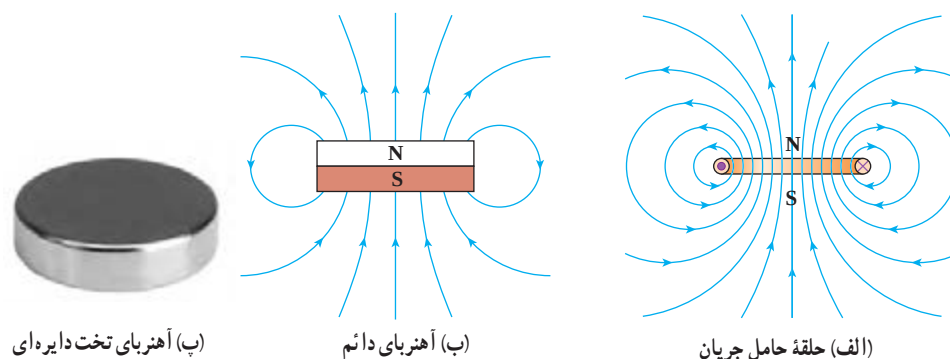
شکل ۳-۱۶ برآیند میدان مغناطیسی حاصل از دو سیم حامل جریان و نیروی بین آنها. (الف) برای جریان‌های همسو، ربایشی است و (ب) برای جریان‌های ناهمسو، رانشی است.

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

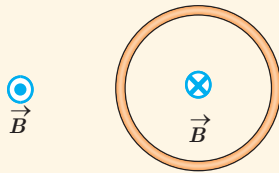


شکل ۳-۱۷ (الف) خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک حلقه حامل جریان. (ب) طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقه حامل جریان با استفاده از براده آهن. (پ) استفاده از قاعده دست راست برای تعیین جهت $\vec{B}$ یک حلقه حامل جریان.

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



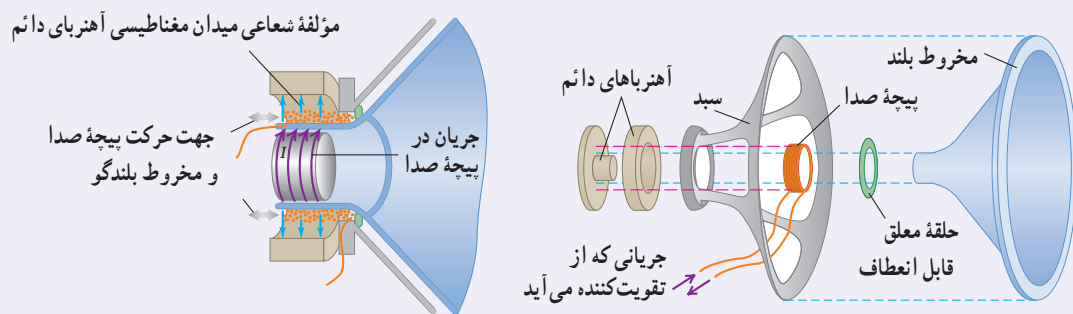
شکل ۳-۱۸ حلقه حامل جریان دو قطب دارد و میدان مغناطیسی آن مانند یک آهنربای دائم تخت دایره‌ای شکل است.



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

خوب است بدانید: طرز کار بلندگو

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



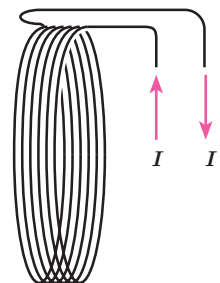
اجزای یک بلندگو. آهنربای دائمی میدان مغناطیسی‌ای تولید می‌کند که نیروهایی بر پیچه صدا وارد می‌کند؛ اگر جریان الکتریکی در پیچه صدا نوسان کند، مخروط بلندگو که متصل به پیچه صداست هم نوسان می‌کند.

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).

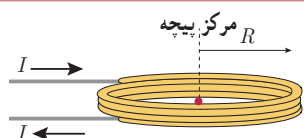
اندازه میدان مغناطیسی در مرکز حلقه‌ای به شعاع R که حامل جریان است از رابطه $B = \mu_0 I / 2R$ به دست می‌آید که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ است. اگر به جای یک تک حلقه، پیچه‌ای شامل N حلقه نزدیک به هم و با شعاع یکسان R داشته باشیم، آنگاه اندازه میدان مغناطیسی در مرکز این پیچه، که معمولاً به آن پیچه مسطح نیز گفته می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2R} \quad (۵-۳)$$

دلیل آنکه برای تولید میدان‌های مغناطیسی قوی به جای تک حلقه از پیچه‌ای از حلقه‌ها استفاده می‌شود همین ضرب N در رابطه ۵-۳ است.



شکل ۳-۱۹ پیچه



از پیچه مسطحی به شعاع $6/28\text{ cm}$ که از 2000 دور سیم نازک درست شده است، جریان 20 mA می‌گذرد (شکل رویه‌رو). 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:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}\text{ T}\cdot\text{m/A})(2000)(20 \times 10^{-3}\text{ A})}{2(6/28 \times 10^{-2}\text{ m})} = 4/0 \times 10^{-4}\text{ T} = 4/0\text{ G}$$

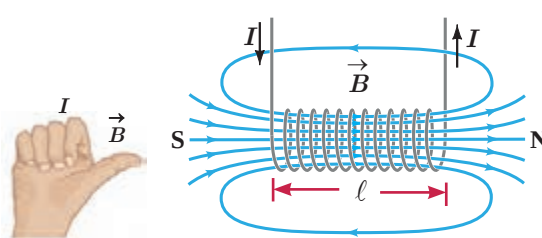
تمرین ۴-۳

اندازه میدان مغناطیسی دور سر انسان حدود $3 \times 10^{-8}\text{ G}$ اندازه‌گیری شده 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 cm (پهنای یک سر نوعی) می‌توان بزرگی جریان الکتریکی 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 ۳-۲ 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 هم‌فاصله‌اند و این، نشانگر یکنواخت بودن میدان مغناطیسی درون سیملوله است. جهت میدان مغناطیسی سیملوله، به کمک قاعده دست راست که در شکل نشان داده شده است تعیین می‌شود (شکل ۳-۲ ب).



(پ)



(ب)

(الف)

شکل ۳-۲ الف) میدان مغناطیسی یک سیملوله حامل جریان. ب) تعیین جهت میدان به کمک قاعده دست راست. پ) طرح خط‌های میدان مغناطیسی سیملوله با استفاده از براده آهن.

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

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\ell} \quad (\text{سیملوله آرمانی}) \quad (۶-۳)$$

در این رابطه، I جریان عبوری، ℓ طول سیملوله و N تعداد دورهای سیملوله است.

مثال ۳-۴

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

پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$\ell = ۱۵\text{cm} = ۰/۱۵\text{m}, \quad N = ۶۰۰, \quad I = ۸۰۰\text{mA} = ۸۰۰ \times ۱۰^{-۳}\text{A}, \quad B = ?$$

به این ترتیب داریم:

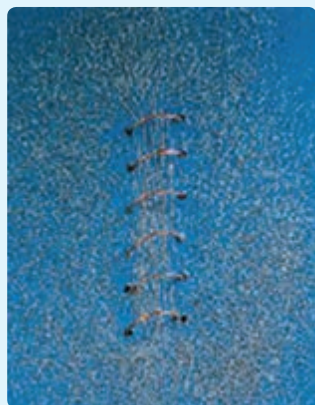
$$B = \frac{\mu_0 NI}{\ell} = \frac{(4\pi \times ۱۰^{-۷}\text{T.m/A})(۶۰۰)(۸۰۰ \times ۱۰^{-۳}\text{A})}{۰/۱۵\text{m}} \approx 4/۰ \times ۱۰^{-۳}\text{T} = ۴۰\text{G}$$

تمرین ۳-۵

سیملوله‌ای آرمانی به طول ۴۰cm چنان طراحی شده است که جریان بیشینه‌ای به شدت $۱/۲\text{A}$ می‌تواند از آن بگذرد. با عبور این جریان از سیملوله، اندازه میدان مغناطیسی درون آن و دور از لبه‌ها ۲۷۰G می‌شود. تعداد دورهای سیملوله چقدر باید باشد؟

فعالیت ۳-۵

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



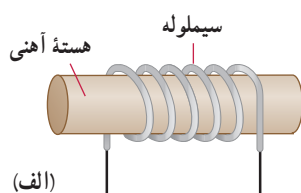
(پ)



(ب)



(الف)



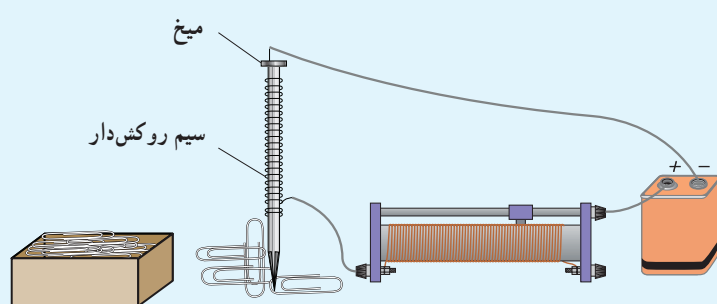
(ب)

شکل ۳-۲۱ (الف) سیملوله با هسته آهنی.

(ب) آهنربای الکتریکی صنعتی

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

فعالیت ۳-۶



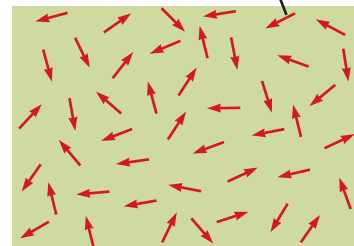
قسمتی از سیم نازک روکش‌داری را دور میخ آهنی نسبتاً بلندی ببجید و مداری مطابق شکل تشکیل دهید. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان عبوری از مدار را تغییر دهید.
(الف) بررسی کنید برای جریان‌های متفاوت، آهنربای الکتریکی چه تعداد گیره آهنی را می‌تواند بلند کند. (ب) اگر تعداد دورهای سیم دو برابر شود، نتیجه کار چه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

۳-۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

رفتار آهنرباهای دائمی، نوارهای مغناطیسی پشت کارت‌های بانکی و دیسک‌های رایانه‌ای به‌طور مستقیم به ویژگی‌های مغناطیسی مواد بستگی دارد. 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 هرکدام از آنها وابسته به یک اتم یا مولکول اند. در ادامه به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می‌پردازیم.

هر ذره سازنده مواد پارامغناطیسی یک آهنربای میکروسکوپی است.



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

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

فعالیت ۳-۷



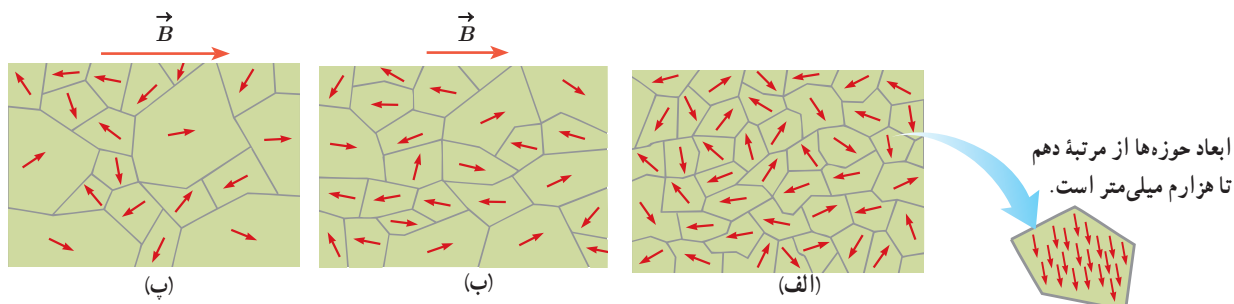
یک لوله آزمایش را تا نزدیکی لبه آن از الکل طبی (اتانول ۹۶ درجه) پر کنید. در لوله را ببندید و آن را به‌طور افقی قرار دهید. مطابق شکل، یک آهنربای نتودیمیم را بالای حباب هوای درون لوله بگیرید و به آرامی آهنربا را حرکت دهید. دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به‌گفت‌وگو بگذارید.

مواد دیامغناطیسی: اتم‌های مواد دیامغناطیسی، نظیر مس، نقره، سرب و بیسموت، به‌طور ذاتی فاقد خاصیت مغناطیسی‌اند. به عبارت دیگر، هیچ یک از اتم‌های این مواد، دارای 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 به‌طور ذاتی دارای دوقطبی مغناطیسی هستند. آهن، نیکل، کبالت و بسیاری از آلیاژهای دارای این عناصر 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 ۳-۲۳ الف نشان داده شده است. درون هر حوزه تقریباً از مرتبه 10^{11} اتم وجود دارد که دوقطبی‌های مغناطیسی وابسته به آنها هم‌جهت‌اند.

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

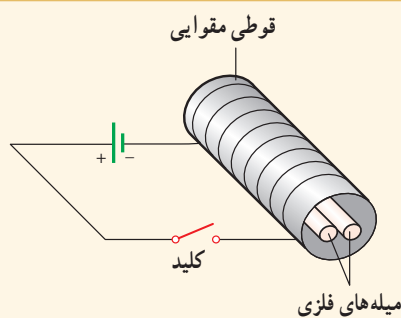
که سمت گیری آنها در راستای میدان نیست، کم می شود. در این فرایند، مرز بین بیشتر حوزه ها جابه جا می شود، و ماده خاصیت آهنربایی پیدا می کند. شکل ۳-۲۳ ب یک ماده فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی ضعیف و شکل ۳-۲۳ پ در یک میدان مغناطیسی خارجی قوی تر نشان می دهد.



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

حوزه های مغناطیسی برخی از مواد فرومغناطیسی، در حضور میدان مغناطیسی خارجی به سهولت تغییر می کند و ماده به سادگی آهنربا می شود و با حذف میدان خارجی نیز، خاصیت آهنربایی خود را به آسانی از دست می دهد. این مواد را مواد **فرومغناطیسی نرم** می نامند. از این مواد در ساخت هسته پیچ ها و سیملوله ها استفاده می شود. مواد فرومغناطیسی نرم برای ساختن آهنرباهای الکتریکی (آهنرباهای غیر دائم) نیز مناسب اند (چرا؟). برخی مواد دیگر مانند فولاد (آهن به اضافه ۲ درصد کربن)، آلیاژهای آهن، کبالت و نیکل به سختی آهنربا می شوند؛ یعنی در حضور میدان مغناطیسی خارجی، حجم حوزه ها در آنها به سختی تغییر می کند. این مواد را مواد **فرومغناطیسی سخت** می نامند. در این مواد، سمت گیری دوقطبی های مغناطیسی حوزه ها پس از حذف میدان خارجی، تا مدت زمان زیادی، تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. به عبارت دیگر، پس از حذف میدان خارجی، ماده فرومغناطیسی سخت، خاصیت آهنربایی خود را تا اندازه قابل توجهی حفظ می کند. به همین دلیل، این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب اند. برای خاصیت آهنربایی هر ماده فرومغناطیسی، مقدار اشباع یا بیشینه ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی به وجود می آید که ماده فرومغناطیسی در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد؛ به طوری که درصد بالایی از دوقطبی های مغناطیسی حوزه ها به موازات یکدیگر هم خط شوند. به عبارت دیگر، حجم حوزه هایی که با میدان مغناطیسی خارجی همسو هستند، به بیشترین مقدار خود برسد.

پرسش ۳-۹



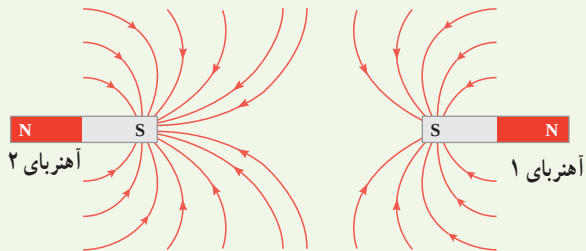
دو میله فلزی بلند مطابق شکل روبه رو درون سیملوله ای که دور یک قوطی مقوایی پیچیده شده است قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از این سیملوله، مشاهده می شود که دو میله از یکدیگر دور می شوند. وقتی کلید باز و جریان در مدار قطع می شود، میله ها به محل اولیه باز می گردند.

(الف) چرا با عبور جریان از پیچ، میله ها از یکدیگر دور می شوند؟

(ب) با دلیل توضیح دهید میله های فلزی از نظر مغناطیسی در کدام دسته قرار می گیرند.

۳ الف) آهنربای میله‌ای با قطب‌های نامشخص در اختیار داریم. دست کم دو روش را برای تعیین قطب‌های این آهنربا بیان کنید.

ب) خط‌های میدان مغناطیسی بین دو آهنربا در شکل زیر نشان داده شده است. اندازه میدان مغناطیسی را در نزدیکی قطب‌های آهنرباها با هم مقایسه کنید.



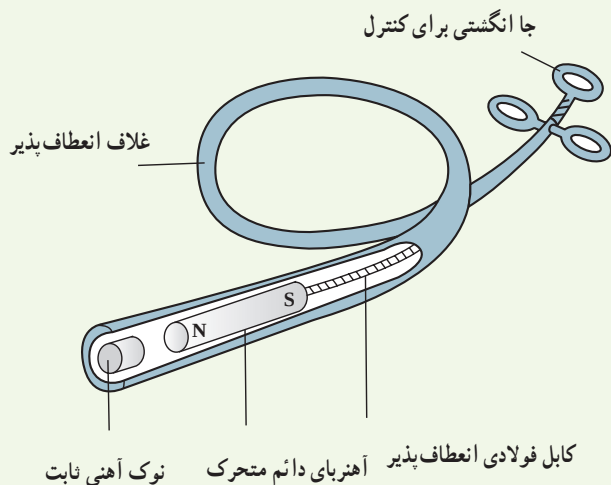
۴ کودکی یک قطعه کوچک آهنی را بلعیده است. پزشک می‌خواهد آن را با دستگاه شکل زیر بیرون بیاورد.

الف) هنگامی که آهنربای دائمی به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟

ب) ساختن نوک ثابت آهن چه مزیتی دارد؟

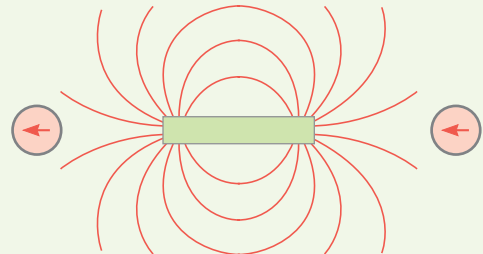
پ) این وسیله را باید به درون گلولی کودک وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد؛ چرا غلاف باید انعطاف پذیر باشد؟

ت) پزشک می‌خواهد یک گیره آهنی کاغذ و یک واشر آلومینیومی را از گلولی کودک بیرون بیاورد؛ کدامیک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟



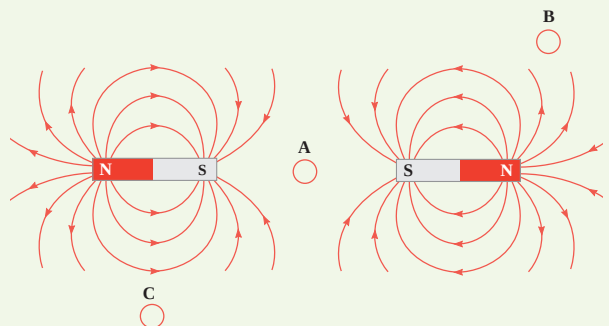
۱-۲ و ۲-۲ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی و میدان مغناطیسی

۱ با توجه به جهت گیری عقربه‌های مغناطیسی در شکل زیر، قطب‌های آهنربای میله‌ای و جهت خط‌های میدان مغناطیسی را تعیین کنید.



۲ شکل زیر، خط‌های میدان مغناطیسی را در نزدیکی دو آهنربای میله‌ای یکسان 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؟

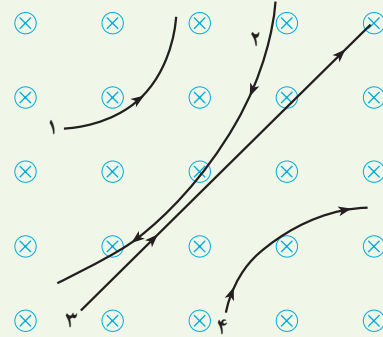


پ) اگر مانند شکل زیر یکی از آهنرباها را بچرخانیم تا جای قطب‌های آن عوض شود، خط‌های میدان مغناطیسی را در ناحیه نقطه چین رسم کنید.

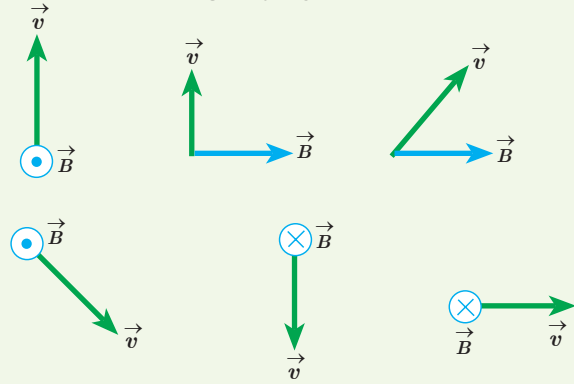


۳-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی

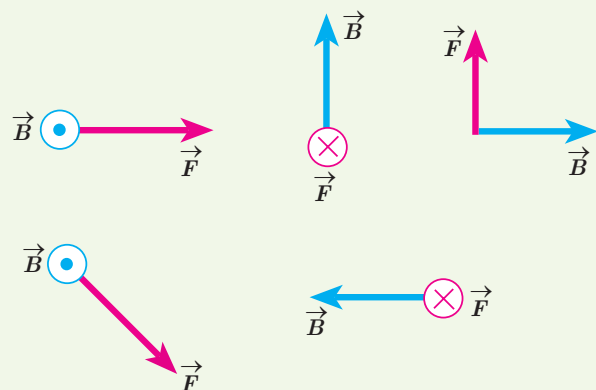
۵ چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون سو مسیلهایی مطابق شکل زیر می‌پیمایند. درباره نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟



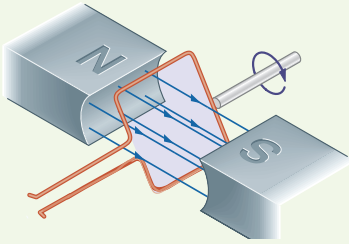
۶ جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هریک از حالت‌های نشان داده در شکل زیر تعیین کنید.



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 هریک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید.



۸ حلقه رسانای مستطیل شکلی که حامل جریان I است، بر اثر نیروی مغناطیسی وارد بر ضلع‌های حامل جریان حلقه، مطابق شکل درون میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد. جهت جریان را در حلقه تعیین کنید.



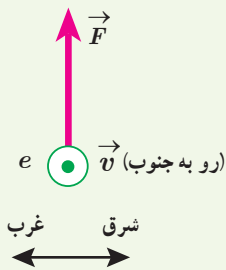
۹ پروتونی با تندی $4/4 \times 10^6 \text{ m/s}$ درون میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازه 18 mT در حرکت است. جهت حرکت پروتون با جهت $\vec{B}$ ، زاویه 60° می‌سازد. (الف) اندازه نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

(ب) اگر تنها این نیرو بر پروتون وارد شود، شتاب پروتون را حساب کنید. (بار الکتریکی پروتون $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ و جرم آن $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ در نظر بگیرید).

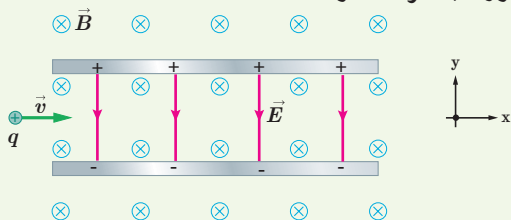
۱۰ الکترونی با تندی $2/4 \times 10^5 \text{ m/s}$ درون میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. اندازه نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند.

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

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

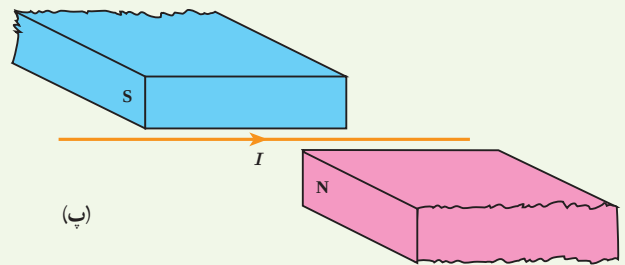
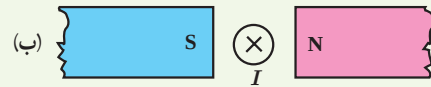
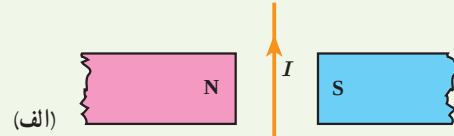


۱۱ ذره باردار مثبتی با جرم ناچیز و با سرعت $\vec{v}$ در امتداد محور x وارد فضایی می‌شود که میدان‌های یکنواخت $\vec{B}$ و $\vec{E}$ وجود دارد (شکل زیر). اندازه این میدان‌ها برابر $E = 45 \text{ N/C}$ و $B = 0.18 \text{ T}$ است. تندی ذره چقدر باشد تا در همان امتداد محور x به حرکت خود ادامه دهد؟

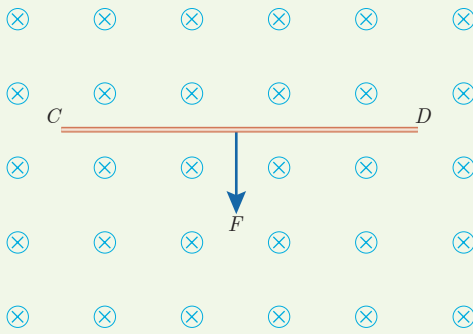


۴-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان

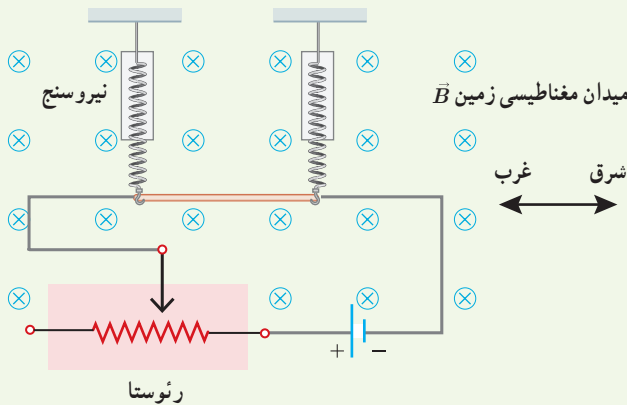
۱۲ جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های الف، ب و پ با استفاده از قاعدهٔ دست راست بیابید.



مقدار جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.

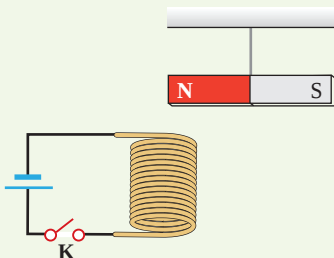


۱۵ یک سیم حامل جریان $1/6$ آمپر مطابق شکل زیر با دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به‌طور افقی و در راستای غرب - شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را یکنواخت، به‌طرف شمال و اندازهٔ 5 mT بگیرد. الف) اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را پیدا کنید. ب) اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور کند؟ جرم هر متر از طول این سیم 8 گرم است ($g = 9.8 \text{ N/kg}$).

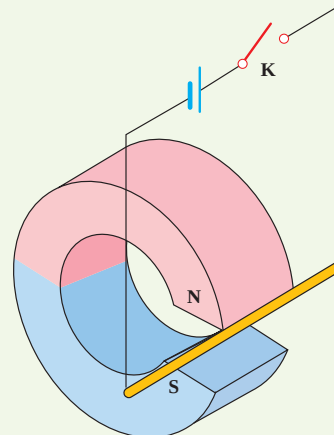


۵-۳ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

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.

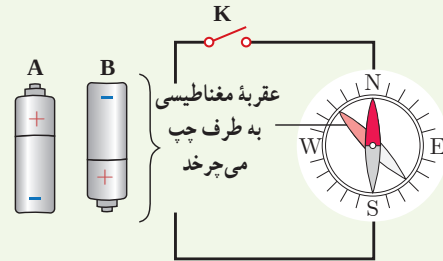


۱۳ یک میلهٔ رسانا به پایانه‌های یک باتری وصل شده و مطابق شکل در فضای بین قطب‌های یک آهنربای C شکل آویزان شده است و می‌تواند آزادانه نوسان کند. با بستن کلید K، چه اتفاقی برای میلهٔ رسانا رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.

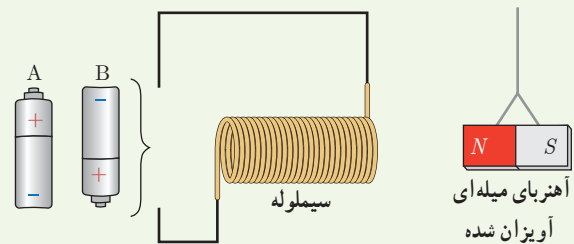


۱۴ سیم رسانای CD به طول 2 m مطابق شکل زیر عمود بر میدان مغناطیسی درون‌سو با اندازهٔ 5 T قرار گرفته است؛ اگر اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم برابر 1 N باشد، جهت و

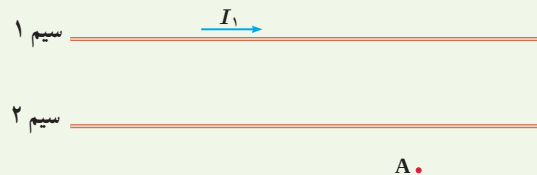
۱۷ کدام باتری را در مدار شکل زیر قرار دهیم تا پس از بستن کلید K، عقربه قطب‌نما که روی سیم قرار دارد، در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت شروع به چرخش کند؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.



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.

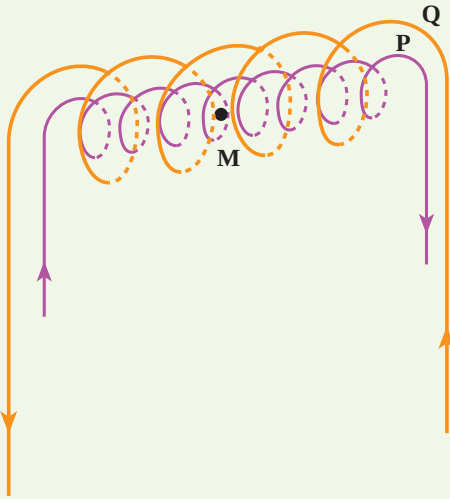


۱۹ شکل زیر، دو سیم موازی و بلند حامل جریان را نشان می‌دهد. اگر میدان مغناطیسی برآیند حاصل از این سیم‌ها در نقطه A صفر باشد، جهت جریان آن را در سیم ۲ پیدا کنید.



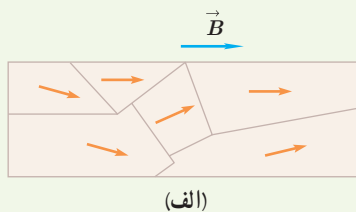
۲۰ سیم‌لوله‌ای شامل ۲۵۰ حلقه است که دور یک لوله پلاستیکی توخالی به طول ۱۴/۰ متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیم‌لوله ۸/۰ A باشد، اندازه میدان مغناطیسی درون سیم‌لوله را حساب کنید.

۲۱ در شکل زیر دو سیم‌لوله P و Q هم محورند و طول برابر دارند. تعداد دور سیم‌لوله P برابر ۲۰۰ و تعداد دور سیم‌لوله Q برابر ۳۰۰ است. اگر جریان ۱ A از سیم‌لوله Q عبور کند، از سیم‌لوله P چه جریانی باید عبور کند تا برآیند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیم‌لوله در نقطه M (روی محور دو سیم‌لوله) صفر شود؟



۳-۶ 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.

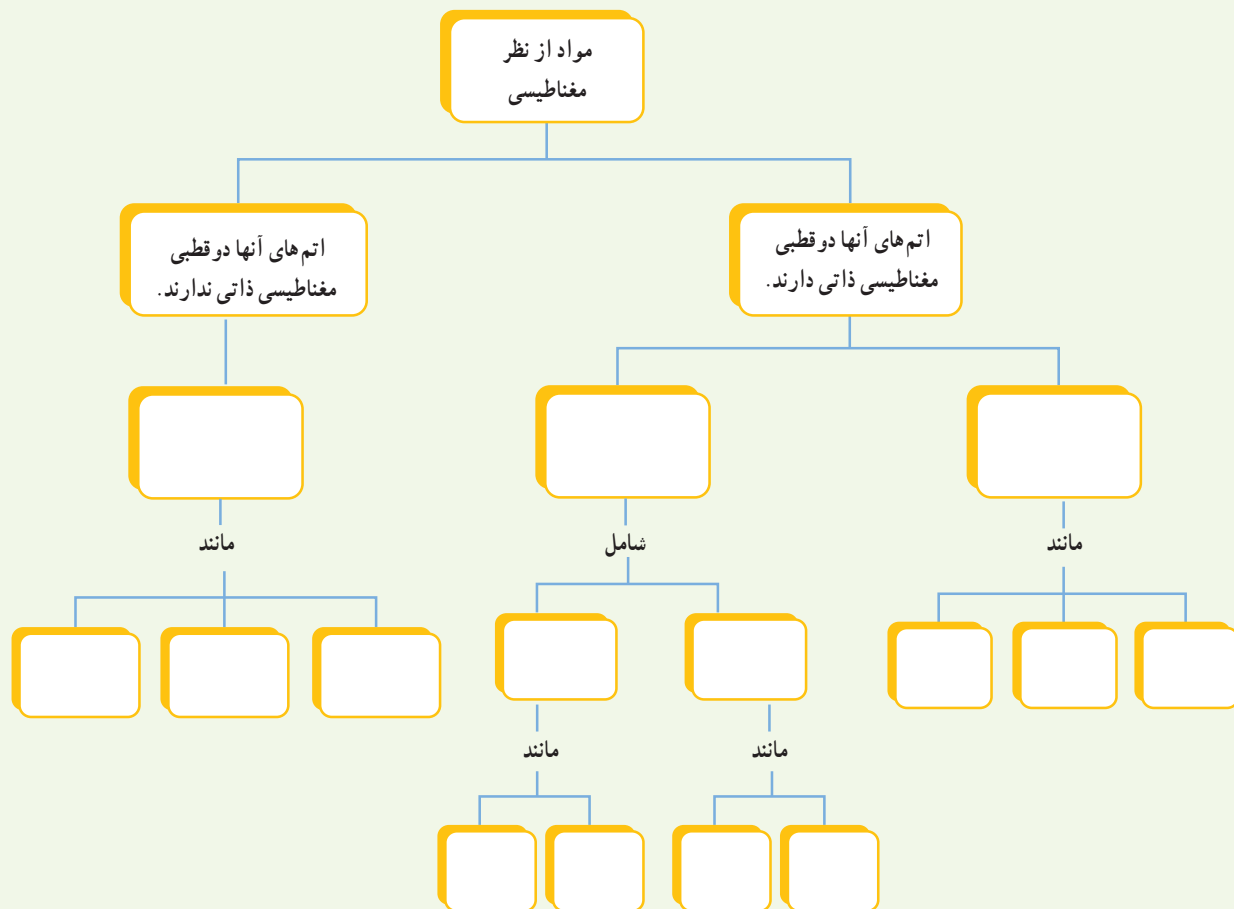


(الف)



(ب)

۲۳ با توجه به آنچه در بخش ویژگی‌های مغناطیسی مواد دیدید، نقشه مفهومی زیر را کامل کنید.



القای الکترومغناطیسی و جریان متناوب



وقتی کارت بانکی درون دستگاه کارتخوان «کشیده» می‌شود، اطلاعات رمزینده شده در نوار مغناطیسی پشت کارت، به مرکز اطلاعات بانک ارسال می‌شود. چرا به جای ثابت نگه داشتن کارت در شکاف دستگاه کارتخوان، 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.

۱-۴ پدیده القای الکترومغناطیسی

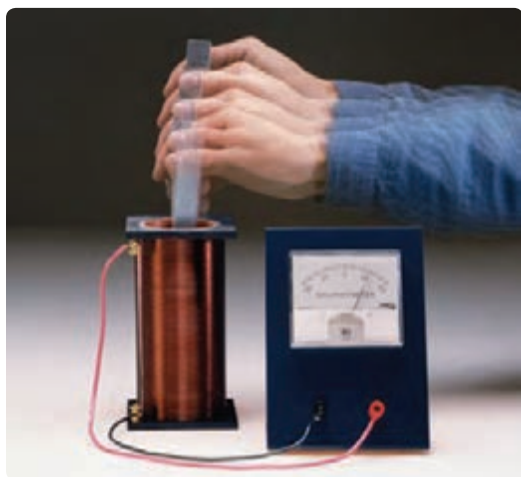
در این بخش، به بررسی القای نیروی محرکه الکتریکی در یک مدار بسته خواهیم پرداخت. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده بیشتر آشنا می‌شوید.

آزمایش ۱-۴

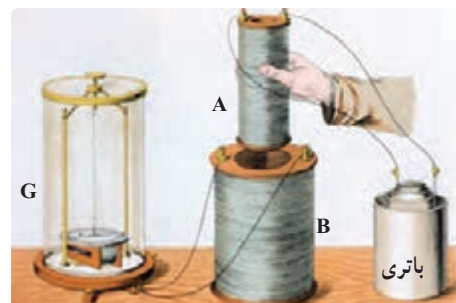
هدف: بررسی پدیده القای الکترومغناطیسی

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

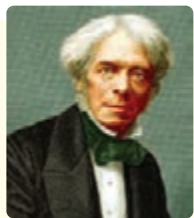
- دو سر سیملوله را به گالوانومتر ببندید.
- یکی از قطب‌های آهنربا را وارد سیملوله کنید (شکل روبه‌رو).
- مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، یادداشت کنید.
- اکنون آهنربا را از سیملوله خارج کنید. مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، دوباره یادداشت کنید.
- مراحل بالا را برای قطب دیگر آهنربا تکرار کنید.
-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



در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فاراده دانشمند انگلیسی و تقریباً هم‌زمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۱-۴ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ درست مانند وقتی که در مدار، باتری وجود دارد (شکل ۱-۴). این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند.



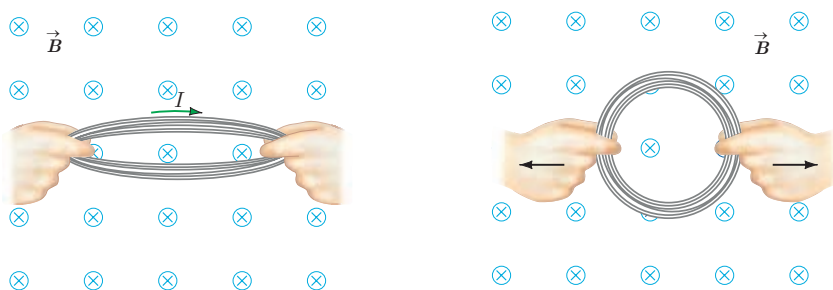
شکل ۱-۴ فاراده برای پی بردن به پدیده القای الکترومغناطیسی، به جای آهنربای دائمی، از آهنربای الکتریکی (سیملوله A که به باتری وصل شده است) استفاده کرد. فاراده مشاهده کرد که با عبور آهنربا از درون سیملوله B و تغییر میدان مغناطیسی در محل این سیملوله، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شود.



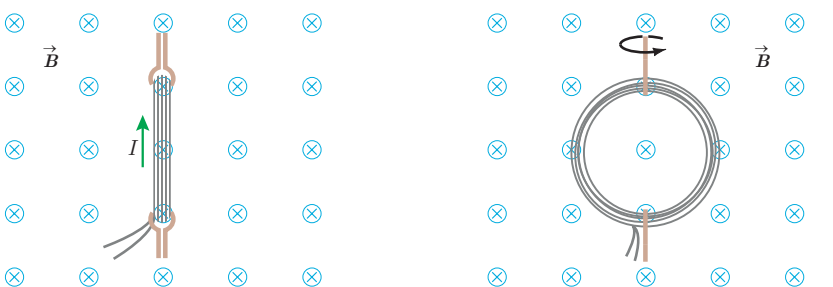
مایکل فاراده (۱۸۶۷-۱۷۹۱)

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

پیش از این دیدیم که با تغییر اندازه میدان در محل سیم‌لوله، جریان در آن القا می‌شود. به جز این روش، به روش‌های دیگری نیز می‌توان در پیچه یا سیم‌لوله، جریان الکتریکی القا کرد. اگر مساحت پیچه‌ای انعطاف‌پذیر را درون میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ تغییر دهیم (شکل ۲-۴) یا پیچه‌ای را درون میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ بچرخانیم (شکل ۳-۴)، مشاهده می‌شود که در هنگام انجام این کارها، جریانی در پیچه القا می‌شود.



شکل ۲-۴ تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی $\vec{B}$ ، جریانی در پیچه القا می‌کند.



شکل ۳-۴ 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.

۲-۴ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

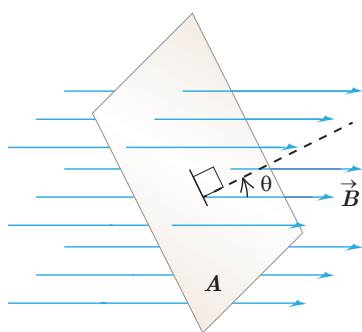
پیش از این دیدیم که به دلایلی مانند تغییر میدان مغناطیسی در محل یک پیچه، تغییر مساحت پیچه در حضور میدان مغناطیسی یا چرخش پیچه درون میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در آن القا می‌شود. عامل اساسی و مشترک در ایجاد جریان القایی در همه این آزمایش‌ها، **تغییر شار مغناطیسی** عبوری از پیچه است.

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

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۱-۴)$$

همان‌طور که در شکل ۴-۴ دیده می‌شود: θ 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، وِبر (Wb) است که با توجه به رابطه ۱-۴ داریم: $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$



شکل ۴-۴ نیم خط عمود بر سطح، با میدان یکنواخت $\vec{B}$ زاویه θ می‌سازد.

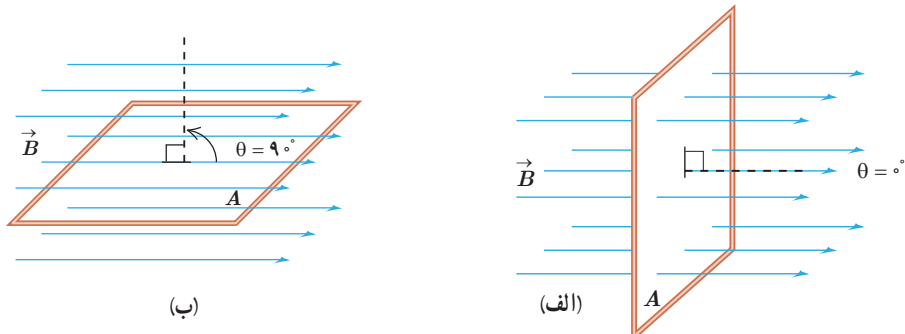
توجه: همواره دو جهت برای رسم نیم خط عمود بر یک سطح معین وجود دارد. علامت شار مغناطیسی عبوری از این سطح نیز به انتخاب این جهت بستگی دارد. برای مثال، در شکل ۴-۴، نیم خط عمود را در طرفی از سطح رسم کرده ایم که زاویه بین آن و جهت میدان $\vec{B}$ کمتر از 90° است و در نتیجه شار عبوری از سطح مثبت می شود. اگر نیم خط عمود را در طرف دیگر سطح انتخاب کنیم، در این صورت، زاویه آن با جهت میدان $\vec{B}$ بیشتر از 90° خواهد شد و شار عبوری از سطح منفی می شود. هر دو انتخاب به یک اندازه مفیدند، ولی در حل یک مسئله، همواره باید یکی را انتخاب کنیم و تا پایان آن را تغییر ندهیم. ■

مثال ۴-۱

الف) مطابق شکل الف، سطح حلقه رسانایی، به شکل مربع با ضلع 20 cm ، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی 250 G قرار دارد. شار عبوری از این حلقه را به دست آورید.

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

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



پاسخ: الف) وقتی مطابق شکل الف، سطح حلقه عمود بر خط های میدان مغناطیسی قرار می گیرد، زاویه بین میدان $\vec{B}$ و نیم خط عمود بر سطح حلقه برابر صفر می شود. به این ترتیب، شار عبوری از سطح حلقه برابر است با:

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

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

ب) وقتی مطابق شکل ب، حلقه می چرخد و سطح آن موازی با خط های میدان مغناطیسی قرار می گیرد، زاویه بین میدان $\vec{B}$ و نیم خط عمود بر سطح حلقه برابر 90° می شود. از آنجا که $\cos 90^\circ = 0$ ، در این شرایط، هیچ شاری از سطح حلقه عبور نمی کند.

پ) همان طور که دیدید شار عبوری از سطح حلقه در وضعیت شکل الف و وضعیت شکل ب، به ترتیب، برابر $\Phi_1 = 1\text{ mWb}$ و $\Phi_2 = 0$ است. به این ترتیب، تغییر شار عبوری از سطح حلقه برابر $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -1\text{ mWb}$ می شود. علامت منفی نشان می دهد در حین چرخش حلقه از وضعیت شکل الف به وضعیت شکل ب، شار مغناطیسی عبوری از سطح آن کاهش یافته است.

ت) با توجه به نتیجه قسمت پ، آهنگ تغییر شار $(\Delta\Phi/\Delta t)$ برابر است با:

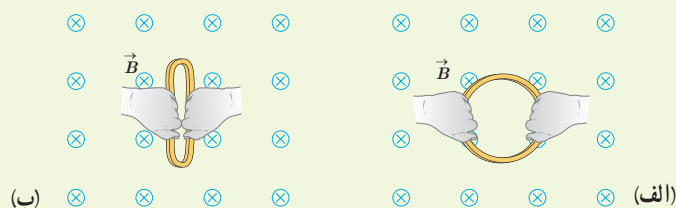
$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1 \times 10^{-3}\text{ Wb}}{0.1\text{ s}} = -0.01\text{ Wb/s}$$

تمرین ۴-۱

الف) حلقه‌ای به مساحت 25cm^2 درون میدان مغناطیسی یکنواخت درون سویی به اندازه $T = 30^\circ$ 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°cm^2 برسانیم، شار مغناطیسی عبوری از حلقه را در این وضعیت به دست آورید.

پ) اگر این تغییر شار در بازه زمانی $\Delta t = 2^\circ\text{s}$ رخ داده باشد، آهنگ تغییر شار $(\Delta\Phi/\Delta t)$ را پیدا کنید.



پرسش ۴-۱

کدام یک از یکاهای زیر معادل یکای وبر بر ثانیه (Wb/s) است؟

Ω ☐

A ☐

V ☐

V/A ☐

اکنون که با تعریف و مفهوم شار مغناطیسی آشنا شدید دوباره نگاهی می‌کنیم به پدیده القای الکترومغناطیسی که در بخش قبل بررسی کردیم. همان‌طور که گفتیم عامل مشترک در تمامی پدیده‌هایی که منجر به تولید جریان القایی در مدار می‌شود، تغییر شار مغناطیسی عبوری از پیچه یا سیملوله است. بنابر قانون فاراده، هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است؛ یعنی هرچه آهنگ تغییر شار مغناطیسی بیشتر باشد، نیروی محرکه القایی و در نتیجه جریان القایی تولید شده در مدار بیشتر خواهد بود. مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴ هرچه حرکتی که سبب تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربه گالوانومتر بیشتر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان القایی بزرگ‌تری به وجود آمده است.

قانون فاراده برای پیچه یا سیملوله‌ای که از N دور مشابه تشکیل شده باشد با رابطه زیر بیان می‌شود:

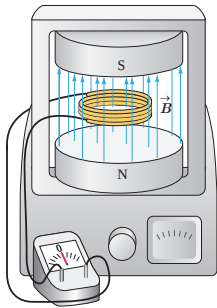
$$\mathcal{E}_{av} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2-4)$$

در این رابطه $\mathcal{E}_{av}$ نیروی محرکه القایی متوسط بر حسب ولت و $\Delta\Phi/\Delta t$ آهنگ تغییر شار مغناطیسی بر حسب وبر بر ثانیه (Wb/s) است. اگر مقاومت پیچه یا سیملوله برابر R باشد، جریان القایی متوسط در آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{av} = \frac{\mathcal{E}_{av}}{R} \quad (3-4)$$

همان‌طور که از رابطه ۳-۴ دیده می‌شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار مغناطیسی تغییر می‌کند، بیشتر باشد، جریان کوچک‌تری در آن القا می‌شود.

مثال ۴-۲



پیچه‌ای شامل ۲۰۰ دور که مساحت هر حلقه آن ۲۵cm^2 است، مطابق شکل رویه‌رو بین قطب‌های یک آهنربای الکتریکی قرار گرفته است که میدان مغناطیسی یکنواخت تولید می‌کند. خط‌های میدان بر سطح پیچه عمودند. اگر اندازه میدان در بازه زمانی $۲/۰\text{ms}$ از ۱۸T به ۲۲T افزایش یابد،

(الف) نیروی محرکه القایی متوسط ایجاد شده در پیچه چقدر است؟

(ب) اگر مقاومت پیچه ۱۰Ω باشد، جریان القایی متوسط که از پیچه می‌گذرد چقدر است؟

پاسخ: (الف) نیم خط عمود بر سطح حلقه‌های پیچه را همسو با $\vec{B}$ می‌گیریم. با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$N = 200 \quad A = 25\text{cm}^2 \quad \theta = 0^\circ \quad \Delta t = 2/0\text{ms}$$

$$B_1 = 18\text{T} \quad B_2 = 22\text{T} \quad \mathcal{E}_{av} = ?$$

$$\Phi_1 = B_1 A \cos\theta = (18\text{T})(2/5 \times 10^{-2}\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 4/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

$$\Phi_2 = B_2 A \cos\theta = (22\text{T})(2/5 \times 10^{-2}\text{m}^2)(\cos 0^\circ) = 5/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

به این ترتیب، تغییر شار مغناطیسی برابر است با:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (5/5 \times 10^{-4}\text{Wb}) - (4/5 \times 10^{-4}\text{Wb}) = 1/5 \times 10^{-4}\text{Wb}$$

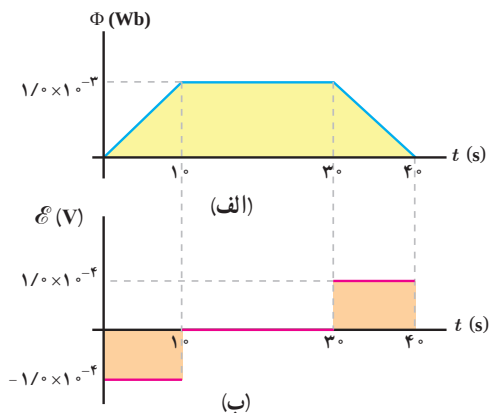
با قرار دادن این مقدار و داده‌های بالا در رابطه ۴-۲ داریم:

$$\mathcal{E}_{av} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(200) \frac{1/5 \times 10^{-4}\text{Wb}}{2/0 \times 10^{-3}\text{s}} = -10\text{V}$$

(ب) با توجه به رابطه ۴-۳، جریان القایی متوسط در پیچه برابر است با:

$$I_{av} = \frac{\mathcal{E}_{av}}{R} = \frac{-10\text{V}}{10\Omega} = -1\text{A}$$

مثال ۴-۳



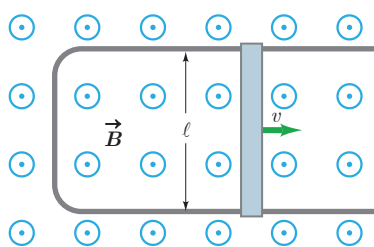
تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در نمودار شکل الف نشان داده شده است. نمودار نیروی محرکه القایی در حلقه را برحسب زمان در هریک از بازه‌های زمانی $(0, 1\text{s})$ ، $(1, 3\text{s})$ و $(3, 4\text{s})$ رسم کنید.

پاسخ: همان‌طور که در نمودار شار مغناطیسی برحسب زمان دیده می‌شود در بازه زمانی صفر تا 1s 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 محرکه القایی با نیروی محرکه القایی متوسط برابر است:

$$\mathcal{E}_{av} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(1) \frac{(1/5 \times 10^{-3}\text{Wb} - 0)}{1\text{s}} = -1/5 \times 10^{-4}\text{V}$$

در بازه زمانی 1s تا 3s شار ثابت مانده است. در نتیجه نیروی محرکه القایی در تمامی لحظات این بازه زمانی برابر صفر است. در بازه زمانی 3s تا 4s شار به صورت خطی کاهش یافته و سرانجام صفر شده است. بنابراین شبیه آنچه در مورد بازه زمانی صفر تا 1s گفتیم، نیروی محرکه القایی در تمام لحظات این بازه با مقدار متوسط نیروی محرکه در این بازه زمانی برابر و مساوی $1/5 \times 10^{-4}\text{V}$ است. نمودار نیروی محرکه القایی برحسب زمان در شکل ب رسم شده است.

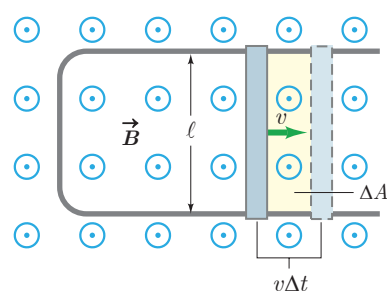
مثال ۴-۴



شکل روبه‌رو، رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ به اندازه 0.18 T نشان می‌دهد. میدان $\vec{B}$ عمود بر صفحه شکل و رو به بیرون است. میله‌ای فلزی (سیم لغزنده) به طول $\ell = 20\text{ cm}$ بین دو بازوی رسانا قرار دارد و مداری را تشکیل می‌دهد. میله را با تندی ثابت $v = 20\text{ m/s}$ به طرف راست حرکت می‌دهیم. بزرگی نیروی محرکه القایی متوسط را پیدا کنید.

پاسخ: با حرکت میله فلزی و به دلیل افزایش سطح حلقه، شار مغناطیسی تغییر می‌کند. میدان مغناطیسی در سطح حلقه یکنواخت است، پس شار مغناطیسی را از رابطه $\Phi = BA \cos \theta$ محاسبه می‌کنیم. نیم خط عمود بر سطح حلقه را همسو با $\vec{B}$ می‌گیریم. بنابراین زاویه نیم خط عمود با میدان $\vec{B}$ صفر است ($\theta = 0^\circ$) و در نتیجه $\Phi = BA$. از قانون القای فارادی داریم:

$$\mathcal{E}_{av} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = -B \frac{\Delta A}{\Delta t}$$



برای محاسبه $\Delta A / \Delta t$ ، توجه کنید که میله فلزی لغزنده در مدت Δt مسافت $v \Delta t$ را طی می‌کند (شکل روبه‌رو) و سطح حلقه به مقدار $\Delta A = \ell v \Delta t$ افزایش می‌یابد. به این ترتیب، نیروی محرکه القا شده برابر است با:

$$\mathcal{E}_{av} = -B \frac{\ell v \Delta t}{\Delta t} = -B \ell v$$

با قرار دادن مقادیر داده شده، در رابطه بالا، داریم:

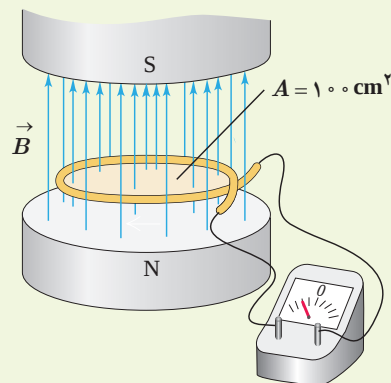
$$\mathcal{E}_{av} = -(0.18\text{ T})(20 \times 10^{-2}\text{ m})(20\text{ m/s}) = -0.72\text{ V}$$

و بزرگی آن برابر است با:

$$|\mathcal{E}_{av}| = 0.72\text{ V}$$

توجه کنید که به علت ثابت بودن تندی میله لغزنده، نیروی محرکه القایی ثابت است. در این حالت، رسانای U شکل با سیم لغزنده یک مولد جریان مستقیم است.

تمرین ۴-۲



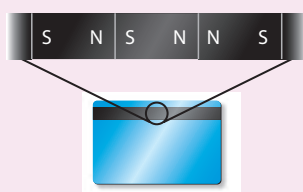
میدان مغناطیسی بین قطب‌های آهنربای الکتریکی شکل روبه‌رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می‌کند و در مدت 0.45 s از 0.2 T ، رو به بالا، به 0.17 T ، رو به پایین می‌رسد. در این مدت، الف) نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را به دست آورید. ب) اگر مقاومت حلقه $10\ \Omega$ باشد، جریان القایی متوسط در حلقه را پیدا کنید.



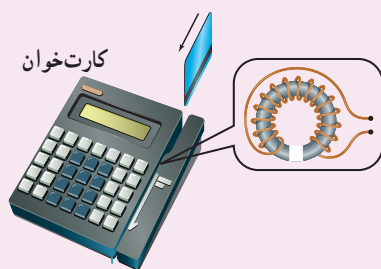
تندی سنج دوچرخه‌های مسابقه‌ای شامل یک آهنربای کوچک و یک پیچه است. آهنربا به یکی از پره‌های چرخ جلو و پیچه به دو شاخ فرمان متصل است (شکل روبه‌رو). دو سر پیچه با سیم‌های رسانا به نمایشگر تندی سنج (که در واقع نوعی رایانه کوچک است) وصل شده است. به نظر شما تندی سنج دوچرخه چگونه کار می‌کند؟ این موضوع را در گروه خود به گفت‌وگو بگذارید و نتیجه را به کلاس درس ارائه دهید.

فناوری و کاربرد

کارت‌های اعتباری و دستگاه‌های کارت خوان



(الف) داده‌ها را به صورت صفر و یک در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می‌کنند.

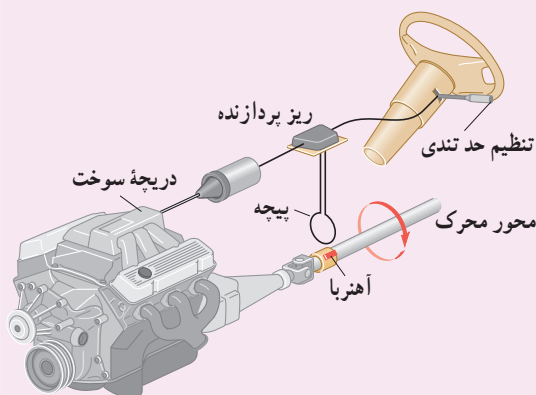


(ب) کشیدن کارت، جریان اندکی در پیچه دستگاه کارت خوان القا می‌کند.

نوار مغناطیسی پشت کارت‌های اعتباری حاوی تعداد بسیار زیادی ذره فرومغناطیسی است که نوعی چسب خاص آنها را به هم متصل می‌کند. داده‌ها را که به صورت دودویی، یا صفر و یک به رمز درآورده‌اند، در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می‌کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری درون دستگاه کارت خوان کشیده می‌شود، میدان مغناطیسی ناشی از نوار مغناطیسی، روی پیچه قرار داده شده در دستگاه کارت خوان اثر می‌گذارد و جریان اندکی را در پیچه القا می‌کند (شکل ب). این جریان بسیار کوچک توسط دستگاه دیگری تقویت و داده‌های ذخیره شده در نوار مغناطیسی پشت کارت، رمزگشایی می‌شود. پس از رمزگشایی داده‌ها، دستور مورد نظر انجام می‌شود.

سامانه تنظیم حد تندی خودرو^۱

در بسیاری از خودروهای امروزی، سامانه‌ای وجود دارد که به کمک آن می‌توان 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 می‌دهد. اساس کار این سامانه، جریان القایی است. وقتی محور محرک خودرو می‌چرخد آهنربایی که روی آن قرار دارد، شار مغناطیسی متغیری را از پیچه می‌گذراند و جریانی در آن القا می‌کند.



ریزپردازنده (مغز رایانه) تعداد تپ‌های جریان^۲ را در هر ثانیه می‌شمارد و به این روش، تندی خودرو را اندازه می‌گیرد. سپس با مقایسه تندی اندازه‌گیری شده با تندی تنظیم شده توسط راننده، سوخت مورد نیاز را به موتور تزریق می‌کند. تا هنگامی که راننده ترمز نگیرد، حرکت خودرو با تندی تعیین شده، توسط این سامانه تنظیم می‌شود.

خوب است بدانید: معاینه مغز با نیروهای محرکه القایی



برانگیزش (تحریک) مغناطیسی فرا جمجمه‌ای (TMS)^۱ 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 پیچ قرار دارد. پزشک با مشاهده واکنش مغز (مثلاً اینکه کدام عضله‌ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می‌کنند) می‌تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بیازماید.

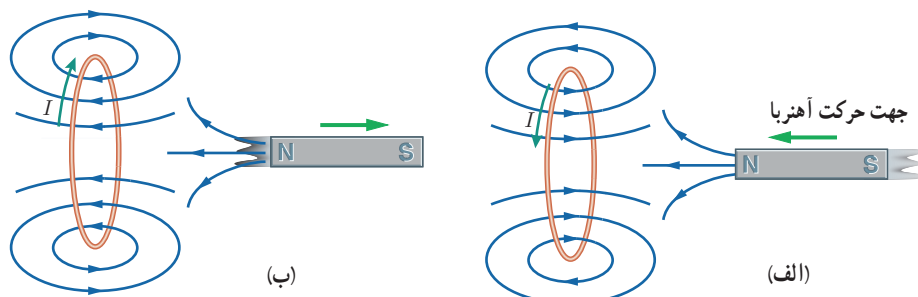
۳-۴ قانون لنز

مدت کوتاهی پس از آنکه فاراده قانون القای الکترومغناطیسی را ارائه کرد، هاینریش لنز، دانشمند روس تبار، در سال ۱۸۳۴ میلادی روشی را برای تعیین جهت جریان القایی در یک پیچ 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 پیچ در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن، با عامل به وجود آورنده جریان القایی، یعنی تغییر شار مغناطیسی، مخالفت می‌کند.

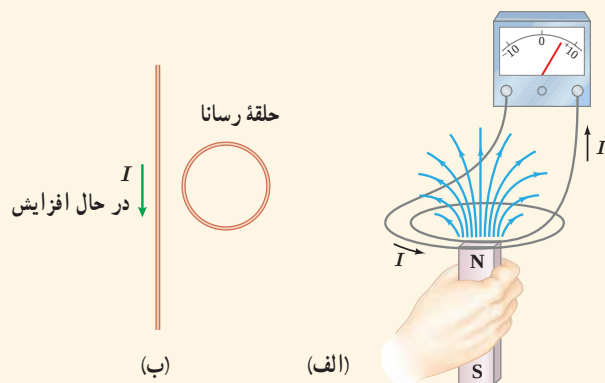
علامت منفی در رابطه ۴-۲ نشان دهنده همین مخالفت است. توضیح دقیق‌تر این مطلب فراتر از سطح این کتاب است. در اینجا تنها به ذکر مثال‌هایی از چگونگی استفاده از قانون لنز برای تعیین جهت جریان القایی اکتفا می‌کنیم.

شکل ۴-۵ الف، آهنربایی را نشان می‌دهد که قطب N آن در حال نزدیک شدن به یک حلقه رساناست. در این وضعیت اندازه B در محل حلقه افزایش می‌یابد و در نتیجه شار گذرنده از حلقه زیاد می‌شود. بنا به قانون لنز، جهت جریان القایی ایجاد شده در حلقه چنان است که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مخالفت کند. بنابراین، میدان مغناطیسی حلقه در خلاف سوی میدان مغناطیسی آهنربا می‌شود. با توجه به قاعده دست راست و از روی جهت میدان مغناطیسی حلقه، جهت جریان در حلقه تعیین می‌شود. همچنین اگر مطابق شکل ۴-۵ ب، قطب N آهنربا را از حلقه رسانا دور کنیم، جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، همسو با میدان آهنربا می‌شود و به این ترتیب با کاهش شار عبوری از حلقه، مخالفت می‌کند.



شکل ۴-۵ الف وقتی آهنربا به حلقه رسانا نزدیک می‌شود جریان در جهتی در حلقه القا می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند. ب) با دور شدن آهنربا از حلقه رسانا، جریان در جهتی در حلقه القا می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با کاهش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند.

^۱ Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)



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 حلقه رسانای مجاور سیم تعیین کنید.

خوب است بدانید: اثر دیامغناطیس

چرخش هر الکترون به دور هسته اتم را می‌توان به صورت یک حلقه میکروسکوپی جریان مدل‌سازی کرد. هرگاه ماده‌ای در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، شار مغناطیسی گذرنده از هر یک از این حلقه‌های میکروسکوپی افزایش می‌یابد و در نتیجه بنابر قانون لنز، در این حلقه‌ها، یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیس خارجی القا می‌شود. 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، فاقد 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.

۴-۴ القاگرها

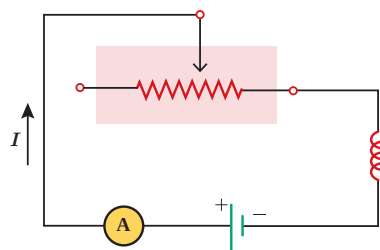
در فصل ۲ دیدیم که در فضای بین صفحه‌های یک خازن باردار، میدان الکتریکی ایجاد می‌شود و انرژی الکتریکی در این میدان ذخیره می‌شود. به همین ترتیب، می‌توان از القاگر (سیم پیچ) برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیره انرژی در این میدان استفاده کرد. القاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای الکترونیکی است.

شکل ۴-۶ تصویر چند القاگر را در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت نشان می‌دهد. نماد مداری القاگر، ———— است.



شکل ۴-۶ تصویری از چند القاگر در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت

خود – القاوری : مداری را مطابق شکل ۴-۷ در نظر بگیرید. این مدار شامل منبع نیروی محرکه، رثوستا، آمپرسنج و القاگری است که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. با تغییر مقاومت رثوستا، جریان در مدار تغییر می‌کند. تغییر جریان در مدار، سبب تغییر میدان مغناطیسی القاگر می‌شود و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از آن نیز تغییر می‌کند. این فرایند سبب القای نیروی محرکه‌ای در القاگر می‌شود که بنابر قانون لنز با تغییر جریان عبوری از آن مخالفت می‌کند. این پدیده که می‌تواند در هر القاگری (از قبیل پیچه یا سیملوله) رخ دهد اثر **خود – القاوری** نامیده می‌شود.



شکل ۴-۷ مداری ساده شامل رثوستا، القاگر، باتری و آمپرسنج

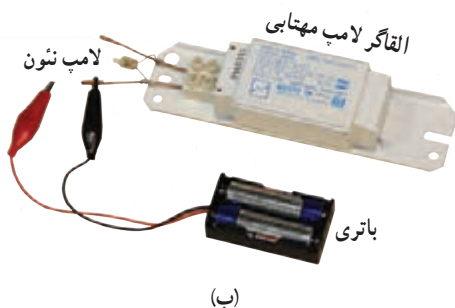
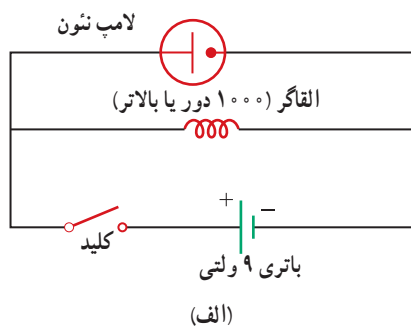
هدف: بررسی اثر خود – القاوری

وسيله‌های مورد نیاز: لامپ نئون (لامپ فازمتری)، القاگر (۱۰۰۰ دور یا بالاتر) ۹ ولتی، سیم رابط، کلید دور یا بالاتر، باتری قلمی (۲ عدد) یا باتری ۹ ولتی، سیم رابط، کلید

شرح آزمایش:

- مداري مطابق شکل الف ببندید.
- کلید را وصل کنید. آیا لامپ روشن است؟ اینک کلید را قطع کنید. در لحظه قطع کردن کلید چه چیزی مشاهده می‌کنید؟ دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به گفت‌وگو بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

توجه: می‌توانید مطابق شکل ب، به جای القاگر از القاگر لامپ‌های مهتابی (که به اشتباه ترانس نامیده می‌شود) نیز استفاده کنید.



خوب است بدانید: کاربرد القاگرها در سامانه‌های انتقال برق

برخورد آذرخش به بخشی از یک سامانه انتقال توان الکتریکی موجب افزایش ناگهانی ولتاژ می‌شود که می‌تواند به اجزای سامانه و هر چیز دیگری که به آن وصل باشد (برای مثال، وسيله‌های 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!

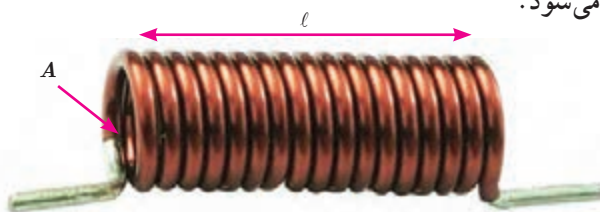


جوزف هنری (۱۸۷۸-۱۷۹۷): یکی از فیزیک‌دانان تجربی قرن نوزدهم است که در آمریکا به دنیا آمد و کار خود را با آموزش علوم در یک مدرسه روستایی آغاز کرد. سپس به تحصیل در طب و مهندسی علاقه‌مند شد و سرانجام به فیزیک و ریاضیات روی آورد. هنری در سال ۱۸۳۱، هم‌زمان و مستقل از فاراده، موفق به کشف پدیده القای الکترومغناطیسی شد. وی همچنین توانست نوعی موتور الکترومغناطیسی و یک تلگراف جدید و کارآمد اختراع کند. یکای SI ضریب القاوری به احترام یک عمر فعالیت‌های علمی وی، هنری (H) انتخاب شده است.

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 ℓ ، 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 ($\Omega \cdot s$) است که به احترام جوزف هنری، هنری نامیده و با نماد H نشان داده می‌شود.



شکل ۴-۸ سیم‌لوله‌ای با N حلقه نزدیک به هم

مثال ۴-۵

ضرب القاوری سیملوله آرمانی بدون هسته‌ای به طول $62/8\text{cm}$ و سطح مقطع 1cm^2 را پیدا کنید که شامل 2000 حلقه نزدیک به هم است.

پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$A = 1\text{cm}^2 \quad \ell = 62/8\text{cm} \quad N = 2000 \quad L = ?$$

با قراردادن مقادیر بالا در رابطه ۴-۴ داریم:

$$L = \mu_0 \frac{AN^2}{\ell} = (4\pi \times 10^{-7} \text{T.m/A}) \frac{(1 \times 10^{-4} \text{m}^2)(2000)^2}{0.628\text{m}} = 8 \times 10^{-3} \text{H} = 8\text{mH}$$

تمرین ۴-۳

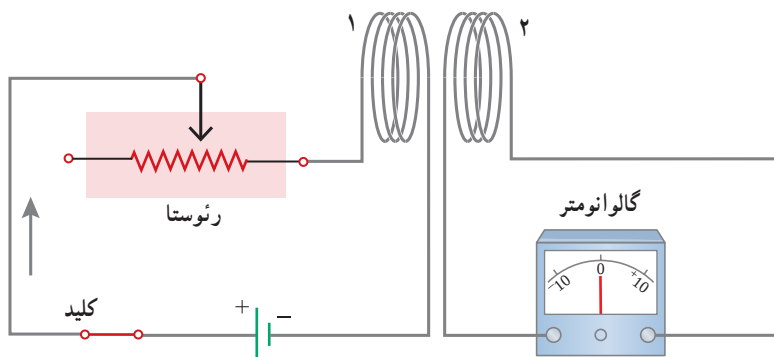
- ۱- تعداد حلقه‌های سیملوله‌ای بدون هسته، به طول 28cm و سطح 1cm^2 چه تعداد باشد تا ضرب القاوری آن 1mH شود؟
- ۲- دو سیملوله بدون هسته با سطح مقطع و تعداد دور یکسان را در نظر بگیرید. اگر طول یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، ضرب القاوری اش چند برابر دیگری است؟

خوب است بدانید: کاربرد القاگرها در لامپ‌های فلئوئورسان

همان‌طور که در ابتدای این بخش دیدیم القاگرها با تغییرات سریع جریان در مدار مخالفت می‌کنند، به همین دلیل نقش مهمی در لامپ‌های فلئوئورسان (مختابی) دارند. در این لامپ‌ها، جریان الکتریکی از گاز رقیقی که فضای درون لامپ را پر کرده است می‌گذرد و گاز را یونیده و به پلاسما تبدیل می‌کند. پلاسما یک رسانای غیراھمی است و هرچه بیشتر یونیده شود مقاومت آن کمتر می‌شود. اگر ولتاژ به حد کافی بالایی به گاز اعمال شود، جریان می‌تواند بسیار زیاد شود و به مدار بیرونی لامپ فلئوئورسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر را به طور متوالی با لامپ فلئوئورسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل کننده همچنین باعث می‌شود تا لامپ فلئوئورسان بتواند با ولتاژ متناوب کار کند.

شکل ۴-۹ اسباب آزمایش ساده‌ای را برای بررسی اثر القای متقابل نشان می‌دهد.

جریان عبوری از پیچه ۱، میدان مغناطیسی $\vec{B}$ را به وجود می‌آورد. این میدان $\vec{B}$ ، شار مغناطیسی‌ای را از پیچه ۲ می‌گذراند که در مجاورت آن قرار دارد. با تغییر دادن مقاومت رئوستا و تغییر جریان در پیچه ۱، میدان مغناطیسی پیچه ۱ و در نتیجه شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند؛ بنابر قانون فاراده،

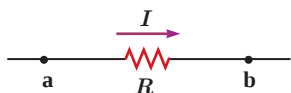


شکل ۴-۹ با تغییر مقاومت رئوستا و تغییر جریان عبوری از پیچه ۱ شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۲ می‌شود. هم‌زمان تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۱ می‌گردد.

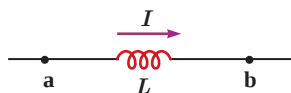


شکل ۴-۱۰ برای به حداقل رساندن اثر القای متقابل در برخی از مدارهای الکتریکی، القاگرهای مجاور را به گونه‌ای قرار می‌دهند که سطح حلقه‌های آنها بر یکدیگر عمود باشد.

مقاومت با جریان I : انرژی تلف شده است.



القاگر با جریان I : انرژی ذخیره شده است.



شکل ۴-۱۱ 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 القایی در این پیچه می‌انجامد. همچنین تغییر جریان در پیچه ۲، سبب ایجاد نیروی محرکه القایی در پیچه ۱ می‌شود. این فرایند، **القای متقابل** نامیده می‌شود و به کمک آن می‌توان انرژی را از یک پیچه، به پیچه دیگر منتقل کرد.

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 ۴-۱۰). 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 جرابی در القاگر برقرار شود، مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی در مقاومت الکتریکی سیم‌های القاگر به صورت گرما تلف و بقیه آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در میدان القاگر با ضرب القاوری L ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4-5)$$

لازم است رفتار مقاومت و القاگر را به لحاظ انرژی اشتباه نگیرید (شکل ۴-۱۱). 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 ۴-۶

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 القاوری این القاگر چقدر باشد تا بتواند 1 kWh انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان 200 A ذخیره کند؟

پاسخ: مقدار انرژی ذخیره شده مورد نیاز $U = 1 \text{ kWh}$ و جریان $I = 200 \text{ A}$ داده شده است. از معادله ۴-۵ ضرب القاوری را به دست می‌آوریم:

$$U = 1 \text{ kWh} = (1 \times 10^3 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow L = \frac{2U}{I^2} = \frac{2(3.6 \times 10^6 \text{ J})}{(200 \text{ A})^2} = 1.8 \times 10^2 \text{ H}$$

همان طور که نتیجه صفحه قبل نشان می دهد ضریب القاوری لازم، بسیار بیشتر از ضریب القاوری یک القاگر معمولی (در حد میلی هانری) است که در آزمایشگاه از آن استفاده می کنیم. افزون بر این همان طور که در فصل ۲ دیدیم سیم های معمولی که بتوانند جریان 20 A را از خود عبور دهند باید قطر بسیار بزرگی داشته باشند. در نتیجه اندازه یک القاگر 180 H که از سیم های معمولی ساخته شده باشد و بتواند چنین جریانی را تحمل کند باید خیلی بزرگ (به اندازه یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری های موجود این ایده، غیر عملی است و توجیه اقتصادی ندارد.

تمرین ۴-۴

سیملوله آرمانی بدون هسته ای به طول 22 cm و با حلقه هایی به مساحت 44 cm^2 ، شامل $N=2000$ حلقه نزدیک به هم است و جریان $1/7\text{ A}$ از آن می گذرد. ضریب القاوری و انرژی ذخیره شده در سیملوله را حساب کنید.

فناوری و کاربرد: انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو



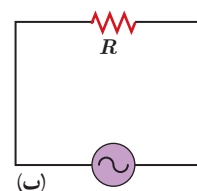
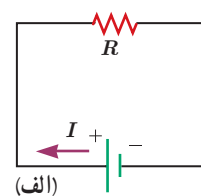
انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو، از انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی پیچه احتراق تأمین می شود.

انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه های احتراق خودروهای با موتور بنزینی دارد. پیچه اولیه با حدود 25° دور به باتری خودرو بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی ای تولید می کند. این پیچه، درون یک پیچه ثانویه با 2500° دور سیم خیلی نازک قرار گرفته است. برای جرقه زدن شمع، جریان در پیچه اولیه قطع می شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر می رسد و نیروی محرکه الکتریکی ده ها هزار ولتی در پیچه ثانویه القا می کند. در نتیجه انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی همراه با جریانی لحظه ای از پیچه ثانویه به طرف شمع می رود و جرقه ای تولید می کند که سبب احتراق مخلوط سوخت و هوا در سیلندرهای موتور می شود (شکل روبه رو).

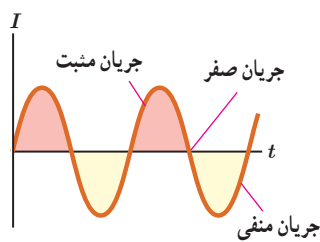
۴-۵ جریان متناوب

در اواخر قرن نوزدهم، بحث های داغی بین توماس ادیسون و جورج وستینگهاوس درباره 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 می کرد. سرانجام، وستینگهاوس پیروز شد و پس از آن سامانه های انتقال و توزیع برق و بیشتر وسایل خانگی با جریان متناوب به کار افتادند.

شکل ۴-۱۲ دو مدار ساده جریان مستقیم و جریان متناوب را نشان می دهد. همان طور که می بینید جهت جریان در مدار جریان مستقیم معین است، در حالی که در مدار جریان متناوب، به دلیل تغییر جهت جریان با گذشت زمان، نمی توان جهت معینی را برای جریان در نظر گرفت. تمامی نیروگاه های تولید برق در دنیا و از جمله ایران، جریان متناوب تولید می کنند که تابعی سینوسی از زمان است و به همین دلیل، جریان متناوب سینوسی نامیده می شود (شکل ۴-۱۳).

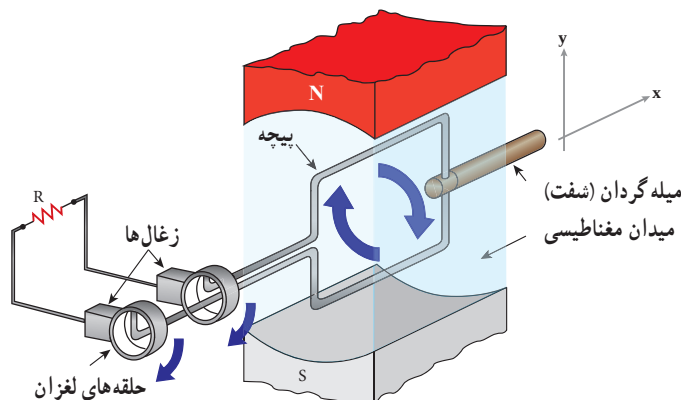


شکل ۴-۱۲ (الف) مدار ساده جریان مستقیم، که در آن جریان با گذشت زمان تغییر نمی کند. (ب) مدار ساده جریان متناوب، که در آن ولتاژ و جریان با گذشت زمان به طور سینوسی تغییر می کنند.



شکل ۱۳-۴ جریان متناوب سینوسی، متداول‌ترین نوع جریان متناوب است.

تولید جریان متناوب: یکی از کاربردهای مهم اثر القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. پیش از این دیدیم که برای تولید نیروی محرکه القایی باید شار عبوری از پیچه تغییر کند. همچنین دیدیم که در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت، شاری که از پیچه می‌گذرد از رابطه $\Phi = BA \cos \theta$ محاسبه می‌شود که در آن θ زاویه بین نیم خط عمود بر سطح حلقه‌های پیچه و میدان مغناطیسی است. رایج‌ترین روش برای تغییر شار و در نتیجه تولید جریان القایی، تغییر زاویه θ است. شکل ۱۴-۴ پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت دور محور x بچرخد.



شکل ۱۴-۴ اجزای یک مولد (ژنراتور) جریان متناوب. حرکت مکانیکی از طریق میلۀ گردان، سبب چرخیدن پیچه در میدان مغناطیسی می‌شود و جریان متناوبی را در مدار به وجود می‌آورد.

هر دور چرخش پیچه، معادل 2π رادیان است. اگر پیچه به‌طور یکنواخت بچرخد و هر دور چرخش آن T ثانیه طول بکشد، پیچه در مدت t ثانیه، به اندازه $\frac{t}{T}$ دور خواهد چرخید. در نتیجه اگر سطح پیچه در لحظه $t = 0$ عمود بر میدان مغناطیسی باشد ($\theta = 0$)، پس از گذشت t ثانیه، زاویه θ 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 محرکه القایی در پیچه در لحظه t از رابطه زیر به‌دست می‌آید^۱:

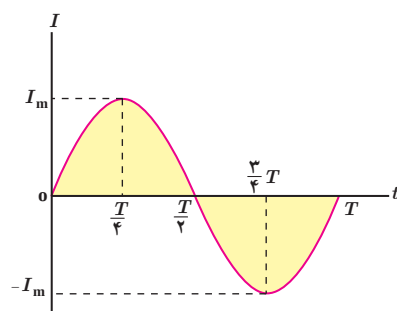
$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (۶-۴)$$

که در آن $\mathcal{E}_m$ بیشینه مقدار نیروی محرکه القایی در پیچه است. این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه القا شده به‌طور 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 $I = \mathcal{E}/R$ ، جریانی که در پیچه القا می شود برابر است با:

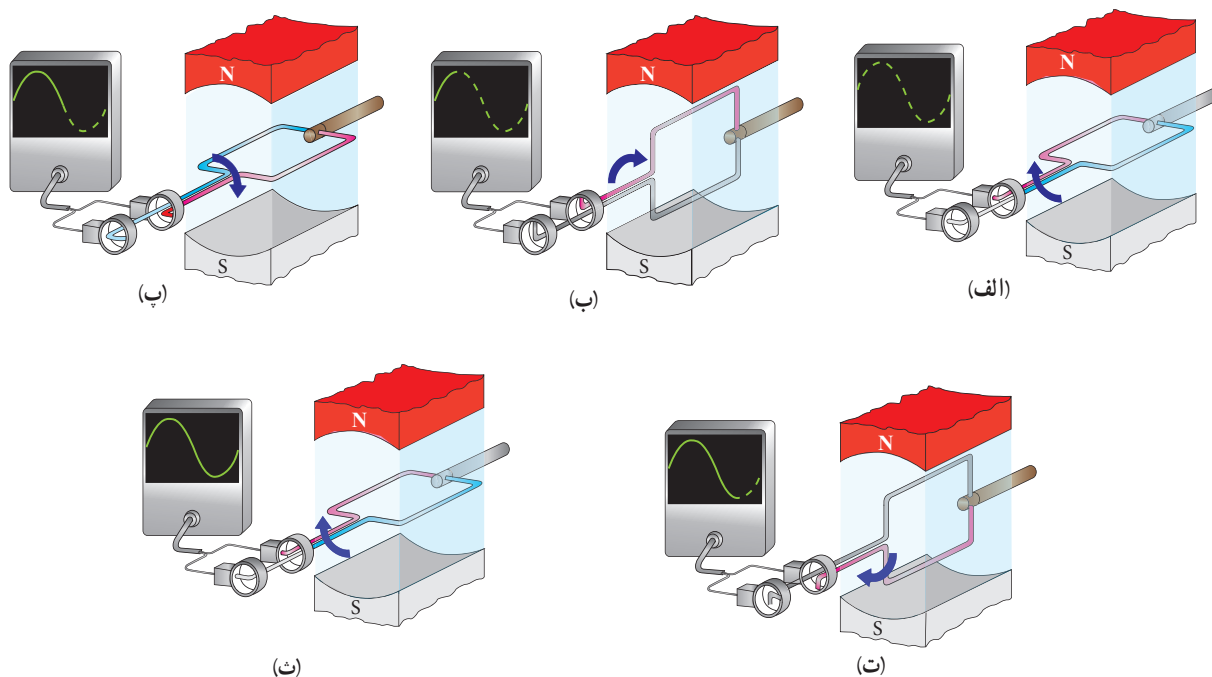
$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (۷-۴)$$



شکل ۴-۱۵ نمودار جریان متناوب سینوسی در یک دوره

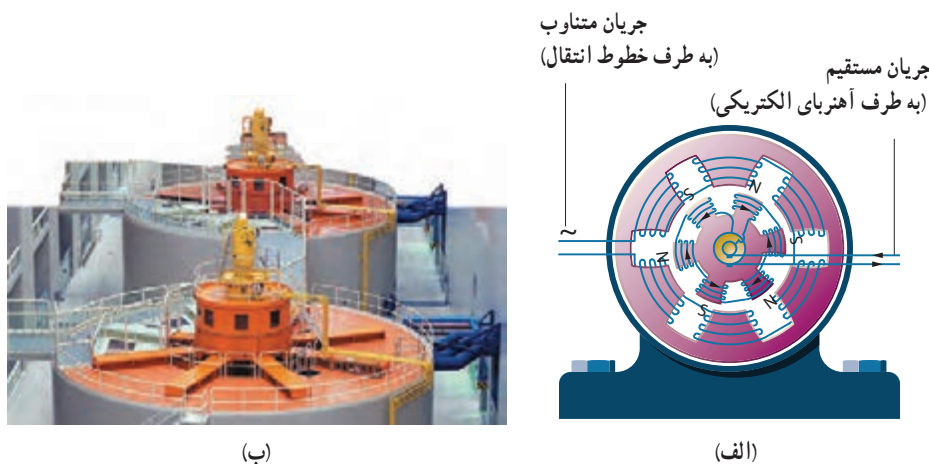
در این رابطه I_m بیشینه جریان القا شده در پیچه و برابر $I_m = \mathcal{E}_m/R$ است. رابطه ۷-۴ همچنین نشان می دهد که جریان القایی در پیچه، به طور سینوسی تغییر می کند، به همین سبب به آن **جریان متناوب** می گویند. نمودار این جریان برحسب زمان، در یک دوره در شکل ۴-۱۵ رسم شده است.

شکل ۴-۱۶ تولید جریان متناوب سینوسی در مدت یک دوره را نشان می دهد. در $t = 0$ سطح پیچه بر خطوط میدان مغناطیسی عمود است و جریانی در مدار وجود ندارد (شکل ۴-۱۶ الف). پیچه یک چهارم دور می چرخد تا در وضعیت شکل ۴-۱۶ ب قرار گیرد. در حین این چرخش، شار عبوری از پیچه تغییر می کند و جریان از صفر به مقدار بیشینه مثبت می رسد (ربع اول چرخش). پیچه به چرخیدن ادامه می دهد تا در وضعیت شکل ۴-۱۶ پ قرار گیرد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه مثبت به صفر می رسد (ربع دوم چرخش). پس از آن پیچه از وضعیت شکل ۴-۱۶ ب به وضعیت شکل ۴-۱۶ ت می رسد. در حین این چرخش، جریان از صفر به مقدار بیشینه منفی می رسد (ربع سوم چرخش). سرانجام پیچه یک ربع دور دیگر می چرخد و به این ترتیب یک چرخه کامل را طی می کند و به وضعیت شکل ۴-۱۶ ث می رسد و در نتیجه جریان از مقدار بیشینه منفی به صفر می رسد. این حرکت به طور متناوب (پی در پی) توسط پیچه ادامه می یابد و جریان متناوب تولید می شود.



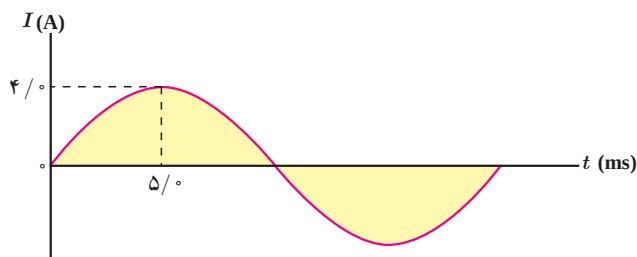
شکل ۴-۱۶ تولید جریان متناوب سینوسی در یک چرخش کامل

در نیروگاه‌های تولید برق، برای تولید جریان متناوب از مولدهای خاصی استفاده می‌شود که به آنها مولدهای صنعتی جریان متناوب می‌گویند. در مولدهای صنعتی پیچ‌ها ساکن اند و آهنربای الکتریکی در آنها می‌چرخد (شکل ۴-۱۷). در نیروگاه‌های تولید برق در ایران، آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، ۵۰ دور درون پیچ می‌چرخد. این کمیت را بسامد برق تولید شده می‌نامند و به صورت 50 Hz بیان می‌کنند. یکای SI بسامد s^{-1} یا Hz (هرتز) است.



شکل ۴-۱۷ الف) در مولدهای صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچ‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود. ب) نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق.

مثال ۴-۷



شکل روبه‌رو، نمودار جریان متناوب سینوسی را نشان می‌دهد که یک مولد جریان متناوب تولید کرده است. معادلهٔ جریان برحسب زمان را بنویسید.

پاسخ: چون ربع چرخه در $5/0\text{ ms}$ طی شده است، دوره تناوب برابر $T = 2\text{ ms}$ است. همچنین با توجه به نمودار، بیشینهٔ جریان $I_m = 4/0\text{ A}$ است. در نتیجه از رابطهٔ ۴-۷ داریم:

$$I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t = (4/0\text{ A}) \sin \left(\frac{2\pi}{2 \times 10^{-3}\text{ s}} \right) t = 4/0 \sin 1000\pi t$$

نتیجهٔ نهایی برحسب یکاهای SI نوشته شده است.

تمرین ۴-۵

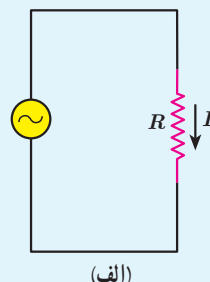
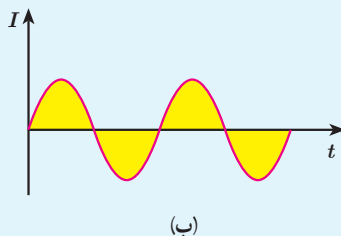
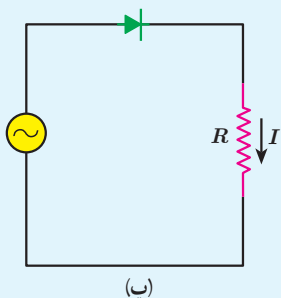
معادلهٔ جریان – زمان یک مولد جریان متناوب برحسب یکاهای SI به صورت $I = (4/0 \times 10^{-3}) \sin 250\pi t$ است.

الف) جریان در دو لحظهٔ $t_1 = 2/0\text{ ms}$ و $t_2 = 8/0\text{ ms}$ چقدر است؟

ب) دورهٔ تناوب جریان را به دست آورید و نمودار جریان – زمان را در یک دورهٔ کامل رسم کنید.

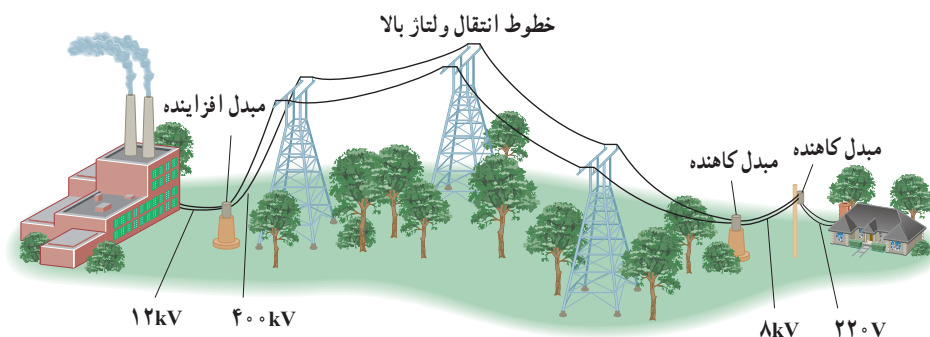
فعالیت ۴-۱

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 برحسب زمان را برای مدار شکل الف نشان می‌دهد. پس از گفت‌وگو در گروه خود، نمودار تغییرات جریان برحسب زمان را برای مدار شکل پ رسم کنید.

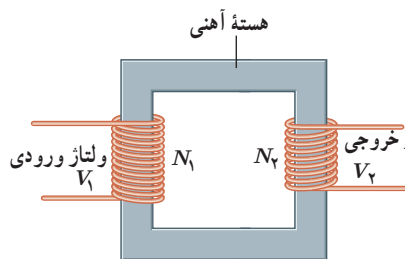


مبدل‌ها : یکی از مزیت‌های مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان‌تر از dc است. برای انتقال توان الکتریکی در فاصله‌های دور، تا جایی که امکان دارد باید از ولتاژهای بالا و جریان‌های کم استفاده کنیم. این کار اتلاف توان را در خط‌های انتقال کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به کاهش 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 kV استفاده می‌کنند (شکل ۴-۱۸). از طرف دیگر، ملاحظات ایمنی و الزامات عایق‌بندی در ساخت وسایل خانگی و صنعتی، ولتاژهای به نسبت پایین‌تری را در محل مصرف انرژی ضروری می‌کند. ولتاژ استاندارد برای سیم‌کشی خانگی در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر 220 V است. تبدیل ولتاژ مورد نیاز با استفاده از مبدل‌ها صورت می‌گیرد.



شکل ۴-۱۸ قبل از انتقال توان الکتریکی از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزایشنده، ولتاژ را تا حدود 400 kV افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهشنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا توان الکتریکی با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.

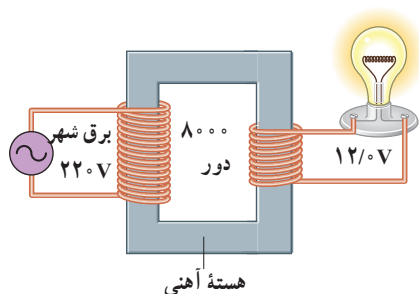


شکل ۱۹-۴ یک مبدل آرمانی شامل دو پیچه که روی یک هسته آهنی پیچیده شده‌اند.

شکل ۱۹-۴ مبدلی 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^۱. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچه‌های آن ناچیز است، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (۸-۴)$$

مثال ۸-۴



شکل روبه‌رو یک مبدل ۲۲۰V به ۱۲۰V 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:

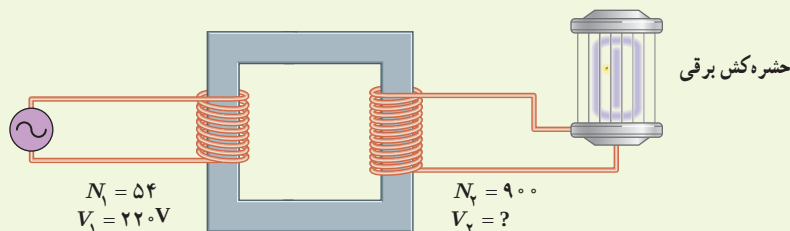
$$V_1 = ۲۲۰\text{V}, \quad V_2 = ۱۲۰\text{V}, \quad N_1 = ۸۰۰۰ \text{ دور}, \quad N_2 = ?$$

با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه ۸-۴ داریم:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{۱۲۰\text{V}}{۲۲۰\text{V}} = \frac{N_2}{۸۰۰۰} \Rightarrow N_2 = ۴۳۶ \text{ دور}$$

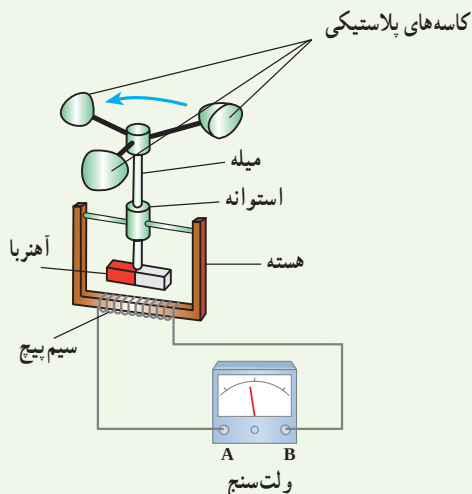
تمرین ۶-۴

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 $N_1 = ۵۴$ و تعداد دور ثانویه $N_2 = ۹۰۰$ 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 V/V برابر ولتاژ بیشینه ورودی و خروجی مبدل هستند. بررسی دلایل این موضوع خارج از اهداف این کتاب است.

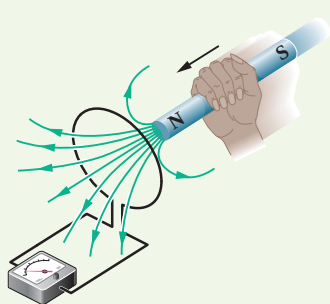
پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.



۴ سطح حلقه های پیچه ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه آن 0.4 T و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت 0.1 s تغییر می کند و به 0.4 T در خلاف جهت اولیه می رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه 5 cm^2 باشد، اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.

۵ مساحت هر حلقه پیچه ای 3 cm^2 و پیچه متشکل از ۱۰۰۰ حلقه است. در ابتدا سطح پیچه ها بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت 0.2 s پیچه بچرخد و سطح حلقه ها موازی میدان مغناطیسی زمین شود، نیروی محرکه متوسط القایی در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را 5 G در نظر بگیرید.

۳-۴ قانون لنز

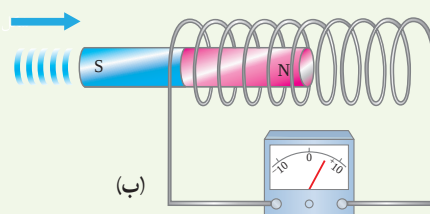
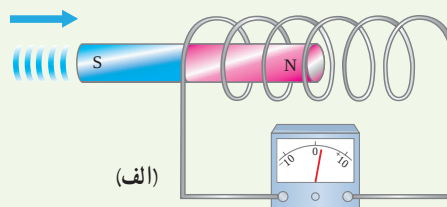


۶ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل روبه رو به یک حلقه رسانا نزدیک می کنیم. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.

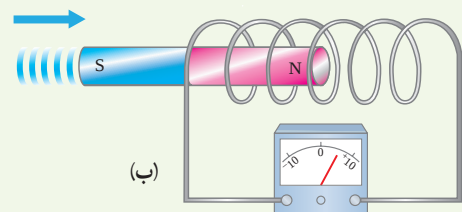
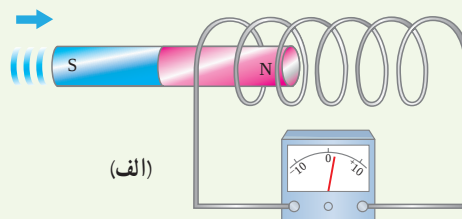
۷ دو آهنربای میله ای مشابه را مطابق شکل، به طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می کنیم به طوری که یکی از آنها از حلقه رسانایی عبور می کند. اگر سطح زمین در محل

۱-۴ و ۲-۴ پدیده القای الکترومغناطیسی و قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

۱ دو سیملوله با حلقه های با مساحت یکسان ولی با تعداد دور متفاوت را مطابق شکل های زیر به ولت سنج حساسی وصل کرده ایم. دریافت خود را از این شکل ها بنویسید. (آهنرباها مشابه اند و با تندی یکسانی به طرف سیملوله ها حرکت می کنند.)



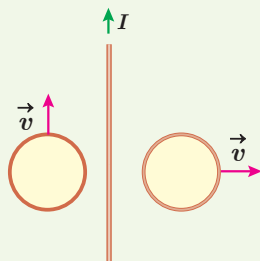
۲ دو سیملوله مشابه را مطابق شکل های زیر به ولت سنج حساسی وصل کرده ایم. دریافت خود را از شکل های زیر بنویسید. (آهنرباها مشابه اند ولی با تندی متفاوتی به طرف سیملوله حرکت می کنند.)



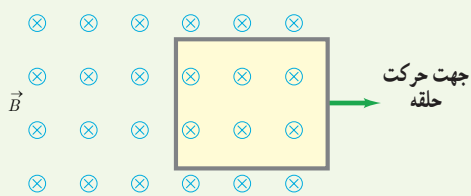
۳ شکل داده شده ساختمان یک بادسنج را نشان می دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله آن می چرخد و ولت سنج عددی را نشان می دهد.

الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه ولت سنج می شود؟
ب) آیا با افزایش تندی باد، عددی که ولت سنج نشان می دهد تغییر می کند؟ چرا؟

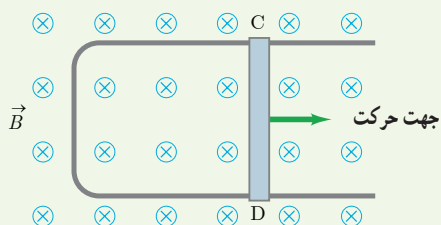
۱۱ دو حلقهٔ رسانا در نزدیکی یک سیم دراز حامل جریان ثابت I قرار دارند؛ این دو حلقه با تندی یکسان، ولی در جهت‌های متفاوت مطابق شکل زیر حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



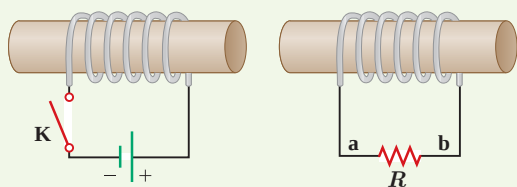
۱۲ حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل زیر به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی درون سویی خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



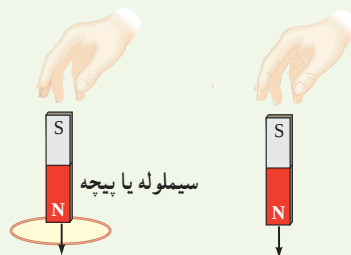
۱۳ شکل زیر رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی $\vec{B}$ یکنواخت که عمود بر صفحهٔ شکل و رو به داخل صفحه است نشان می‌دهد. وقتی میلهٔ فلزی CD به طرف راست حرکت کند، جهت جریان القایی در مدار در چه جهتی است؟



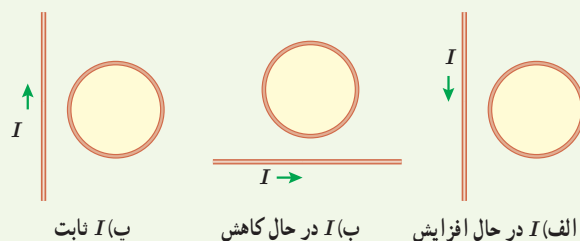
۱۴ در مدار نشان داده شده در شکل زیر، جهت جریان القایی را در مقاومت R در هر یک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید: (الف) در لحظهٔ بستن کلید K، (ب) در لحظهٔ باز کردن کلید K.



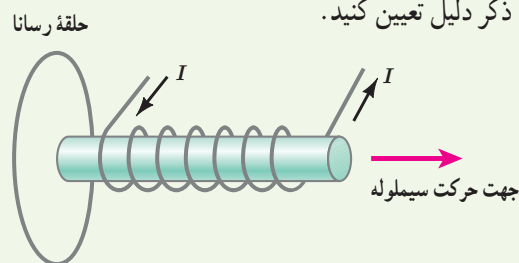
برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرورفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.)



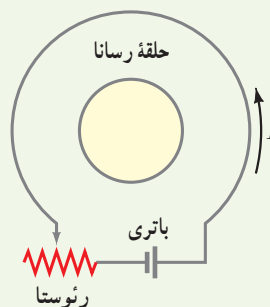
۸ جهت جریان القایی را در هر یک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل‌های زیر تعیین کنید.



۹ شکل زیر سیملولهٔ حامل جریانی را نشان می‌دهد که در حال دور شدن از یک حلقهٔ رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



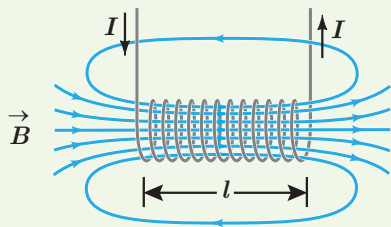
۱۰ اگر در مدار شکل زیر مقاومت رثوستا افزایش یابد، جریان القایی در حلقهٔ رسانای داخلی در چه جهتی ایجاد می‌شود؟



۱۸ مساحت هر حلقه و طول سیملوله شکل زیر به ترتیب 2°cm^2 و 8°cm است. اگر این سیملوله از 1000 حلقه نزدیک به هم تشکیل شده باشد،

الف) ضریب القاوری آن را پیدا کنید.

ب) چه جریانی از سیملوله بگذرد تا در میدان مغناطیسی آن 4°mJ انرژی ذخیره شود؟



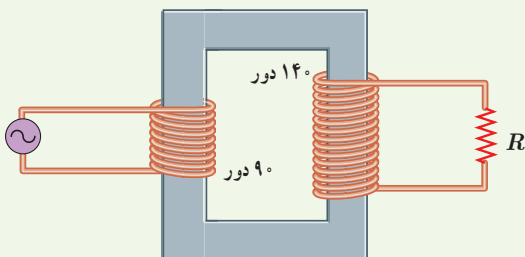
۴-۵ جریان متناوب

۱۹ جریان متناوبی که بیشینه آن 2°A و دوره آن 2°s است، از یک رسانای $5^\circ \Omega$ می‌گذرد.

الف) اولین لحظه‌ای که در آن جریان بیشینه است چه لحظه‌ای است؟ در این لحظه نیروی محرکه القایی چقدر است؟

ب) در لحظه $t = \frac{1}{4}^\circ \text{s}$ ، جریان چقدر است؟

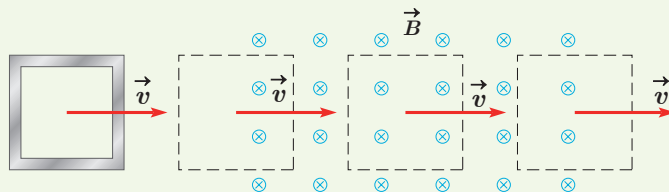
۲۰ در مبدل آرمانی شکل زیر، اگر ولتاژ دوسر مقاومت R برابر 7°V باشد، ولتاژ مولد چقدر است؟



۱۵ حلقه رسانای مربعی شکل، به طول ضلع 1°cm وارد میدان مغناطیسی درون‌سویی به اندازه 2°mT و سپس از آن خارج می‌شود.

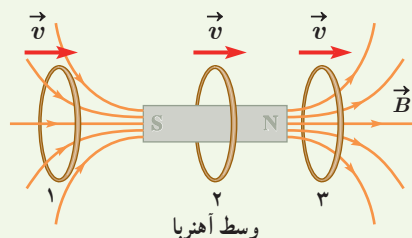
الف) در کدام مرحله شار عبوری از حلقه بیشینه است؟ مقدار شار گذرنده از حلقه در این حالت چقدر است؟

ب) در کدام وضعیت (ها) شار گذرنده از حلقه تغییر می‌کند؟ جهت جریان القایی را در حلقه تعیین کنید.



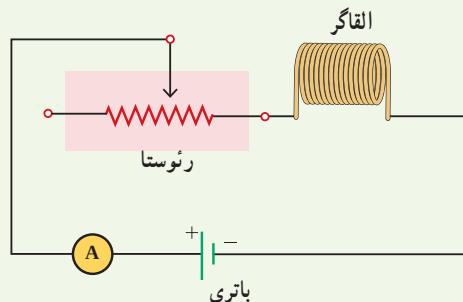
۱۶ حلقه رسانایی به طرف یک آهنربای میله‌ای حرکت می‌کند.

شکل زیر، حلقه را در سه وضعیت نسبت به آهنربا نشان می‌دهد. جهت جریان القایی را در حلقه برای هر وضعیت به طور جداگانه تعیین کنید.



۴-۶ القاگرها

۱۷ شکل زیر مداری را نشان می‌دهد؛ شامل یک القاگر (سیملوله)، باتری، رئوستا و آمپرسنج که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ باتری، انرژی ذخیره شده در القاگر را زیاد کنیم چه راهی پیشنهاد می‌کنید؟



پیوست

واژه نامه فارسی – انگلیسی

Magnetic permeability	تراوایی مغناطیسی	Millikan's oil- drop experiment	آزمایش قطره – روغن میلیکان
Thermistor	ترمیستور	Permanent magnet	آهنربای دائمی
Dielectric constant	ثابت دی الکتریک	Temporary magnet	آهنربای موقت
Induced current	جریان القایی	Bar magnet	آهنربای میله ای
Electric Current	جریان الکتریکی	Horseshoe magnet	آهنربای نعلی شکل
Alternating Current (AC)	جریان متناوب	Superconductivity	ابر رسانایی
Direct Current (DC)	جریان مستقیم	Potential difference	اختلاف پتانسیل
Surface charge density	چگالی سطحی بار	Voltage drop	افت پتانسیل
Loop	حلقه	Inductor	القارگر
Magnetic domain	حوزه مغناطیسی	Electromagnetic induction	القای الکترومغناطیسی
Capacitor	خازن	Electric induction	القای الکتریکی
Parallel – plate capacitor	خازن تخت	Magnetic induction	القای مغناطیسی
Discharging	خالی کردن (خازن)	Electric potential energy	انرژی پتانسیل الکتریکی
Electric field lines	خط های میدان الکتریکی	Magnetic energy	انرژی مغناطیسی
Magnetic field lines	خط های میدان مغناطیسی	Net charge	بار خالص
Self – inductance	خود – القاوری (خودالقایی)	Polarized charge	بار قطبیده
Electric dipole	دوقطبی الکتریکی	Lightning rod	برق گیر
Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی	Angular frequency	بسامد زاویه ای
Diamagnetism	دیامغناطیس	Leyden jar	بطری لیدن
Light Emitting Diode (LED)	دیود نورگسیل	Paramagnetism	پارامغناطیس
Electrostatic precipitator	رسوب دهنده الکتروستاتیکی	Conservation of charge	پایستگی بار
Rheostat	رئوستا	Potentiometer	پتانسیومتر
Inclination angle	زاویه شیب	Charging	پر کردن – شارژ (خازن)
Drift velocity	سرعت سوق	Cosmic ray	پرتو کیهانی
Triboelectric series	سری الکتریسیته مالشی (تریوالکتریک)	Coil	پیچ
Solenoid	سیملوله	Corona discharge	تخلیه هاله ای

Series circuits	مدارهای متوالی	Magnetic flux	شار مغناطیسی
Parallel circuits	مدارهای موازی	Inductance	ضریب القاوری (ضریب خودالقایی)
Resistor	مقاومت	Coefficient of resistivity	ضریب دمایی مقاومت ویژه
Electric resistance	مقاومت الکتریکی	Permittivity	ضریب گذردهی
Wire_wound resistor	مقاومت پیچهای	Capacitance	ظرفیت
Composition resistor	مقاومت ترکیبی	Insulator	عایق
Internal resistance	مقاومت درونی	Ferromagnetism	فرومغناطیس
Variable resistor	مقاومت متغیر	Electric breakdown	فروریزش الکتریکی
Equivalent resistance	مقاومت معادل	Junction rule	قاعده انشعاب
Light Dependent Resistor (LDR)	مقاومت نوری	Faraday's law of electromagnetic induction	قانون القای الکترومغناطیسی فاراده
Resistivity	مقاومت ویژه	Coulomb's law	قانون کولن
Electric motor	موتور الکتریکی	Lenz's law	قانون لنز
Van de Graaff generator	مولد وان دو گراف	Kirchhoff's laws	قانون های کیرشهف
Electric field	میدان الکتریکی	Right hand rule	قاعده دست راست
Magnetic field	میدان مغناطیسی	Magnetic induction	میل مغناطیسی
Magnetic declination	میل مغناطیسی	South pole	قطب جنوب
Lichenberg patterns	نقش های لیچنبرگ	North pole	قطب شمال
Electric force	نیروی الکتریکی	Polarization	قطبش
Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی محرکه الکتریکی	Faraday cage	قفس فاراده
Iron core	هسته آهنی	Quark	کوارک
Iontophoresis	یون رانی	Quantized	کوانتیده
		Magnetic axis	محور مغناطیسی

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, 3rd Edition, 2014, Hodder Education.
5. University Physics, Bauer and Westfall, 1st edition, 2011, McGraw – Hill.
6. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th Edition, 2014, Prentice – Hall International.
7. Physics, Allen Giambattista , Betty Richardson and Robert Richardson, 2nd Edition, 2008, McGraw–Hill.
8. The Physics of Everyday Phenomena, 6th Edition, W. Thomas Griffith and Juliet W. Brosing , 2009, McGraw Hill.
9. Physics for Scientists and Engineers, Randall D. Knight, 3rd Edition, 2013, Pearson.
10. Cambridge International AS and A Level Physics, Mike Crundell, 2nd Edition, 2014, Hodder Education.
11. University Physics, Richard Wolfson, 2nd 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، روح‌اله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحتی مروستی، چاپ اول ۱۳۹۱، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۲- مبانی فیزیک (جلد دوم) الکتریسیته و مغناطیس، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر، چاپ اول ۱۳۹۳، انتشارات نیاز دانش.
- ۳- مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی، ۱۳۸۷-۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
- ۴- فیزیک مفهومی، ویراست دهم، پل جی هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
- ۵- نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱، انتشارات آراکس.
- ۶- اصول فیزیک (جلد دوم)، هانس اوهانیان، ترجمه بهرام معلمی و جهان‌شاه میرزاییگی، چاپ اول، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۷- فیزیک (جلد دوم)، مارچلو آلونسو و ادوارد جی. فین. ترجمه لطیف کاشیگر، چاپ اول، ۱۳۶۷، نشر روز.
- ۸- باتری اشکانی، ناصر کنعانی، ترجمه محمد شاهمیری، ۱۳۹۶، تهران، کتاب سبز.



سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی جهت ایفای نقش خطیر خود در اجرای سند تحول بنیادین در آموزش و پرورش و برنامه درسی ملی جمهوری اسلامی ایران، مشارکت معلمان را به‌عنوان یک سیاست اجرایی مهم دنبال می‌کند. برای تحقق این امر در اقدامی نوآورانه سامانه تعاملی بر خط اعتبارسنجی کتاب‌های درسی راه‌اندازی شد تا با دریافت نظرات معلمان درباره کتاب‌های درسی نونگاشت، کتاب‌های درسی را در اولین سال چاپ، با کمترین اشکال به دانش‌آموزان و معلمان ارجمند تقدیم نماید. در انجام مطلوب این فرایند، همکاران گروه تحلیل محتوای آموزشی و پرورشی استان‌ها، گروه‌های آموزشی و دبیرخانه راهبری 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	معصومه ضیا بری	سمنان	۳۰	مدیحه نامور	خراسان شمالی
۶	سیده فاطمه کمالی کارسالاری	مازندران	۳۱	اسدالله رفیعی	آذربایجان شرقی
۷	فتح اله دویرانی	زنجان	۳۲	فاطمه نصرت	اصفهان
۸	مجید عتیقی	خراسان رضوی	۳۳	ناصر غلامی	مرکزی
۹	فاطمه اوصانلو	زنجان	۳۴	فاطمه سادات کریمی دیوکلانی	قم
۱۰	مصطفی خسروی	فارس	۳۵	زهرا عزتی	آذربایجان غربی
۱۱	ملیحه مذنبی	هرمزگان	۳۶	محمد تقی غلامی	ایلام
۱۲	احمد کمالیان فر	فارس	۳۷	عمید عقیلی نژاد	گلستان
۱۳	سید جواد شاکری	خراسان شمالی	۳۸	مرضیه قدرتی	همدان
۱۴	مریم تنفگ ساز رحیمی	قزوین	۳۹	حمید رضا نوری	خراسان جنوبی
۱۵	صدیقه سیروسی	خراسان جنوبی	۴۰	سیده زهره دودمانی	گیلان
۱۶	بهاره فخرائی	کردستان	۴۱	اسماعیل مطیع	قم
۱۷	لیلا روحی	شهرستان‌های تهران	۴۲	مجید سعدآبادی	خراسان رضوی
۱۸	عبدالواحد خالدی	کردستان	۴۳	طیبه شفیع	بوشهر
۱۹	مهسا جلیلی	شهر تهران	۴۴	غیاض سلیمانی	خوزستان
۲۰	محمد رضا شفیع	کرمان	۴۵	علی حسن بهامین پیلی	کهگیلویه و بویراحمد
۲۱	مهسا حبیب الهی	شهر تهران	۴۶	مجید راسخ	گیلان
۲۲	محمد شفیع مرادی	همدان	۴۷	زریر زمانی	کهگیلویه و بویراحمد
۲۳	سعیده طاهری فر	ایلام	۴۸	محمد رضا عباسی	کرمانشاه
۲۴	الهام حیدری	خوزستان	۴۹	شیرین تلمه	کرمانشاه
۲۵	خشایار بازیاری	بوشهر			