بسم الله الرحمن الرحیم

اَللّٰهُمَّ صَلِّ عَلٰی مُحَمَّدٍ وَ آلِ مُحَمَّدٍ وَ عَجِّلْ فَرَجَهُمْ

فیزیک (۲)

رشتهٔ ریاضی و فیزیک

پایهٔ یازدهم

دورهٔ دوم متوسطه

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب: فیزیک (۲) ـ پایهٔ یازدهم دورهٔ دوم متوسطه ـ ۱۱۱۲۰۹

پدیدآورنده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

مدیریت برنامه‌ریزی درسی وتألیف: دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری

شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف: احمد احمدی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، سیدهدایت سجادی، سیروان مردوخی و علیرضا نیکنام(اعضای شورای برنامه‌ریزی‌و گروه تألیف)ـ محمدکاظم بهنیا (ویراستار ادبی)

مدیریت آماده‌سازی هنری: اداره کلّ نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی

شناسه افزوده آماده‌سازی: احمدرضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) ـ مجید ذاکری یونسی (مدیر هنری) ـ محمّد مهدی ذبیحی (طراح جلد)ـ راحله زادفتح‌اله(طراح گرافیک و صفحه‌آرا) ـ فاطمه رئیسیان فیروزآباد (رسام) ـ سیّده فاطمه طباطبایی، بهناز بهبود، سید کیوان حسینی، فاطمه صغری ذوالفقاری، زینت بهشتی شیرازی و حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)

نشانی سازمان: تهران: خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن: ۹ـ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
وبگاه: www.chap.sch.ir و www.irtextbook.ir

ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش)
تلفن: ۵ـ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵

چاپخانه: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»

سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ هشتم ۱۴۰۳

شابک ۸ـ۲۷۹۴ـ۰۵ـ۹۶۴ـ۹۷۸
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.

امام‌خمینی
«قُدِّسَ سِرُّهُ»

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

فهرست

۱ الکتریسیتهٔ ساکن ۱

۱ـ۱ بار الکتریکی ۲
۱ـ۲ پایستگی و کوانتیده بودن بار الکتریکی ۳
۱ـ۳ قانون کولن ۵
۱ـ۴ میدان الکتریکی ۱۰
۱ـ۵ میدان الکتریکی حاصل از یک ذرهٔ باردار ۱۲
۱ـ۶ خطوط میدان الکتریکی ۱۷
۱ـ۷ انرژی پتانسیل الکتریکی ۲۱
۱ـ۸ پتانسیل الکتریکی ۲۳
۱ـ۹ میدان الکتریکی در داخل رساناها ۲۷
۱ـ۱۰ خازن ۳۲
۱ـ۱۱ خازن با دی‌الکتریک ۳۴
۱ـ۱۲ انرژی خازن ۳۸
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ..... ۴۱

۲ جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم ۴۵

۲ـ۱ جریان الکتریکی ۴۶
۲ـ۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم ۴۹
۲ـ۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی ۵۱
۲ـ۴ نیروی محرکهٔ الکتریکی و مدارها ۶۱
۲ـ۵ توان در مدارهای الکتریکی ۶۷
۲ـ۶ ترکیب مقاومت‌ها ۷۰
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ..... ۷۹

۳ مغناطیس ۸۳

۳ـ۱ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی ۸۴
۳ـ۲ میدان مغناطیسی ۸۵
۳ـ۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذرّهٔ باردار متحرک در میدان مغناطیسی ۸۹
۳ـ۴ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان ۹۱
۳ـ۵ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی ۹۴
۳ـ۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد ۱۰۱
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ..... ۱۰۴

۴ القای الکترومغناطیسی و جریان متناوب ۱۰۹

۴ـ۱ پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی ۱۱۰
۴ـ۲ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده ۱۱۱
۴ـ۳ قانون لنز ۱۱۷
۴ـ۴ القاگرها ۱۱۸
۴ـ۵ جریان متناوب ۱۲۲
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴ ..... ۱۲۸

پیوست ۱۳۱

واژه‌نامه ۱۳۲
منابع ۱۳۴

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

الف) سخنی با دانش‌آموزان عزیز

کتاب فیزیک ۲ برای پایه یازدهم دورهٔ نظری تألیف و چاپ شده است. این کتاب در ادامهٔ تغییر برنامهٔ درسی آموزش علوم تجربی در دورهٔ اوّل متوسطه و فیزیک دهم است. برای ارتباط مؤثرتر با برنامهٔ درسی این کتاب و تحقق اهداف آن، توجه به مواردی که در ادامه می‌آید توصیه می‌شود.

مسیر آموزش و یادگیری : دانش‌آموزان عزیز! مسیر آموزش و یادگیری، وقتی شوق‌انگیز و لذت‌بخش است که با تلاش و جدّیت شما برای پیمودن آن همراه شود. پیش از همه، باید به توانایی‌های خود باور و اعتماد داشته باشید. مفاهیمی که در هر سال تحصیلی می‌خوانید، با سطح درک و فهم شما متناسب است و برای بهبود و ارتقای زندگی فردی، اجتماعی و حرفه‌ای شما مفیدند. در فرایند آموزش، به طور فعال و باانگیزه 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 می‌آید.

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

یادگیری را بیاموزیم : هر یک از شما شیوه‌های یادگیری متفاوت و ابزار یادگیری ویژهٔ خود را دارید و بهتر است بر همین اساس روشی مناسب برای یادگیری خود بیابید و متناسب با آن برنامه‌ریزی کنید. شاید مهم‌ترین کاری که می‌توانید انجام دهید، آن باشد که برای خود زمان‌های مطالعه با برنامهٔ زمان‌بندی منظم و کافی در محیطی خالی از عامل‌های برهم‌زنندهٔ تمرکز، در نظر بگیرید. روشن است که باید وقت بیشتری را صرف جنبه‌هایی کنید که یادگیری آن برای شما دشوارتر است. اگر با شنیدن و انجام آزمایش مطالب درسی را می‌آموزید، حضور فعال در کلاس‌های درس بسیار مهم است. اگر با توضیح دادن آنها را می‌آموزید، آنگاه علاوه بر حضور فعال در کلاس‌های درس، کار کردن با دانش‌آموزان دیگر نیز برای شما بسیار راه‌گشا است. اگر حل کردن مسئله برای شما دشوار است وقت بیشتری را صرف یادگیری روش حل مسئله‌ها کنید. با توجه به آنچه گفته شد، اکنون به پرسش‌های زیر پاسخ دهید :

آیا من توانایی به کاربردن مفهوم های ریاضی را در فیزیک دارم؟ اگر پاسخ شما منفی است، به کتاب‌های ریاضیات پایهٔ هفتم تا دهم خود مراجعه کنید و افزون بر اینها از معلم خود نیز راهنمایی‌های لازم را بخواهید. آسان‌ترین فعالیت‌ها در فیزیک برای من کدام‌ها بوده‌اند؟ نخست این فعالیت‌ها را انجام دهید؛ این کار به ایجاد اعتمادبه‌نفس در شما کمک می‌کند. آیا اگر کتاب را پیش از کلاس خوانده باشم، مطلب را بهتر می‌فهمم یا پس از آن؟ آیا زمانی که صرف یادگیری فیزیک می‌کنم کافی است؟ برای من بهترین ساعت روز برای مطالعهٔ 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 می‌کنم؟

کار گروهی : دانشمندان و مهندسان به ندرت در انزوا کار می‌کنند؛ بلکه بیشتر با یکدیگر همکاری دارند. در آموزش مدرسه‌ای نیز اگر با دیگر دوستانتان کار کنید، هم فیزیک بیشتر می‌آموزید و هم از این یادگیری بیشتر لذت خواهید برد. امروزه بسیاری از معلمان به این همکاری گروهی و مشارکت در یادگیری در کلاس‌های درس توجه ویژه‌ای دارند.

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

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

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

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

• **گام دوم؛ آمادگی برای حل مسئله :** براساس مفهوم‌هایی که در گام اوّل برگزیده‌اید، معادله‌هایی را که برای حلّ 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 همهٔ متغیرهای معلوم و مجهول تهیه کنید. سپس معادله‌ها را حل کنید و مجهول‌ها را به دست آورید.

• **گام چهارم؛ ارزیابی پاسخ :** هدف شما از حلّ مسئلهٔ 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 اندازهٔ میدان مغناطیسی یک سیملولهٔ حامل جریان است، پاسخ شما نباید عدد بسیار بزرگی مانند ۵۰ تسلا باشد؛ در این صورت، حتماً چیزی در فرایند حلّ مسئله شما نادرست بوده است. بازگردید و روش کار خود را وارسی و راه‌حل را اصلاح کنید.

ب) سخنی با دبیران ارجمند

اهداف برنامهٔ آموزش فیزیک در دورهٔ متوسطه دوم، مطابق با برنامهٔ درسی ملّی در چهار عرصهٔ 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 مدّنظر حوزهٔ علوم‌تجربی 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 حلّ مسائل حال و آینده در ابعاد فردی و اجتماعی در قالب اندیشه یا ابزار ارائه دهد / به‌کار گیرد.

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

• با درک ماهیت، روش و فرایند علم تجربی، امکان به‌کارگیری این علم را در حلّ مسائل واقعی زندگی (حال و آینده)، تحلیل و محدودیت‌ها و توانمندی‌های علوم‌تجربی را در حلّ 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 دانش آموزان مؤثر است، شیوه‌های آموزش ما در کلاس درس است. این شیوه‌ها می‌توانند درهای درک و فهم مفاهیم فیزیک را برای همهٔ دانش‌آموزان، بدون توجه به توانایی علمی آنان، باز کند. بنابراین، می‌توان گفت شیوهٔ آموزش کارآمد کلید موفقیت هر برنامهٔ درسی است. انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربهٔ خود و به‌کارگیری شیوه‌های آموزشی مؤثر، بستر مناسبی برای یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش و همچنین شوق انگیزتر شدن فضای کلاس فراهم کنند.

در برنامهٔ 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 دبیرخانهٔ راهبری فیزیک، اتحادیهٔ 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 متوسطهٔ نظری

نظرسنجی کتاب درسی

۱

الکتریسیتهٔ 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 خازن‌ها است. با تماس انگشت با یک صفحهٔ لمسی، ظرفیت الکتریکی در آن محل عوض می‌شود که مدارهای الکترونیکی دستگاه می‌توانند آن تغییر را آشکار کنند.

شکل ۱ـ۱ توصیف آذرخش مبتنی بر اصول الکتریسیتهٔ ساکن است.

شکل ۱ـ ۲ انتقال پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب به‌صورت الکتریکی صورت می‌گیرد.

شکل ۱ـ۳ مالش بادکنک به بدن گربه سبب ایجاد بار الکتریکی در آنها و در نتیجه برافراشته شدن موهای گربه می‌شود.

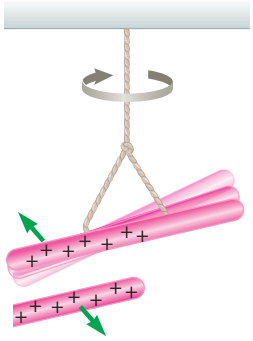
از آذرخش گرفته (شکل ۱ـ۱) تا درخشش لامپی کوچک، از آنچه اتم‌ها را به شکل مولکول به هم پیوند می‌دهد، تا پیام‌های عصبی در دستگاه اعصاب (شکل ۱ـ ۲)، و همچنین بسیاری از پدیده‌های دیگر مانند قابلیت چسبیدن نوار سلوفان بر ظروف و حتی بالا رفتن یک مارمولک از دیوار و بسیاری از وسیله‌های اطراف ما، همگی منشأ الکتریکی دارند. مبانی فیزیکی مرتبط با این پدیده‌ها نخستین بار مورد توجه فیلسوفان یونان قدیم قرار گرفت که دریافتند اگر قطعه‌ای از کهربا[1] با پارچهٔ پشمی مالش داده شود و سپس به خرده‌های کاه نزدیک گردد، آن خرده‌ها به سوی کهربا کشیده می‌شوند. امروز می‌دانیم این کشش ناشی از یک نیروی الکتریکی است. در واقع واژهٔ الکتریسیته از واژهٔ یونانی الکترون[2] گرفته شده است که به معنای کهرباست.

وقتی لباس‌های بافتنی را از تن خارج می‌کنیم، یا پس از اینکه چند قدم بر روی فرشی راه می‌رویم، دستگیرهٔ فلزی در را با دست بگیریم، عملاً وجود الکتریسیته را به صورت یک شوک الکتریکی حس می‌کنیم.

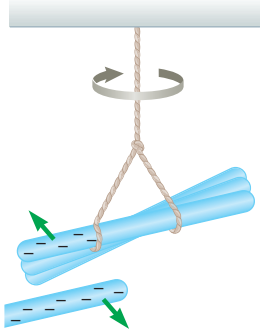
در این فصل، به مطالعهٔ بارهای ساکن می‌پردازیم که به آن الکتریسیتهٔ ساکن (الکتروستاتیک) می‌گویند و ضمن یادآوری مطالب الکتریسیتهٔ دورهٔ اوّل متوسطه، به جزئیات دقیق‌تری از چگونگی ایجاد بار الکتریکی در یک جسم، عوامل مؤثر بر نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی ذرّه‌ای، میدان الکتریکی، انرژی پتانسیل الکتریکی و اختلاف پتانسیل الکتریکی، توزیع بار در یک جسم رسانا و کاربرد خازن‌ها می‌پردازیم.

۱ـ۱ بار الکتریکی

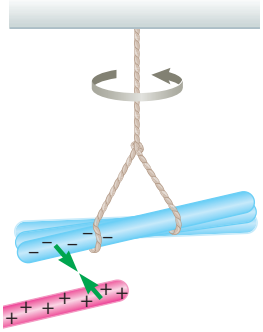
در کتاب علوم تجربی پایهٔ هشتم دیدید که معمولاً وقتی دو جسم با یکدیگر مالش داده می‌شوند، هر دوی آنها دارای بار الکتریکی می‌شوند (شکل ۱ـ۳) و بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند (شکل ۱ـ۴). از این تجربه‌ها نتیجه گرفتیم که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد. این دو نوع بار الکتریکی توسط دانشمند آمریکایی *بنیامین فرانکلین*، 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.



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



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



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.

شکل ۱ـ۴

۱ـ به صمغ فسیل شده درخت گفته می‌شود که به‌دلیل رنگ و زیبایی طبیعی، از دیرباز مورد توجه بوده است.

۲ـ واژه یونانی الکترون به‌صورت elektron نوشته می‌شود.

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

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

الف) تصویری از یک الکتروسکوپ درجه‌بندی‌شدهٔ بدون بار

شکل ۱ــ۵

یکای بار الکتریکی در SI، کولُن (C) است. توجه کنید یک کولُن مقدار بار بزرگی است. مثلاً در یک آذرخش نوعی، باری از مرتبهٔ $10\,C$ به زمین منتقل می‌شود و از این رو، در این فصل غالباً با بارهایی از مرتبهٔ میکروکولن (μC) و نانو کولن (nC) سروکار داریم. به عنوان مثال، در مالش شانهٔ پلاستیکی با موهای سر، بارهای منتقل شده از مرتبهٔ نانوکولن (nC) است.

پرسش ۱ــ۱

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؟

۱ــ۲ پایستگی و کوانتیده بودن بار الکتریکی

در یک اتم خنثی، تعداد الکترون‌ها برابر با تعداد پروتون‌های هسته است. بنابراین، جمع جبری همهٔ 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.

اندازهٔ بار منفی الکترون دقیقاً برابر با اندازهٔ بار مثبت پروتون است. این مقدار را بار بنیادی (با نماد e) می‌گویند که برابر است با[1]

$$e = 1/6021765 \times 10^{-19}\,C \approx 1/6 \times 10^{-19}\,C$$

بنیامین فرانکلین (۱۷۹۰ ــ ۱۷۰۶م)

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

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

در هنگام مالش، با انتقال تعدادی الکترون از یک جسم به جسمی دیگر، تعادل بارها در اتم خنثی بر هم می‌خورد و جسمی که الکترون از دست می‌دهد، تعداد الکترون‌هایش کمتر از تعداد پروتون‌های آن می‌شود و بار الکتریکی خالص آن مثبت می‌گردد و همچنین، جسمی که الکترون اضافی دریافت می‌کند، الکترون‌هایش از پروتون‌های آن فزونی می‌یابد و بار الکتریکی خالص آن منفی می‌شود. به‌دست آوردن یا از دست دادن الکترون دو جسم در تماس با یکدیگر را می‌توان براساس جدولی موسوم به سری الکتریسیتهٔ مالشی (تریبوالکتریک؛ Tribo در زبان یونانی به معنای مالش است) معلوم کرد (جدول ۱ــ۱). در این جدول مواد پایین‌تر، الکترون‌خواهی بیشتری دارند؛ یعنی اگر دو ماده در این جدول در تماس با یکدیگر قرار گیرند، الکترون‌ها از مادهٔ بالاتر جدول به ماده‌ای که پایین‌تر قرار دارد منتقل می‌شود. مثلاً اگر تفلون با نایلون مالش یابد، الکترون‌ها از نایلون به تفلون منتقل می‌شوند.

در مورد بارهای الکتریکی دو اصل وجود دارد. نخستین آنها اصل پایستگی بار است که بیان می‌دارد : مجموع جبری همهٔ بارهای الکتریکی در یک دستگاه منزوی[۲] ثابت است؛ یعنی بار می‌تواند 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 تجربه‌هایی مانند مالش اجسام به یکدیگر اگر جسم خنثی الکترون به دست آورد یا از دست بدهد، همواره بار الکتریکی مشاهده‌شدهٔ جسم، مضرب درستی از بار بنیادی e است :

$$q = \pm ne \quad , \quad n = ۰,۱,۲,\ldots \qquad (۱ــ۱)$$

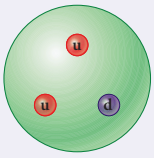
یک مثال آشنا از کوانتیده بودن یک کمیت، تعداد دانش‌آموزان یک کلاس یا تعداد تخم‌مرغ‌های درون یک ظرف است. برای مثال، ما نمی‌توانیم ۲۴/۳ دانش‌آموز در یک کلاس و یا ۱۲/۴ تخم‌مرغ در یک ظرف داشته باشیم.

جدول ۱ــ۱ سری الکتریسیته مالشی (تریبوالکتریک)[۱]

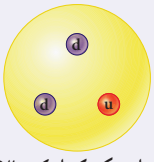
انتهای مثبت سری
موی انسان
شیشه
نایلون
پشم
موی گربه
سُرب
ابریشم
آلومینیم
پوست انسان
کاغذ
چوب
پارچهٔ کتان
کهربا
برنج، نقره
پلاستیک، پلی‌اتیلن
لاستیک
تفلون
انتهای منفی سری

خوب است بدانید

الکترون یک ذرّهٔ 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 شده‌اند. کوارک‌ها بار $-\frac{۱}{۳}e$ یا $+\frac{۲}{۳}e$ دارند، ولی این در تناقض با اصل کوانتیده بودن بار نیست؛ زیرا هیچ کوارک مستقلی مشاهده نشده است؛ یعنی این بارهای کسری نمی‌توانند به‌طور مستقل دیده شوند. مثلاً یک پروتون از دو کوارک بالا[۴] (u) هر یک با بار $+\frac{۲}{۳}e$ و یک کوارک پایین[۵] (d) با بار $-\frac{۱}{۳}e$ ساخته شده است که بار خالص پروتون را برابر $+e$ به‌دست می‌دهد، یا نوترون از یک کوارک بالا و دو کوارک پایین ساخته شده است که بار خالص صفر را به دست می‌دهد.



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.

۱ــ نیازی به حفظ این جدول نیست.

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

۳ــ Quark ۴ــ up ۵ــ down

مثال ۱ــ۱

وقتی روی فرش راه می‌روید و بدنتان بار الکتریکی پیدا می کند، هنگام دست دادن با دوستتان، ممکن است با انتقال باری در حدود ۱ nC به او شوک خفیفی وارد کنید. در این انتقال بار، حدود چند الکترون بین شما و دوستتان منتقل شده است؟

پاسخ : از رابطه ۱ــ۱ داریم :

$$q=ne$$

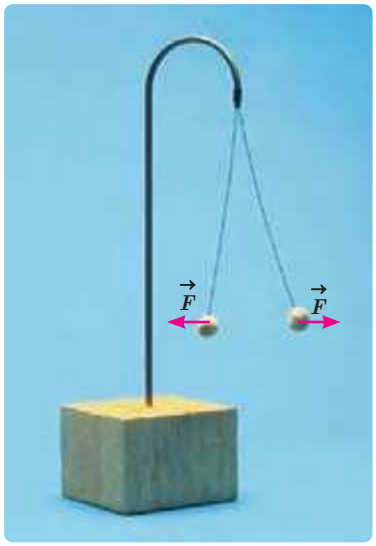
$$n=\frac{q}{e}=\frac{۱\times۱۰^{-۹}\,\mathrm{C}}{۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,\mathrm{C}}=۶\times۱۰^{۹}$$ الکترون

تمرین ۱ــ۱

عدد اتمی اورانیوم $Z=۹۲$ است. بار الکتریکی هستهٔ اتم اورانیم چقدر است؟ مجموع بار الکتریکی الکترون‌های اتم اورانیم (خنثی) چه مقدار است؟ بار الکتریکی اتم اورانیم (خنثی) چقدر است؟

۱ــ۳ قانون کولُن

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 ۱ــ۶). و اگر ناهمنام باشند، این نیرو جاذبه است.

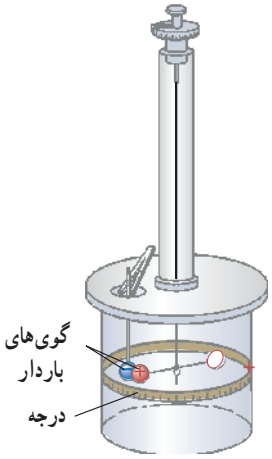


شکل ۱ــ۶ گوی‌های باردار همنام یکدیگر را با نیرویی هم‌اندازه دفع کرده‌اند.

فعالیت ۱ــ۱ (کار در کلاس)

مطابق شکل، دو نیِ 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 دافعهٔ آنها را می‌توانید به وضوح بر روی انگشتان خود حس کنید.

نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار، به چه عامل‌هایی بستگی دارد و اندازهٔ این نیروها را از چه رابطه‌ای می‌توان محاسبه کرد؟ *شارل آگوستین کولُن*، دانشمند فرانسوی برای نخستین بار با انجام آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای توانست عامل‌های مؤثر بر نیروی الکتریکی بین دو ذرّهٔ باردار را که اصطلاحاً بار نقطه‌ای خوانده می‌شود، شناسایی کند. نتیجهٔ آزمایش‌های او امروزه به نام **قانون کولن** خوانده می‌شود. شکل ۱ــ۷ طرحی از آزمایش کولن را نشان می‌دهد.



شکل ۱ــ۷ ترازوی پیچشی کولن. در یک سر یک میلهٔ نارسانای سبک افقی یک گوی باردار مثبت کوچک و در سر دیگر آن، یک قرص قرار دارد و میله از وسط توسط یک رشته سیم کشسان و نازک آویخته شده است. یک گوی با بار منفی از حفره‌ای به داخل استوانهٔ شیشه‌ای برده می‌شود. درجه‌هایی بر سطح استوانه حک شده است که زاویهٔ چرخش میله را نشان می‌دهد. نیروی مؤثر بین این بارها از اندازه‌گیری زاویهٔ چرخش تا رسیدن به حالت تعادل به‌دست می‌آید.

قانون کولن بیان می‌دارد :

اندازهٔ نیروی الکتریکی (الکتروستاتیکی) بین دو بار نقطه‌ای[1] که در راستای خط واصل آنها اثر می‌کند، با حاصل‌ضرب بزرگی آنها متناسب است و با مربع فاصلهٔ بین آنها نسبت وارون دارد. بنابراین، اندازهٔ این نیرو برابر است با

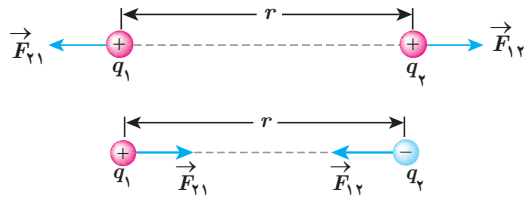
$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2} \qquad (۱ــ۲)$$

که در آن q_1 و q_2 بارهای الکتریکی دو بار نقطه‌ای برحسب کولن (C)، r فاصلهٔ 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[2]

$$k = ۸/۹۸۷۵۵۱۷۹\times۱۰^۹\ \mathrm{N.m^2/C^2} \approx ۹/۰\times۱۰^۹\ \mathrm{N.m^2/C^2}$$

در شکل ۱ــ۸، $\vec{F}_{12}$ نیرویی است که بار نقطه‌ای q_1 به بار نقطه‌ای q_2 وارد می‌کند و $\vec{F}_{21}$ نیرویی است که بار نقطه‌ای q_2 به بار نقطه‌ای q_1 وارد می‌کند. این دو نیروی الکتریکی (بنا به قانون سوم نیوتون) هم‌اندازه، هم‌راستا، و در خلاف جهت همدیگرند. به عبارتی :

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



شکل ۱ــ۸

الف) نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی همنام، دافعه است.

ب) نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی ناهمنام، جاذبه است.

شارل آگوستین کولن (۱۸۰۶ ــ 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 ذرّه‌ای با مربع فاصلهٔ بین آنها نسبت وارون دارد، به چاپ رساند. نتیجهٔ 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.

ثابت کولن (k) را می‌توان بر حسب یک ضریب ثابت دیگر به نام ضریب گذردهی الکتریکی خلأ (ε_0) نیز نوشت :

$$k = \frac{۱}{۴\pi\varepsilon_0}$$

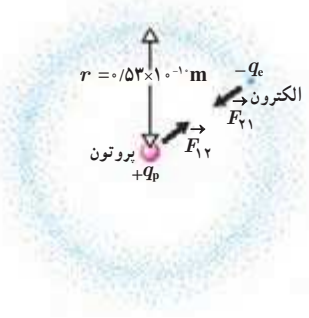
که در آن

$$\varepsilon_0 = ۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\ \mathrm{C^2/N.m^2}$$

۱ــ در این بخش با نیروهای بین ذرّه‌های باردار (بارهای نقطه‌ای) سر و کار داریم. البته اگر فاصلهٔ یک جسم باردار با جسم باردار دیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هریک از دو جسم در مقایسه با فاصلهٔ بین آنها چشم‌پوشی کرد، می‌توان دو جسم را به صورت ذرّه‌های باردار در نظر گرفت.

۲ــ به ذهن سپردن این اعداد لازم نیست.

مثال ۱ـ۲



الف) در مدل بور برای اتم هیدروژن، فاصله الکترون از پروتون هسته در حالت پایه $۵/۳\times۱۰^{-۱۱}\,m$ است (شکل را ببینید). اندازهٔ نیروی الکتریکی که پروتون به الکترون وارد می‌کند را محاسبه کنید.

ب) در هستهٔ اتم هلیم دو پروتون به فاصلهٔ تقریبی $r = ۲/۴\times۱۰^{-۱۵}\,m$ از هم قرار دارند. اندازهٔ نیرویی که پروتون‌ها بر هم وارد می‌کنند را محاسبه کنید.

پاسخ :

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

$$F = k\frac{|q_۱||q_۲|}{r^۲} = k\frac{|q_e||q_p|}{r^۲} = (۹/۰\times۱۰^{۹}\,N.m^۲/C^۲)\frac{(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,C)^۲}{(۵/۳\times۱۰^{-۱۱}\,m)^۲} = ۸/۲\times۱۰^{-۸}\,N$$

ب) با استفاده از قانون کولن داریم :

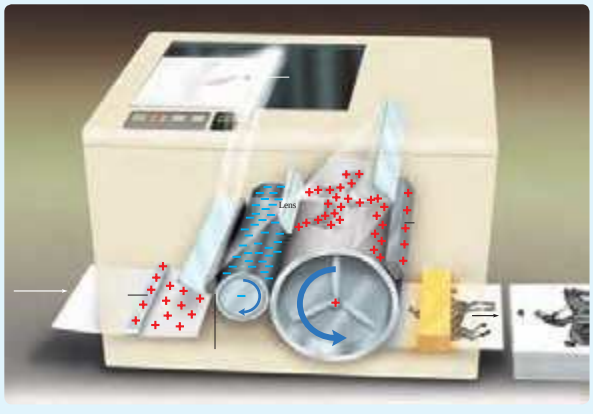
$$F = k\frac{|q_p||q_p|}{r^۲} = (۹/۰\times۱۰^{۹}\,N.m^۲/C^۲)\frac{(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,C)^۲}{(۲/۴\times۱۰^{-۱۵}\,m)^۲} = ۴۰\,N$$

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

خوب است بدانید

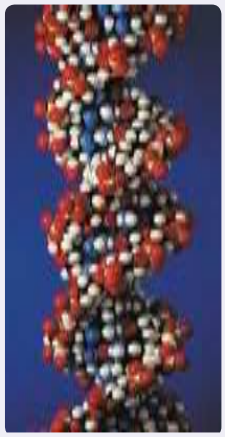
تمامی اجسام به علت جرمشان بر یکدیگر نیروی گرانشی نیز وارد می کنند که همواره از نوع جاذبه است. بزرگی این نیرو برای الکترون و پروتون اتم هیدروژن از مرتبه $۱۰^{-۴۷}\,N$ است. بنابراین، در حدود $۱۰^{۴۰}$ بار کوچک‌تر از نیروی الکتریکی بین این دو ذرّه است و این نشان می‌دهد نیروی گرانشی به مراتب ضعیف‌تر از نیروی الکتریکی است.

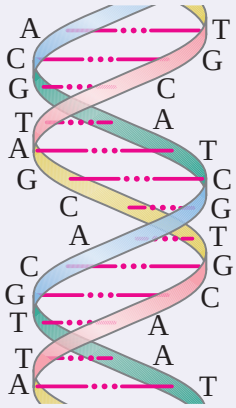
فعالیت ۱ـ۲



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 دستورهایی 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 نگسلد، اما به حد کافی ضعیف نیز هست تا در فرایند رونویسی از هم گسیخته گردد.

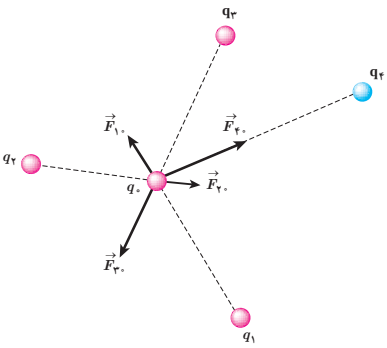
برهم‌نهی نیروهای الکتروستاتیکی : اگر به جای دو ذرّهٔ باردار، تعدادی بار نقطه‌ای داشته باشیم، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذرّهٔ باردار چگونه تعیین می‌شود؟ تجربه نشان می‌دهد که در این وضعیت، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذرّه، برایند نیروهایی است که هر یک از ذرّه‌های دیگر در غیاب سایر ذرّه‌ها، بر آن ذرّه وارد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

فرض کنید n ذرّهٔ باردار داشته باشیم که در نزدیکی بار نقطه‌ای q_0 قرار دارند. آن‌گاه نیروی خالص (برایند) وارد بر بار نقطه‌ای q_0 با جمع برداری زیر داده می‌شود :

$$\vec{F}_{T_0} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} + \cdots + \vec{F}_{n0}$$

شکل ۱ــ ۹ نیروی وارد بر بار q_0 از سوی چهار بار دیگر را نشان می‌دهد.

در این کتاب، مثال‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها نیروهای الکتریکی وارد بر یک ذرّهٔ باردار در یک راستا قرار دارند یا عمود بر یکدیگرند [۱].

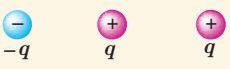


شکل ۱ــ ۹ نیروی برایند وارد بر بار q_0 در اینجا برابر است با
$\vec{F}_{T0} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} + \vec{F}_{30} + \vec{F}_{40}$

پرسش ۱ــ ۲

سه ذرّه 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.

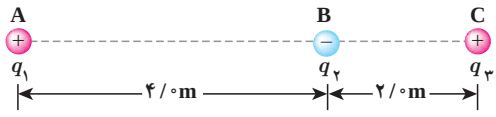
ب) اگر ذرّهٔ سمت راست به جای q، بار $-q$ داشته باشد، جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار میانی چگونه خواهد بود؟



۱ــ بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا و یا عمود برهم نیستند، خارج از برنامهٔ درسی این کتاب بوده و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

مثال ۱ــ ۳

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



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

فاصلهٔ بین بارهای q_1 و q_3 را با r_{13} و فاصلهٔ بین بارهای q_2 و q_3 را با r_{23} نشان می‌دهیم. با استفاده از رابطهٔ ۱ــ ۲ داریم :

$$F_{13}=k\frac{|q_1||q_3|}{r_{13}^2}=(9/0\times10^9\,N.m^2/C^2)\frac{(2/5\times10^{-6}\,C)(4/0\times10^{-6}\,C)}{(6/0\,m)^2}$$

$$=2/5\times10^{-3}N$$

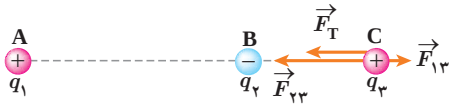
$$F_{23}=k\frac{|q_2||q_3|}{r_{23}^2}=(9/0\times10^9\,N.m^2/C^2)\frac{(1/0\times10^{-6}\,C)(4/0\times10^{-6}\,C)}{(2/0\,m)^2}$$

$$=9/0\times10^{-3}N$$

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

مطابق شکل، نیروهای $\vec{F}_{13}$ و $\vec{F}_{23}$ در جهت‌های مخالف یکدیگرند و برایند آنها برابر است با

$$\vec{F}_T=\vec{F}_{23}+\vec{F}_{13}$$



بنابراین، اندازهٔ نیروی برایند برابر با تفاضل اندازهٔ آنهاست :

$$F_T=F_{23}-F_{13}=6/5\times10^{-3}\,N$$

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

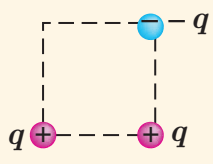
$$\vec{F}_T=(-6/5\times10^{-3}\,N)\,\vec{i}$$

تمرین ۱ــ ۲

در مثال ۱ــ ۳، نیروی خالص وارد بر بار q_3 را به‌دست آورید.

پرسش ۱ــ ۳

سه ذرّهٔ باردار مطابق شکل روبه‌رو، در سه گوشهٔ یک مربع قرار دارند.

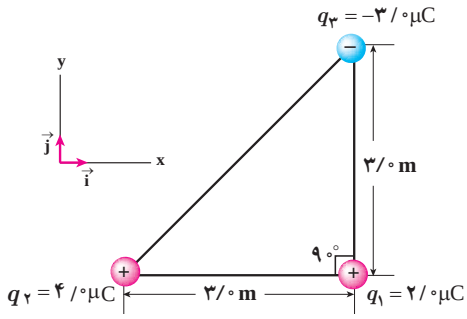


الف) جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار سمت راست پایینی را تعیین کنید.

ب) اگر ذرّهٔ سمت چپ پایینی به جای q، بار $q-$ داشته باشد، جهت نیروی الکتریکی خالص وارد بر بار سمت راست پایینی چگونه خواهد بود؟

مثال ۱ــ ۴

سه ذرّهٔ باردار مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ای ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی خالص وارد بر ذرّهٔ واقع در رأس قائمه را به‌دست آورده و اندازهٔ این نیرو را محاسبه کنید.



پاسخ : نیروی الکتریکی بین بارهای $q_۱$ و $q_۲$ دافعه و نیروی بین بارهای $q_۱$ و $q_۳$، جاذبه است. با استفاده از رابطهٔ ۱ــ ۲ داریم :

$$F_{۲۱} = k\frac{|q_۲||q_۱|}{r_{۲۱}^۲} = (۹/۰\times۱۰^۹ \mathrm{N.m^۲/C^۲})\frac{(۴/۰\times۱۰^{-۶}\mathrm{C})(۲/۰\times۱۰^{-۶}\mathrm{C})}{(۳/۰\mathrm{m})^۲} = ۸/۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده، $\vec{F}_{۲۱}$ در جهت مثبت محور x است. بنابراین، $\vec{F}_{۲۱} = (۸/۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{N})\,\vec{i}$ می‌شود.

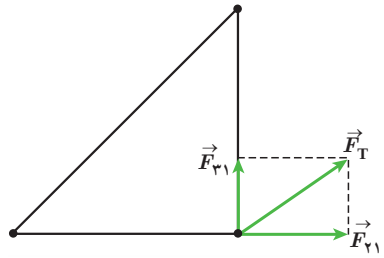
به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای $q_۳$ و $q_۱$ داریم :

$$F_{۳۱} = k\frac{|q_۳||q_۱|}{r_{۳۱}^۲} = (۹/۰\times۱۰^۹ \mathrm{N.m^۲/C^۲})\frac{(۳/۰\times۱۰^{-۶}\mathrm{C})(۲/۰\times۱۰^{-۶}\mathrm{C})}{(۳/۰\mathrm{m})^۲} = ۶/۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{N}$$

با توجه به دستگاه مختصات داده شده، $\vec{F}_{۳۱}$ در جهت مثبت محور y است. بنابراین، $\vec{F}_{۳۱} = (۶/۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{N})\,\vec{j}$ می‌شود.

پس برایند نیروهای الکتریکی وارد بر بار $q_۱$ برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{۲۱} + \vec{F}_{۳۱} = (۸/۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{N})\,\vec{i} + (۶/۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{N})\,\vec{j}$$



و بزرگی آن با استفاده از رابطهٔ فیثاغورس، چنین به‌دست می‌آید :

$$F_T = \sqrt{F_{۲۱}^۲ + F_{۳۱}^۲} = \sqrt{(۸/۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{N})^۲ + (۶/۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{N})^۲} = ۱/۰\times۱۰^{-۲}\mathrm{N}$$

تمرین ۱ــ ۳

در مثال ۱ــ ۴؛ الف) اگر علامت بار $q_۳$ تغییر کند جهت نیروی برایند وارد بر بار $q_۱$ چگونه خواهد شد؟

ب) اگر علامت بار $q_۲$ تغییر کند، جهت نیروی برایند وارد بر بار $q_۱$ چگونه خواهد شد؟

پ) آیا اندازهٔ نیروی برایند وارد بر بار $q_۱$ در قسمت‌های الف و ب با مقدار به دست آمده در مثال ۱ــ ۴ متفاوت است؟

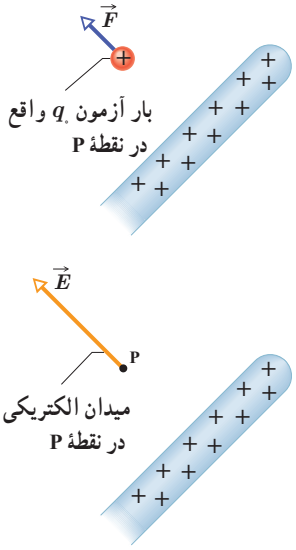
۱ــ۴ میدان الکتریکی

در بخش ۱ــ۱ دیدیم که دو بار الکتریکی $q_۱$ و $q_۲$ که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار دارند، برهم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. ولی این پرسش مطرح می‌شود که بارهای $q_۱$ و $q_۲$ چطور حضور یکدیگر را حس می‌کنند؟ به‌عبارت دیگر، این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می‌توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ در فیزیک پاسخ این پرسش این‌گونه است که بار $q_۱$ خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می‌کند که به آن اصطلاحاً میدان الکتریکی بار $q_۱$ گفته می‌شود. وقتی بار $q_۲$ را در نقطه‌ای از فضای پیرامون بار $q_۱$ قرار دهیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی‌ای قرار می‌گیرد که بار $q_۱$ پیش‌تر در آن نقطه ایجاد کرده است. بنابراین، بار $q_۱$، نه با تماس با بار $q_۲$ بلکه به‌وسیلهٔ میدان الکتریکی خودش بر بار $q_۲$ نیرو وارد می‌کند.

میدان الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف یک جسم باردار الکتریکی به صورت زیر تعیین می‌شود : نخست بار کوچک و مثبت q_0 موسوم به بار آزمون[1] 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 به‌صورت زیر تعریف می‌شود :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \qquad (۱ــ۳)$$

بنا به تعریف میدان الکتریکی (رابطهٔ ۱ــ۳)، میدان الکتریکی کمیتی برداری است که اندازهٔ آن برابر $E = \frac{F}{q_0}$ و جهت آن همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون است. مثلاً شکل ۱ــ ۱۰ قسمتی از میلهٔ بارداری را نشان می‌دهد که بر بار آزمون واقع در نقطهٔ P نیرو وارد می‌کند. پس میدان در این نقطه، براساس این نیرو تعریف می‌شود.



شکل ۱ــ ۱۰ میلهٔ باردار میدانی الکتریکی ایجاد می‌کند و به وسیلهٔ این میدان بر بار آزمون نیرو وارد می‌کند.

در رابطهٔ ۱ــ۳ یکای میدان الکتریکی ($\vec{E}$)، نیوتون بر کولن (N/C) است. بزرگی برخی از میدان‌های الکتریکی در جدول ۱ــ ۲ داده شده است.

جدول ۱ــ۲ بزرگی برخی از مقادیر میدان‌های الکتریکی

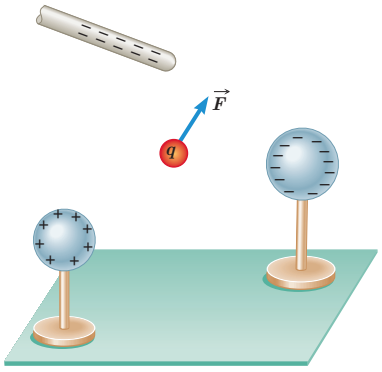
چشمه	بزرگی میدان (N/C)	چشمه	بزرگی میدان (N/C)
سیم‌کشی‌های داخل منزل	10^{-2}	در نزدیکی شانهٔ باردار	$\approx 10^{3}$
امواج رادیویی	$\approx 10^{-1}$	در نزدیکی فرستندهٔ رادار	7×10^{3}
گوشی همراه	۵۰ ــ ۳۵	جو (توفان تندری)	10^{4}
۳۰ سانتی‌متری از یک دستگاه پخش صوت	۹۰	در نزدیکی سطح کلاهک مولد وان‌دوگراف	2×10^{6}
جو (هوای آرام)	≈ 150	فرو ریزش الکتریکی در هوا	3×10^{6}
آفتاب (متوسط)	10^{3}	در سطح هستهٔ اورانیم	2×10^{21}

مثال ۱ــ۵

بار آزمون نشان داده شده در شکل $q_0 = +3/0\times10^{-8}\,C$ است و از سوی دو گوی و یک میلهٔ باردار نیرویی برابر با $F = 6/0\times10^{-5}\,N$ در جهت نشان داده شده بر آن وارد می‌شود.

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

ب) اگر بار $+12\times10^{-8}\,C$ را به جای q_0 قرار دهیم، چه نیرویی به آن وارد می‌شود؟



۱ــ بار آزمون باید آن‌قدر کوچک باشد که توزیع بار جسم را برهم نزند.

پاسخ : الف) بزرگی میدان الکتریکی با استفاده از رابطهٔ ۱ــ ۳ برابر است با

$$E=\frac{F}{q_0}=\frac{۶/۰\times۱۰^{-۵}\,\mathrm{N}}{۳/۰\times۱۰^{-۸}\,\mathrm{C}}=۲/۰\times۱۰^{۳}\,\mathrm{N/C}$$

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

ب) دوباره با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۳ داریم :

$$F=q_0E=(۱۲\times۱۰^{-۸}\,\mathrm{C})(۲/۰\times۱۰^{۳}\,\mathrm{N/C})=۲۴\times۱۰^{-۵}\,\mathrm{N}$$

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

خوب است بدانید: میدان الکتریکی مخازن نفت‌کش‌ها

وقتی آب به سطحی برخورد کند و از آن بپاشد، قطره‌های آب باردار می‌شوند. معمولاً قطره‌های بزرگ‌تر، دارای بار مثبت و قطره‌های کوچک‌تر، دارای بار منفی می‌شوند. قطره‌های بزرگ‌تر نسبتاً سریع فرو می‌افتند و قطره‌های کوچک‌تر که دارای بار منفی‌اند بیشتر در هوا می‌مانند. اگر تهویهٔ هوا کم باشد، تعداد قطره‌های موجود در هوا به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و بدین ترتیب، یک میدان الکتریکی بزرگ (حدود ۸۰۰ N/C) ایجاد می‌شود؛ این وضعیتی است که معمولاً در حمام رخ می‌دهد. به همین ترتیب، در حین تمیزکردن مخازن کشتی‌های نفت‌کش، وقتی قطره‌های آب به صورت افشانه از شیلنگ خارج شده و بر کف مخزن یا دیواره‌های آن می‌پاشند، باردار می‌شوند و در نتیجه مخزن پر از بخار آب باردار می‌شود. ممکن است این ذرات باردار با نوک فلزی آب‌فشان شیلنگ جرقه بزنند. اگر مخزن محتوای بخار نفت خام باشد، این جرقه‌ها می‌توانند بخار را مشتعل کنند و باعث انفجار مخزن گردند. برای رفع این خطر، پیش از تمیز کردن مخزن، یک گاز بی‌اثر به درون آن پمپ می‌شود تا اکسیژن موجود به اندازه‌ای کاهش یابد که از بروز انفجار جلوگیری کند.

۱ــ۵ میدان الکتریکی حاصل از یک ذرهٔ باردار

شکل ۱ــ ۱۱ می‌خواهیم میدان حاصل از ذرهٔ باردار q را در نقطهٔ A محاسبه کنیم.

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

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

در نتیجه :

$$E=k\frac{|q|}{r^2} \qquad (۴ــ۱)$$

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

مثال ۱ــ۶

مولّد وان دوگراف[1] 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 ۰/۱۰m است و باری به بزرگی ۱/۰μC روی آن جمع می‌شود. با فرض آنکه همهٔ این بار در مرکز کره قرار داشته باشد، بزرگی میدان الکتریکی این بار را در فاصله‌های ۱/۰m، ۲/۰m، ۳/۰m و ۴/۰m، از مرکز کره به دست آورید و سپس با نقطه‌یابی، نمودار بزرگی میدان الکتریکی را برحسب فاصله از مرکز کره رسم کنید.

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۴ بزرگی میدان را در نقطه‌های مورد نظر به دست می‌آوریم :

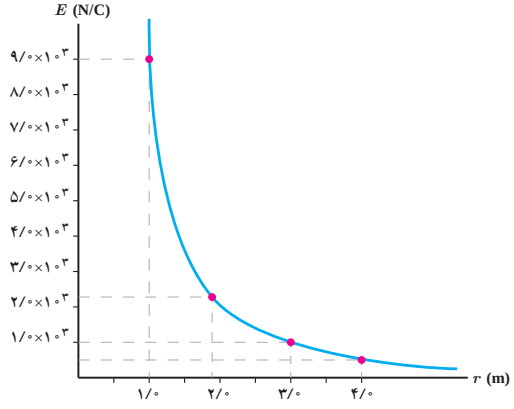
$$E = k\frac{|q|}{r^2}$$

$$E_1 = (9/0\times10^9\,\mathrm{N.m^2/C^2})\frac{(1/0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(1/0\,\mathrm{m})^2} = 9/0\times10^3\,\mathrm{N/C}$$

$$E_2 = (9/0\times10^9\,\mathrm{N.m^2/C^2})\frac{(1/0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(2/0\,\mathrm{m})^2} = 2/25\times10^3\,\mathrm{N/C} \approx 2/3\times10^3\,\mathrm{N/C}$$

$$E_3 = (9/0\times10^9\,\mathrm{N.m^2/C^2})\frac{(1/0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(3/0\,\mathrm{m})^2} = 1/0\times10^3\,\mathrm{N/C}$$

$$E_4 = (9/0\times10^9\,\mathrm{N.m^2/C^2})\frac{(1/0\times10^{-6}\,\mathrm{C})}{(4/0\,\mathrm{m})^2} = 0/5625\times10^3\,\mathrm{N/C} \approx 0/56\times10^3\,\mathrm{N/C}$$



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

برای مشاهدهٔ تجربی نتایج مثال ۱ــ۶ 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 وان‌دوگراف قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید شعلهٔ شمع نزدیک‌تر به سمت کلاهک کشیده شده است، در حالی‌که شعلهٔ شمع دورتر تغییر چندانی نکرده است. دلیل آن است که کلاهک مولد وان‌دوگراف بار منفی بزرگی دارد که یون‌های مثبت شعلهٔ شمع نزدیک‌تر را به سمت خود می‌کشد، در حالی‌که شمع دیگر در فاصلهٔ دوری از کلاهک قرار گرفته است که تحت تأثیر میدان الکتریکی ضعیف‌تری قرار می‌گیرد.

۱ــ Van de Graaff generator

تمرین ۱ــ۴

طبق *مدل بور* برای اتم هیدروژن، در حالت پایه فاصلهٔ الکترون از پروتون هسته برابر با $۵/۳\times۱۰^{-۱۱}\,m$ است.

الف) اندازهٔ 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 وان‌دوگراف مثال پیش در فاصلهٔ $۱/۰\,m$ از مرکز کلاهک آن است؟

برهم‌نهی میدان‌های الکتریکی : اگر چند بار الکتریکی ذرّه‌ای داشته باشیم، میدان الکتریکی ناشی از این بارها، در نقطه‌ای از فضا چگونه تعیین می‌شود؟ در بخش ۱ــ۴ دیدیم اگرچند بار نقطه‌ای مانند $q_۱$ ، $q_۲$ ، ... داشته باشیم نیروی الکتریکی برایند حاصل از این بارها بر بار آزمون $q_۰$ با استفاده از اصل برهم نهیِ نیروهای کولنی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

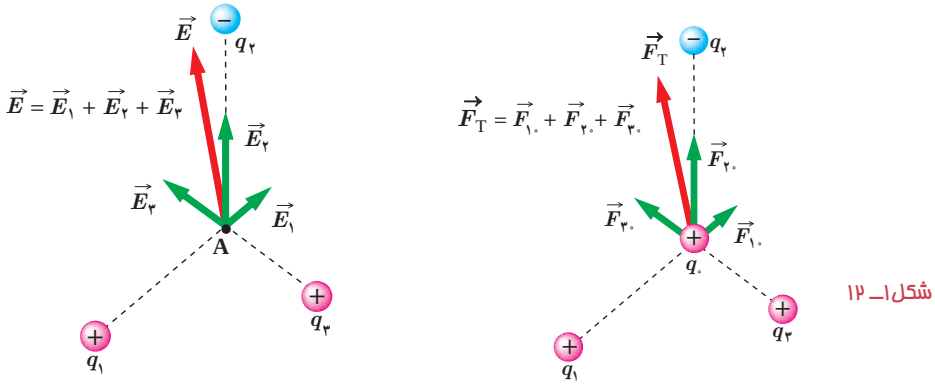
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{۱۰} + \vec{F}_{۲۰} + \dots$$

حال اگر بخواهیم میدان الکتریکی را در محل بار آزمون به دست آوریم، با استفاده از تعریف میدان الکتریکی ($\vec{E} = \vec{F}/q_۰$) دو طرف معادلهٔ بالا را بر $q_۰$ تقسیم می‌کنیم. آن‌گاه خواهیم داشت :

$$\frac{\vec{F}_T}{q_۰} = \frac{\vec{F}_{۱۰}}{q_۰} + \frac{\vec{F}_{۲۰}}{q_۰} + \dots$$

$$\vec{E} = \vec{E}_۱ + \vec{E}_۲ + \dots \qquad (۵ــ۱)$$

این رابطه که موسوم به اصل برهم‌نهیِ 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 نبودِ سایر بارها در آن نقطه از فضا ایجاد می‌کند؛ یعنی برای یافتن میدان الکتریکی خالص حاصل از چند ذرّهٔ باردار در نقطه‌ای از فضا باید نخست میدان الکتریکی ناشی از هر ذرّه را در آن نقطه به دست آورد و سپس این میدان‌ها را به صورت برداری با یکدیگر جمع کرد. مثلاً شکل ۱ــ۱۲ ــ 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].



شکل ۱ــ۱۲

الف) نیروی $\vec{F}_T$ ، نیروی برآیند وارد بر بار آزمون $q_۰$ است.

ب) میدان الکتریکی $\vec{E}$ در محل بار آزمون، جمع برداری میدان‌های $\vec{E}_۱$ ، $\vec{E}_۲$ و $\vec{E}_۳$ در محل این بار است.

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

مثال ۱ــ ۷

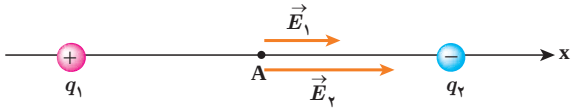
مطابق شکل، دو ذرّه با بارهای $q_1=+4/0\,\mu C$ و $q_2=-6/0\,\mu C$ در فاصلهٔ $8/0\,m$ از یکدیگر ثابت شده‌اند. اندازهٔ میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های زیر به‌دست آورید :

الف) در وسط خط واصل دو ذرّه،

ب) در نقطه‌ای روی خط واصل دو ذرّه به فاصلهٔ $8/0\,m$ از بار q_1 و $16\,m$ از بار q_2.

پاسخ : در غیاب هر یک از دو ذرّه، میدان حاصل از بار دیگر را محاسبه می‌کنیم. میدانِ حاصل از مجموعهٔ دو بار، برایند این دو میدان خواهد بود.

الف) در شکل اگر بار آزمون را در نقطهٔ A واقع در وسط خط واصل دو ذرّه 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 نقطهٔ A هم‌جهت و به سوی بار q_2 (در سوی مثبت محور x) هستند.



بنابر اصل برهم‌نهیِ میدان‌های الکتریکی داریم :

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

مقادیر E_1 و E_2 را با استفاده از رابطهٔ **۱ــ۴** به‌دست می‌آوریم :

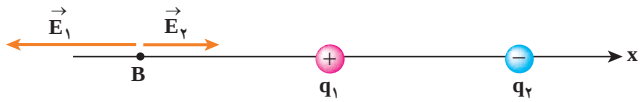
$$E_1=k\frac{|q_1|}{r_1^2}=(9/0\times10^9\,N.m^2/C^2)\frac{(4/0\times10^{-6}\,C)}{(4/0\,m)^2}=2/25\times10^3\,N/C\approx2/3\times10^3\,N/C$$

$$E_2=k\frac{|q_2|}{r_2^2}=(9/0\times10^9\,N.m^2/C^2)\frac{(6/0\times10^{-6}\,C)}{(4/0\,m)^2}=3/375\times10^3\,N/C\approx3/4\times10^3\,N/C$$

بنابراین :

$$\vec{E}_A\simeq(2/3\times10^3\,N/C)\,\vec{i}+(3/4\times10^3\,N/C)\,\vec{i}=(5/7\times10^3\,N/C)\,\vec{i}$$

ب) اکنون اگر بار آزمون را در نقطهٔ B قرار دهیم شکل میدان‌های الکتریکی به‌صورت زیر در می‌آید :



با استفاده از اصل برهم‌نهیِ میدان‌های الکتریکی داریم :

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

که در آن E_1 و E_2 برابرند با

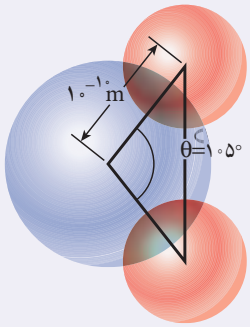
$$E_1=k\frac{|q_1|}{r_1^2}=(9/0\times10^9\,N.m^2/C^2)\frac{(4/0\times10^{-6}\,C)}{(8/0\,m)^2}=5/625\times10^2\,N/C\approx5/6\times10^2\,N/C$$

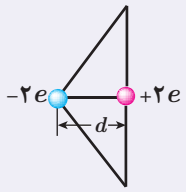
$$E_2=k\frac{|q_2|}{r_2^2}=(9/0\times10^9\,N.m^2/C^2)\frac{(6/0\times10^{-6}\,C)}{(16\,m)^2}=2/109\times10^2\,N/C\approx2/1\times10^2\,N/C$$

بنابراین :

$$\vec{E}_B\simeq(-5/6\times10^2\,N/C)\,\vec{i}+(2/1\times10^2\,N/C)\,\vec{i}=(-3/5\times10^2\,N/C)\,\vec{i}$$

خوب است بدانید



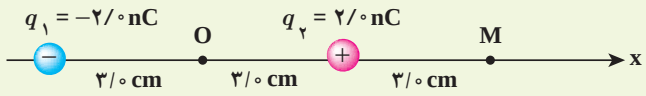


دوقطبی الکتریکی آرایشی از بارهای الکتریکی است که در آن دو ذرّه با بزرگی بار q یِ یکسان و علامت مخالف در فاصلهٔ d از هم روی محوری که به آن محور دوقطبی گفته می‌شود قرار گرفته‌اند.

مولکول آب (H_2O) از دو اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن ساخته شده است. اتم اکسیژن الکترون‌های دو اتم هیدروژن را به سمت خود می‌کشد و بدین ترتیب اتم‌های هیدروژن بار مثبت و خودش بار منفی پیدا می‌کند. این سه اتم مطابق شکل به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که خطوط وصل کنندهٔ مراکز اتم‌های هیدروژن به مرکز اتم اکسیژن، زاویهٔ 105° با یکدیگر می‌سازند. با فرض اینکه کل بار مثبت ($+2e$) دقیقاً در میانهٔ 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.

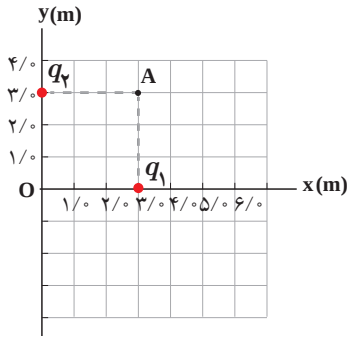
تمرین ۱ــ۵

شکل زیر، آرایشی از دو بار الکتریکی هم‌اندازه و غیرهمنام (دوقطبی الکتریکی) را نشان می‌دهد که در آن فاصلهٔ دو بار از هم ۶/۰ cm است. میدان الکتریکی خالص را در نقطه‌های O و M به‌دست آورید.

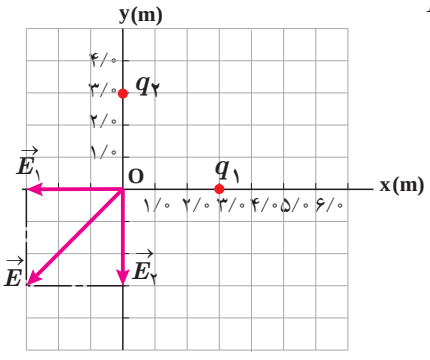


مثال ۱ــ۸

شکل روبه‌رو، دو بار نقطه‌ای q_1 و q_2 را در صفحهٔ xy نشان می‌دهد. میدان الکتریکی خالص را در نقطهٔ O (مبدأ مختصات) تعیین کنید. ($q_1 = q_2 = 5/0\ \mu C$)



پاسخ : در نقطهٔ O میدان‌های الکتریکی مانند شکل زیر می‌شوند؛ چون بارها با هم برابر و فاصلهٔ آنها تا نقطهٔ O نیز یکسان است، پس اندازهٔ میدان‌ها در این نقطه با هم برابرند :



$$E_1 = E_2 = k\frac{|q|}{r^2} = (9/0\times10^9\ N.m^2/C^2)\frac{(5/0\times10^{-6}\ C)}{(3/0\ m)^2} = 5/0\times10^3\ N/C$$

$$\vec{E}_1 = (-5/0\times10^3\ N/C)\,\vec{i} \quad و \quad \vec{E}_2 = (-5/0\times10^3\ N/C)\,\vec{j}$$

در نتیجه میدان الکتریکی خالص برابر است با

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

$$\vec{E} = (-5/0\times10^3\ N/C)\,\vec{i} + (-5/0\times10^3\ N/C)\,\vec{j}$$

و از آنجا اندازهٔ میدان الکتریکی خالص چنین می‌شود :

$$E = \sqrt{(-5/0\times10^3\ N/C)^2 + (-5/0\times10^3\ N/C)^2}$$

$$= 7/07\times10^3\ N/C \approx 7/1\times10^3\ N/C$$

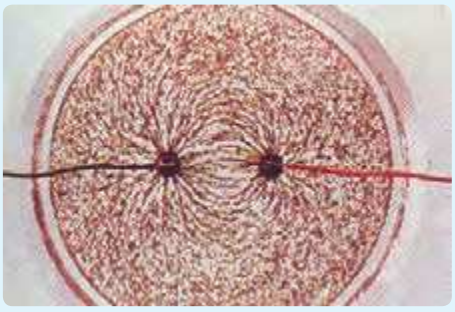
تمرین ۱ــ۶

میدان الکتریکی خالص حاصل از آرایش بار مثال ۱ــ۸ را در نقطهٔ A تعیین کنید.

۱ــ۶ خطوط میدان الکتریکی

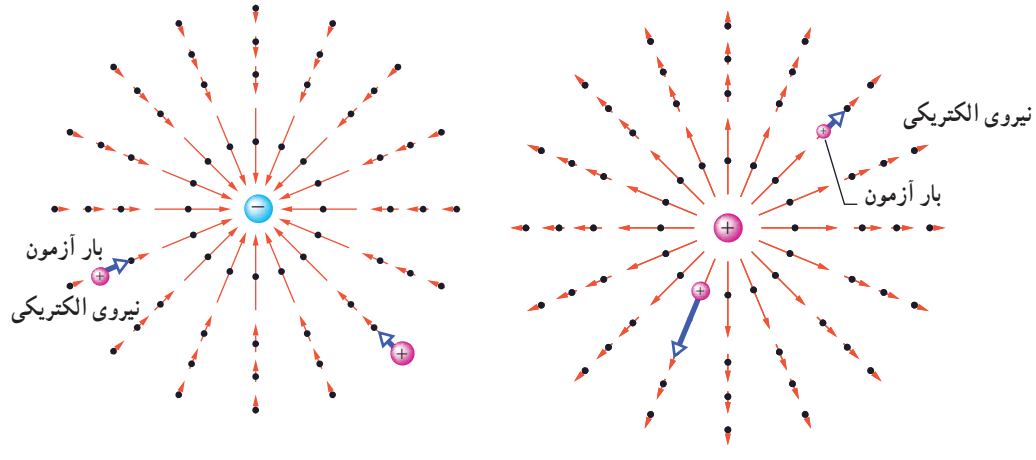
پیش از این دیدیم بارهای الکتریکی در فضای پیرامون خود میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند. آیا می‌توانید بردار میدان الکتریکی را در نقاط پیرامون یک ذرّهٔ باردار مثبت یا منفی تجسم کنید؟ *مایکل فاراده* نخستین بار در میانهٔ قرن نوزدهم میلادی روشی را برای تجسم این بردارها ارائه کرد. برای مجسم کردن میدان الکتریکی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

فعالیت ۱ــ۳ (کار در کلاس)



درون یک ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی با عمق کم، مقداری پارافین مایع یا روغن کرچک به عمق حدود ۰/۵cm بریزید و داخل آن دو الکترود نقطه‌ای قرار دهید. الکترودها را با سیم به پایانه‌های مثبت و منفی یک مولد ولتاژ بالا، مانند مولد وان‌دوگراف وصل کنید. روی سطح پارافین، مقدار کمی بذر چمن یا خاکشیر بپاشید. مولد را روشن کنید. اکنون به سمت‌گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکترود توجه کنید. شکل سمت‌گیری دانه‌ها در این فضا را رسم کنید.

اگر یک بار آزمون را در نزدیکی یک ذرّهٔ باردار مثبت یا منفی قرار دهیم، بسته به نوع بار، نیروی الکتریکی وارد به بار آزمون در جهت دور شدن از ذرّه (شکل ۱ــ۱۳ــ الف) و یا در جهت نزدیک شدن به آن (شکل ۱ــ۱۳ــ ب) خواهد بود.

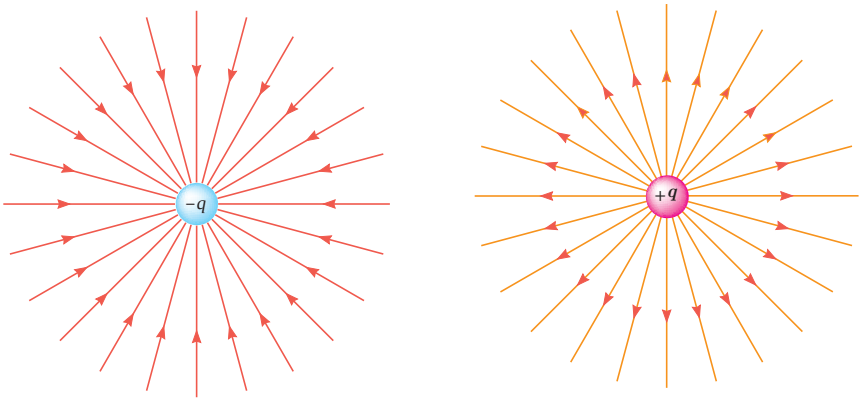


الف) میدان الکتریکی حاصل از یک ذرّهٔ باردار مثبت ساکن.

ب) میدان الکتریکی حاصل از یک ذرّهٔ باردار منفی ساکن.

شکل ۱ــ۱۳

خط‌های میدان در هر نقطه، هم‌جهت با بردار میدان الکتریکی در آن نقطه است (شکل ۱ــ۱۴).



الف) خطوط میدان الکتریکی در جهتِ دور شدن از ذرّهٔ باردار $+q$ است.

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

شکل ۱ــ ۱۴

بنابراین، طرحی که از سمت‌گیری دانه‌ها در فعالیت ۱ــ۳ دیدید، در واقع طرحی از خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو الکترود بوده است.

قاعده‌های رسم خطوط میدان الکتریکی عبارت‌اند از :

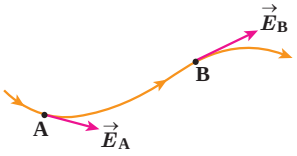
۱ــ در هر نقطه، بردار میدان الکتریکی باید مماس بر خط میدان الکتریکی عبوری از آن نقطه و در همان جهت باشد (شکل ۱ــ۱۵).

۲ــ میزان تراکم خطوط میدان در هر ناحیه از فضا نشان‌دهندهٔ اندازهٔ میدان در آن ناحیه است؛ هرجا خطوط میدان متراکم‌تر باشد، اندازهٔ میدان بیشتر است (شکل ۱ــ۱۶).

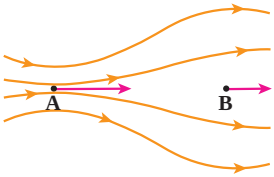
۳ــ در آرایشی از بارها خطوط میدان الکتریکی از بارهای مثبت شروع و به بارهای منفی ختم می‌شوند.

۴ــ خطوط میدان برایند هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند (شکل ۱ــ۱۷) یعنی از هر نقطهٔ فضا فقط یک خط میدان الکتریکی می‌گذرد.

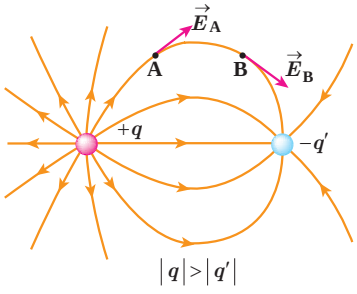
تجسم واقعی خطوط میدان، در فضاست، و بنابراین طرحی سه‌بعدی دارد (شکل ۱ــ۱۸).



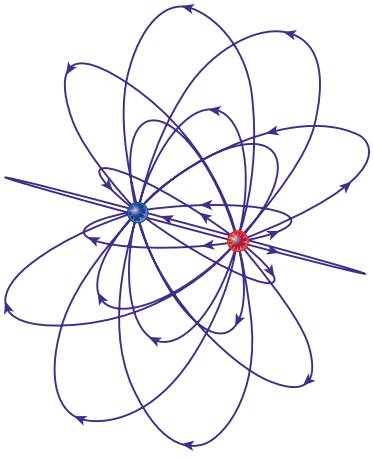
شکل ۱ــ۱۵ میدان الکتریکی در هر نقطه برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم‌جهت است.



شکل ۱ــ۱۶ اطراف نقطهٔ A خطوط میدان متراکم‌تر از اطراف نقطهٔ B است. بنابراین، بزرگی میدان در نقطهٔ A بیشتر از نقطهٔ B است.



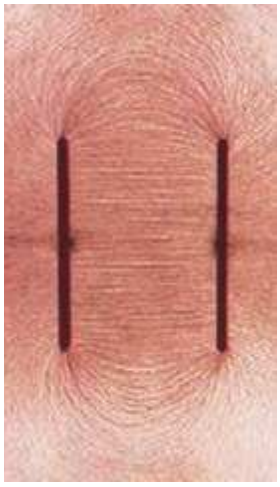
شکل ۱ــ۱۷ خطوط میدان از بارهای مثبت شروع و به بارهای منفی ختم می‌شوند و هرگز یکدیگر را قطع نمی‌کنند.



شکل ۱ــ۱۸ نمایش سه‌بعدی خطوط میدان برای یک دوقطبی الکتریکی

پرسش ۱ــ۴

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



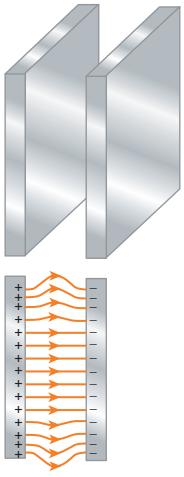
شکل ۱ــ ۱۹ سمت‌گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکترود صفحه‌ای موازی

میدان الکتریکی یکنواخت : اگر دوباره اسباب فعالیت ۱ــ۳ را سوار کنید و این بار الکترودهای نقطه‌ای را با دو صفحهٔ فلزی موازی جایگزین کنید و دوباره به سمت‌گیری دانه‌ها در فضای بین دو الکترود توجه کنید، طرحی از خطوط میدان الکتریکی را مشاهده می‌کنید که در شکل ۱ــ ۱۹ نشان داده شده است. خطوط این میدان، در فضای بین دو صفحه و دور از لبه‌های صفحات، مستقیم، موازی و هم‌فاصله‌اند؛ یعنی بردار میدان در این نقاط هم‌اندازه و هم‌جهت است. به چنین میدانی، میدان الکتریکی یکنواخت گفته می‌شود (شکل ۱ــ 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 می‌کند. نیروی $\vec{F}$ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\vec{F} = q\vec{E} \qquad (۶ــ۱)$$

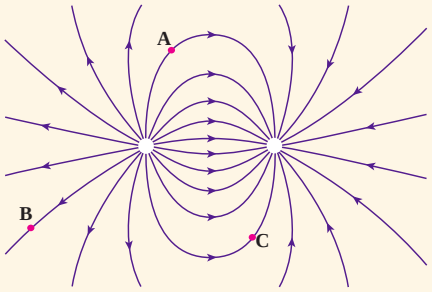
بزرگی این نیرو از رابطهٔ $F = |q|E$ به‌دست می‌آید، و جهت آن اگر q مثبت باشد، در همان جهت $\vec{E}$ و اگر q منفی باشد، در خلاف جهت $\vec{E}$ خواهد بود.



شکل ۱ــ ۲۰ طرحی از خطوط میدان یکنواخت بین دو صفحهٔ رسانای موازی با بارهای هم‌اندازه و ناهمنام

پرسش ۱ــ۵

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



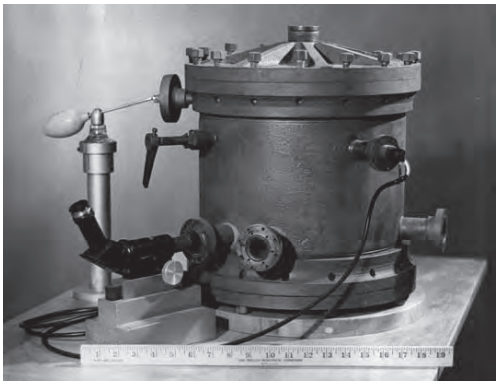
فعالیت ۱ــ۴

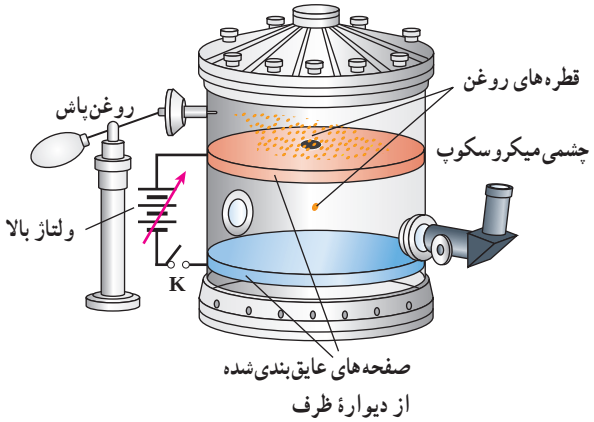
تولیدمثل برخی از گل‌ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده‌ها به واسطهٔ میدان الکتریکی، از یک گل به زنبور و از زنبور به گل دیگر منتقل می‌شوند. در این باره تحقیق کنید.

مثال ۱ــ۹ : آزمایش قطره ــ روغن میلیکان

همان‌طور که پیش‌تر دیدیم بارالکتریکی 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 ــ روغن میلیکان[1] معروف است. میلیکان بین دو ورقهٔ 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 ورقهٔ بالایی چندین روزنهٔ کوچک ایجاد کرده بود که از طریق آنها قطره‌های روغن حاصل از یک روغن‌پاش به ناحیهٔ بین دو ورقه می‌پاشید. بیشتر این قطره‌ها در اثر مالش با دهانهٔ خروجی روغن‌پاش، 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 ــ روغن به دفعات زیاد و با قطره‌ــ روغن‌های متفاوت دریافت که بار قطره‌ها برابر بار بنیادی e یا مضرب درستی از این مقدار است. شکل زیر اسباب واقعی آزمایش اولیهٔ میلیکان و طرحی از آن اسباب را نشان می‌دهد.

رابرت اندرو میلیکان[2] (۱۹۵۳ــ۱۸۶۸م)
فیزیک‌دان خبرهٔ آمریکایی که در سال ۱۹۲۳میلادی به خاطر کار خود در تعیین بار الکترون و نیز اثر فوتوالکتریک برندهٔ جایزهٔ نوبل گردید.





اسباب آزمایش اولیهٔ میلیکان و طرحی از آن

اکنون وضعیتی را در نظر بگیرید که قطرهٔ روغن در فضای بین دو صفحه معلق است. اگر جرم این قطرهٔ روغن $۸/۲\times ۱۰^{-۱۵}\text{kg}$ و میدان الکتریکی دارای بزرگی $۱/۰\times ۱۰^{۵}\text{N/C}$ و رو به پایین باشد، تعداد الکترون‌هایی که قطره جذب کرده یا از دست داده است، چقدر است؟

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

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

۱ ــ Millikan's Oil ــ drop Experiment
۲ ــ Robert Andrews Millikan

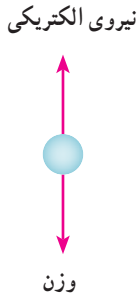
و در نتیجه

$$|q| = \frac{mg}{E} = \frac{(۸/۲\times۱۰^{-۱۵}\,\text{kg})(۹/۸\,\text{N/kg})}{۱/۰\times۱۰^{۵}\,\text{N/C}} \simeq ۸/۰\times۱۰^{-۱۹}\,\text{C}$$

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

$$n = \frac{۸/۰\times۱۰^{-۱۹}\,\text{C}}{۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,\text{C}} = ۵$$

بنابراین، قطرهٔ روغن ۵ الکترون به‌دست آورده است.



تمرین ۱ــ۷

روی سطح بادکنکی به جرم ۱۰/۰g بار الکتریکی ۲۰۰nC– ایجاد می کنیم 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 شناوری رو به بالای وارد بر بادکنک را ۰/۰۵۰N فرض کنید.

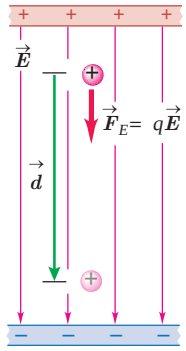
فعالیت ۱ــ۵

رسوب‌دهندهٔ الکتروستاتیکی (ESP)[1] 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.

۱ــ۷ انرژی پتانسیل الکتریکی

دو ذرّهٔ باردار الکتریکی شکل ۱ــ۲۱ را درنظر بگیرید که در آن، بار $q_۱+$ در جای خود ثابت و بار $q_۲+$ در فضای اطراف آن رها شده است. می‌دانیم بار $q_۲+$ بر اثر میدان الکتریکی حاصل از بار $q_۱+$ از آن رانده و دارای انرژی جنبشی می‌شود. طبق قانون پایستگی انرژی، انرژی جنبشی نمی‌تواند خود به خود به‌وجود 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 ذرّهٔ شکل ۱ــ۲۱ وابسته است و همان‌طور که در کتاب فیزیک سال دهم دیدید به آن **انرژی پتانسیل الکتریکی** می‌گوییم. برای آنکه به توصیفی کمّی از این انرژی دست یابیم، میدان الکتریکی یکنواختی را مطابق شکل ۱ــ۲۲ درنظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحهٔ باردار برقرار شده است.

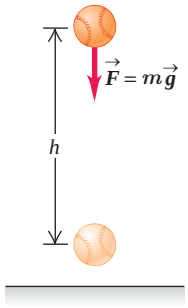
شکل ۱ــ ۲۱ ذرّهٔ باردار $q_۲+$ در میدان الکتریکی فضای اطراف بار $q_۱+$ رها شده است.



شکل ۱ــ ۲۲ ذرّهٔ باردار $q+$ در میدان الکتریکی یکنواخت رها می‌شود و به‌تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود (از نیروی گرانشی چشم‌پوشی 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 می کند و به‌تدریج تندی و انرژی جنبشی آن افزایش می یابد. 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

۱– Electrostatic Precipitator



شکل ۱ــ۲۳ جسم در میدان گرانشی یکنواخت زمین رها می‌شود و به‌تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.

آن بر اثر کاهش انرژی پتانسیل گرانشی به‌تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۱ــ۲۳). همچنین دیدیم که کار نیروی گرانشی برابر با منفیِ تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است ($W_g = -\Delta U_g$).

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

$$W_E = -\Delta U_E \qquad (۷ــ۱)$$

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 ذرّه‌ای q را در میدان الکتریکی یکنواخت $\vec{E}$ درنظر بگیرید که جابه‌جایی $\vec{d}$ را موازی میدان الکتریکی، انجام می‌دهد (شکل ۱ــ۲۲). طبق تعریف کار که در سال قبل دیدید، کار انجام‌شده توسط نیروی الکتریکی ثابت $\vec{F}_E$ در طی جابه‌جایی $\vec{d}$ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

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

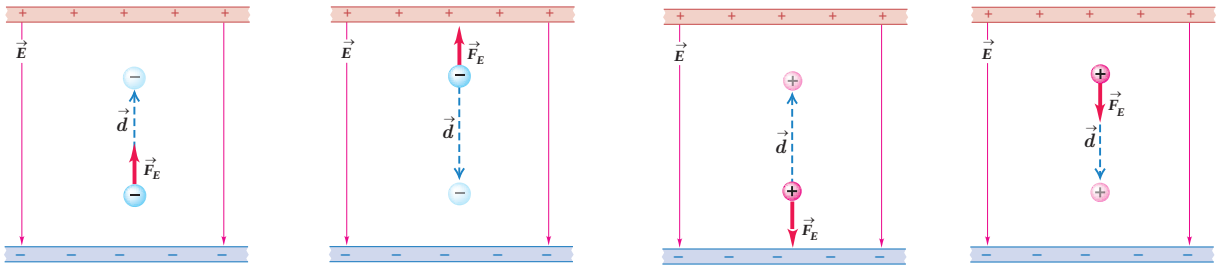
با توجه به اینکه $F_E = |q|E$ است، این رابطه به‌صورت زیر می‌شود:

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

اکنون با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۷ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار ذرّه‌ای q چنین محاسبه می‌شود:

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|\, E\, d \cos\theta \qquad (۸ــ۱)$$

که در آن، θ زاویهٔ بین نیروی $\vec{F}_E$ و جابه‌جایی $\vec{d}$ است. (در این کتاب، در استفاده از رابطهٔ ۱ــ۸، 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)، اندازهٔ جابه‌جایی (d) برحسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی (ΔU_E) برحسب ژول (J) است. توجه کنید که این رابطه چه برای بار مثبت و چه برای بار ذرّه‌ای منفی برقرار است.



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*.

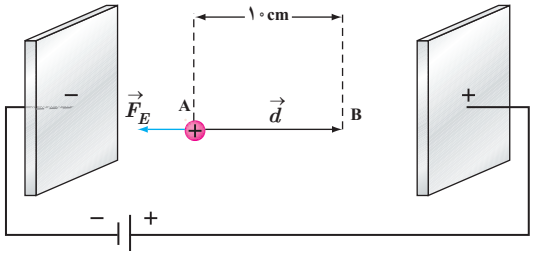
ب) بار مثبت را در خلاف جهت میدان الکتریکی $\vec{E}$ جابه‌جا می‌کنیم: میدان الکتریکی *کار منفی* W_E را روی بار انجام می‌دهد. انرژی پتانسیل الکتریکی U_E *افزایش می‌یابد*.

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.

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*.

شکل ۱ــ۲۴

مثال ۱ــ۱۰



در یک میدان الکتریکی یکنواخت $E = ۲/۰\times۱۰^{۳}\,N/C$، پروتونی از نقطهٔ A با سرعت $\vec{v}_{۰}$ در خلاف جهت میدان الکتریکی پرتاب شده است. پروتون سرانجام در نقطهٔ B متوقف می‌شود. بار پروتون $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}C$ و جرم آن $۱/۶۷\times۱۰^{-۲۷}kg$ 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 رابطهٔ ۱ــ۸ داریم :

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|Ed\cos\theta = -(۱/۶\times۱۰^{-۱۹}C)(۲/۰\times۱۰^{۳}\,N/C)(۱۰\times۱۰^{-۲}m)(\cos۱۸۰^{\circ}) = ۳/۲\times۱۰^{-۱۷}J$$

ب) طبق قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی می‌توان نوشت :

$$W_E = \Delta K \Rightarrow -\Delta U_E = \frac{۱}{۲}m(۰ - v_{۰}^{۲})$$

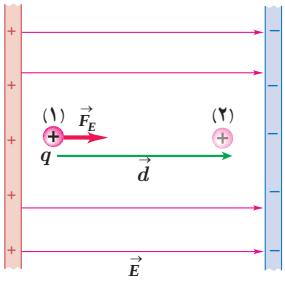
$$-۳/۲\times۱۰^{-۱۷}J = \frac{۱}{۲}(۱/۶۷\times۱۰^{-۲۷}kg)(-v_{۰}^{۲}) \Rightarrow v_{۰} = ۱/۹۶\times۱۰^{۵}\,m/s \approx ۲/۰\times۱۰^{۵}\,m/s$$

تمرین ۱ــ۸

در مثال ۱ــ۱۰ اگر جای قطب‌های باتری عوض شود و پروتون را در نقطهٔ A از حالت سکون رها کنیم، پروتون با چه تندی‌ای به نقطهٔ B می‌رسد؟

۱ــ۸ پتانسیل الکتریکی

در بخش قبل دیدیم تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک ذرهٔ باردار به بار الکتریکی آن بستگی دارد؛ مثلاً با دوبرابر شدن بار ذره، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز دو برابر می‌شود. بنابراین، نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار ذره، مستقل از نوع و اندازهٔ بار الکتریکی است. به این نسبت، **اختلاف پتانسیل الکتریکی** دونقطه‌ای می‌گوییم که ذره میان آنها جابه‌جا شده است (شکل ۱ــ۲۵) و آن را با ΔV نمایش می‌دهیم :



شکل ۱ــ۲۵ نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار، مستقل از نوع و اندازهٔ بار الکتریکی است.

$$\Delta V = V_{۲} - V_{۱} = \frac{\Delta U_E}{q} \qquad (۱ــ۹)$$

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

گرچه این رابطه را برای میدان الکتریکی یکنواخت بیان کردیم، اما برای میدان‌های الکتریکی غیریکنواخت نیز برقرار است. توجه کنید که در این رابطه علامت q باید در نظر گرفته شود. جدول ۱ــ۳ 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 ذرّه و پتانسیل الکتریکی صفر باشد. بنابراین، پتانسیل الکتریکی در هر نقطه از میدان با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

$$V = \frac{U_E}{q} \qquad (۱۰ــ۱)$$

جدول ۱ــ۳ برخی از ولتاژهای متداول

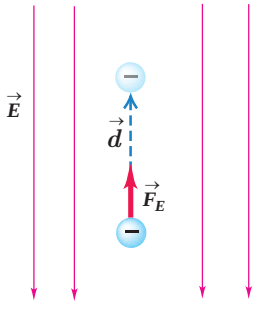
پتانسیل استراحت نورون	۶۰ــ۹۰mV
باتری قلمی	۱/۵V
باتری اتومبیل	۱۲V
برق خانگی در برخی از کشورها	۱۱۰ــ۱۲۰V
برق خانگی در ایران و اغلب کشورها	۲۲۰ــ۲۴۰V
مولد نیروگاه برق	۲۴۰۰۰V
خطوط انتقال برق ولتاژ بالا	$۱۰^۴$ــ$۱۰^۶$V
آذرخش	$۱۰^۸$ــ$۱۰^۹$V

الساندرو ولتا (۱۸۲۷ ــ ۱۷۴۵م)

الساندرو ولتا در ایتالیا به دنیا آمد. نخست به شغل معلمی روی آورد و تا سنّ سی‌سالگی به این کار ادامه داد. سپس در دانشگاه *پاویا* به استادی فیزیک برگزیده شد. در آنجا وظیفه داشت علاوه بر تدریس، آزمایشگاهی نیز دایر کند. وقتی در دانشگاه تدریس می‌کرد دستگاهی به نام الکتروفور را اختراع کرد و شرح جزئیات دستگاه را برای جوزف پریستلی فرستاد. ولتا با استفاده از این دستگاه قوانین فیزیکی زیادی را کشف کرد، در سال ۱۷۹۱ لوئیجی گالوانی استاد زیست‌شناسی و فیزیولوژی دانشگاه بولوگنا موقعی که سرگرم تشریح قورباغه‌ای در آزمایشگاهش بود، یک گیرهٔ برنجی را در نخاع جانور قرار داد و متوجه شد که پس از برخورد ماهیچهٔ پای قورباغه با چاقوی جراحی، خصوصاً وقتی قسمت بالای چاقو با گیره تماس پیدا کند، ماهیچه به‌شدت منقبض می‌شود و علت انقباض ماهیچهٔ پای قورباغه را الکتریسیته‌ای پنداشت که در بدن جانور به‌وجود می‌آید. اما ولتا برخلاف گالوانی عقیده داشت منشأ پیدایش این الکتریسیته از بدن جانور نیست و در نامه‌ای به تاریخ ۱۸۰۰ میلادی دربارهٔ پیلی 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 ۱ــ۱۱

در نتیجهٔ برخورد پرتوهای کیهانی با مولکول‌های هوا، الکترون‌هایی از این مولکول‌ها کنده می‌شوند. در نزدیکی سطح زمین، میدان الکتریکی با بزرگی ۱۵۰N/C و جهت رو به پایین وجود دارد. الف) اگر یکی از این الکترون‌ها، تحت تأثیر این میدان ۵۰۰m 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 رابطهٔ ۱ــ۸ برای تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون داریم

$$\Delta U_E = -W_E = -|q|Ed\cos\theta = -(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\text{C})(۱۵۰\text{N/C})(۵۰۰\text{m})\cos۰^\circ$$
$$= -۱/۲۰\times۱۰^{-۱۴}\text{J}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۹ برای اختلاف پتانسیل داریم

$$\Delta V = \frac{\Delta U_E}{q} = \frac{-۱/۲۰\times۱۰^{-۱۴}\text{J}}{-۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\text{C}} = ۷/۵۰\times۱۰^۴\text{V} = ۷۵/۰\text{kV}$$

تمرین ۱ــ۹

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

شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ‌قوه یا گوشی تلفن همراه از آنها استفاده می‌شود (شکل ۱ــ۲۶) و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها ولتاژهای متفاوتی دارند؛ مثلاً باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ولتی 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 پایانهٔ مثبت منهای پتانسیل پایانهٔ منفی است. اگر پتانسیل پایانهٔ منفی را با V_- و پتانسیل پایانهٔ مثبت را با V_+ نشان دهیم، داریم :

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

شکل ۱ــ۲۶ برخی از باتری‌های متداول

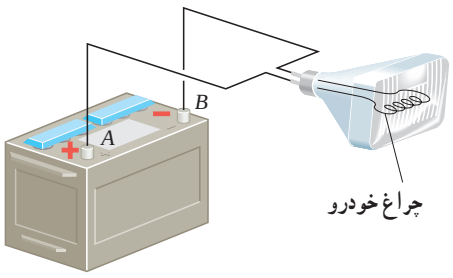
بنابراین، وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی پتانسیل پایانهٔ مثبت به اندازهٔ ۱۲ ولت از پتانسیل پایانهٔ منفی آن بیشتر است؛ مثلاً اگر پتانسیل پایانهٔ منفی را برابر با ۴V− فرض کنیم، پتانسیل پایانهٔ مثبت برابر۸V+ خواهد شد. می‌توان پایانهٔ منفی را مرجع پتانسیل درنظر گرفت؛ در این صورت، پتانسیل پایانهٔ مثبت برابر ۱۲V+ می‌شود. معمولاً (به‌خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین یا نقطه‌ای از مدار را برابر صفر می‌گیرند و به آن نقطه، اصطلاحاً نقطهٔ زمین می‌گویند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به آن می‌سنجند. نقطهٔ زمین را در مدارهای الکتریکی با نماد ⏚ نشان می‌دهند.

تمرین ۱ــ۱۰

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

مثال ۱ــ۱۲

اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر ۱۲/۰V است. اگر بار الکتریکی ۵۰/۰− کولن از پایانهٔ منفی به پایانهٔ مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟



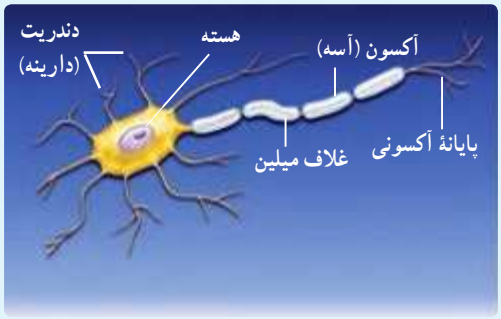
پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۹ داریم :

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

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_+ - V_-) = (-۵۰/۰\,C)(+۱۲/۰\,V) = -۶۰۰\,J$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازهٔ ۶۰۰ J کاهش یافته است.

فعالیت ۱ــ۶



عمل مغز اساساً برمبنای کنش‌ها و فعالیت‌های الکتریکی است. سیگنال‌های عصبی چیزی جز عبور جریان‌های الکتریکی نیست. مغز این سیگنال‌ها را دریافت می‌کند و اطلاعات به‌صورت 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. دربارهٔ چگونگی کار نورون‌ها تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

رابطهٔ اختلاف پتانسیل دو نقطه و اندازهٔ میدان الکتریکی یکنواخت : همان‌طور که پیش‌تر گفتیم اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه از میدان الکتریکی، مستقل از نوع و اندازهٔ 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 اندازهٔ d جابه‌جا کنیم. بنا به رابطهٔ ۱ــ۸ و با توجه به مثبت بودن q و صفر بودن زاویهٔ θ داریم

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

از طرفی با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۹ داریم

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

با برابر قرار دادن دو رابطهٔ بالا به رابطهٔ زیر می‌رسیم

$$\Delta V = -Ed$$

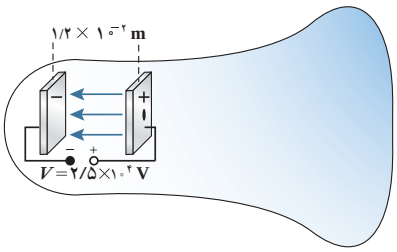
توجه کنید که این رابطه را برای حرکت در جهت میدان الکتریکی به دست آوردیم. اگر در خلاف جهت میدان حرکت می‌کردیم به رابطهٔ $\Delta V = Ed$ می‌رسیدیم. پس در هر دو حالت می‌توان گفت :

$$|\Delta V| = Ed \qquad (۱۱ــ۱)$$

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

مثال ۱ــ۱۳

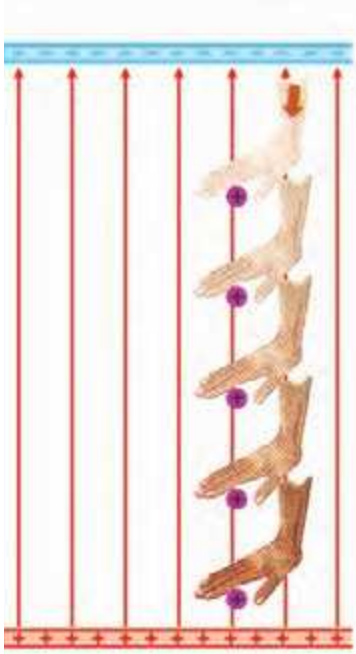
لامپ‌های تصویر تلویزیون‌ها و نمایشگرهای قدیمی، لامپ پرتو ــ کاتدی (CRT)[۱] بودند. در این لامپ، الکترون‌ها در میدان الکتریکی یکنواخت بین دو صفحهٔ باردار، مطابق شکل، شتاب می‌گیرند و با صفحهٔ نمایشگر برخورد می‌کنند. اگر صفحه‌ها در فاصلهٔ $1/2\times10^{-2}\,m$ از یکدیگر باشند و اختلاف پتانسیل بین آنها $2/5\times10^{4}\,V$ باشد، بزرگی میدان الکتریکی بین صفحه‌ها را تعیین کنید.



پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۱ داریم :

$$E = \frac{|\Delta V|}{d} = \frac{2/5\times10^{4}\,V}{1/2\times10^{-2}\,m} = 2/08\times10^{6}\,V/m \approx 2/1\,MV/m$$

۱ــ Cathode – Ray Tube



شکل ۱ــ۲۷ 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، ذرّه‌ای با بار q، با اعمال نیرویی از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر جابه‌جا شود (شکل ۱ــ۲۷). در حین این حرکت، نیروی خارجی، کار $W_{\text{خارجی}}$ را روی بار انجام می‌دهد، درحالی که نیروی الکتریکی نیز کار W_E را روی آن انجام داده است. با استفاده از قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی، تغییر انرژی جنبشی بار q چنین می‌شود :

$$\Delta K = W_{\text{خارجی}} + W_E = W_{\text{خارجی}} - q\Delta V \qquad (۱۲ــ۱)$$

که در آن از رابطه‌های ۱ــ۷ ($W_E = -\Delta U_E$) و ۱ــ۹ ($\Delta U_E = q\Delta V$) استفاده کرده‌ایم.

حال فرض کنید که تندی بار q در ابتدا و انتهای این جابه‌جایی یکسان باشد (یعنی $\Delta K = 0$). آنگاه معادلهٔ بالا به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$W_{\text{خارجی}} = -W_E = q\Delta V \qquad (\text{برای } \Delta K = 0) \qquad (۱۳ــ۱)$$

در این حالت خاص، بسته به علامت و بزرگی q و ΔV، کار $W_{\text{خارجی}}$ می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد.

تمرین ۱ــ۱۱

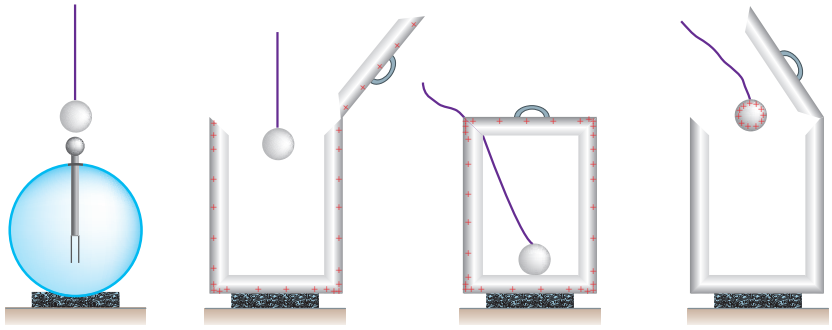
در شکل ۱ــ۲۷ الف) با فرض آنکه بار $+q$ در ابتدا و انتهای جابه‌جایی ساکن باشد، آیا کار نیروی خارجی، مثبت است یا منفی؟
ب) آیا بار $+q$ به نقطه‌ای با پتانسیل بیشتر حرکت کرده است یا به نقطه‌ای با پتانسیل کمتر؟ توضیح دهید.

۱ــ۹ 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 ــ آزمایش فاراده : نخستین بار *بنیامین فرانکلین* برای پی‌بردن 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 به‌گونه‌ای دیگر تکرار شد. در ادامه به توضیح نوعی از آزمایش فاراده می‌پردازیم که اندکی با آزمایش اصلی او متفاوت است.

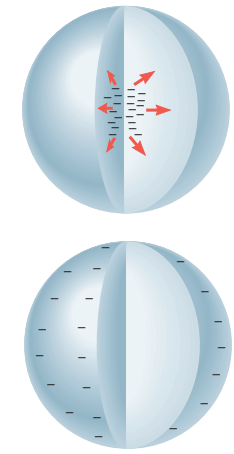
ظرف رسانایی با درپوش فلزی را درنظر بگیرید که روی پایهٔ نارسانایی قرار دارد و روی درپوش آن دسته‌ای عایق نصب شده است. ابتدا ظرف بدون بار است. یک گوی فلزی را که از نخ عایقی آویزان است باردار و سپس وارد ظرف می‌کنیم (شکل ۱ــ۲۸ــ الف). اکنون گوی را با کف ظرف تماس می‌دهیم و سپس درپوش فلزی را می‌بندیم (شکل ۱ــ۲۸ــ ب). آن‌گاه درپوش فلزی را با دستهٔ عایقش برمی‌داریم (شکل ۱ــ۲۸ــ پ).



شکل ۱ــ۲۸ شرحی تصویری از آزمایش فاراده

پس از خارج کردن گوی فلزی از ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود عقربهٔ الکتروسکوپ تکان نمی‌خورد (شکل ۱ــ۲۸ــت). 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 ۱ــ۲۹ طرحی از توزیع بار داده شده در سطح خارجی یک رسانا را نشان می‌دهد.

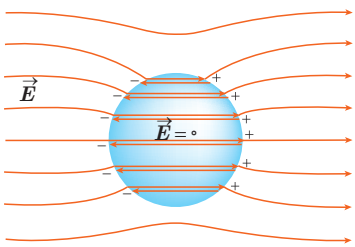


شکل ۱ــ۲۹ بار اضافی داده شده به یک رسانا در سطح خارجی آن توزیع می‌شود.

بررسی‌های دقیق نشان می‌دهند پس از مدت زمان بسیار کوتاهی از دادن بار به رسانا (برای فلزات این زمان از مرتبهٔ $10^{-14}\,s$ است)، بار در سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود و نحوهٔ توزیع بار در رسانا به‌گونه‌ای 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 رابطهٔ $\vec{F}=q\vec{E}$) 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 پدیدهٔ القا آشنا شدیم. در شکل ۱ــ۳۰ 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 ۱ــ۳۱ یک گوی رسانا را نشان می‌دهد که در میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است. نحوهٔ توزیع بار روی گوی به گونه‌ای است که میدان الکتریکی در داخل رسانا صفر شده است.

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



شکل ۱ــ 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، به‌طوری‌که 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 برهم‌اند و برای آنکه دیده شوند، با فاصلهٔ اندکی از هم رسم شده‌اند.)

چون میدان الکتریکی درون رسانایی که در تعادل الکتروستاتیکی است برابر با صفر است، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذرّهٔ باردار در داخل رسانا نیز صفر می‌شود. بنابراین، کار نیروی الکتریکی در هر جابه‌جایی دلخواهی در داخل رسانا صفر می‌شود. در نتیجه همهٔ نقاط رسانا پتانسیل یکسانی دارند. به‌عبارت دیگر :

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

و در نتیجه

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

فعالیت ۱ــ۷

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

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

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

فنّاوری و کاربرد

یکی از کاربردهای صنعتی پدیدهٔ القای بار الکتریکی، رنگ‌پاشی الکتروستاتیکی است (شکل ۱ــ۳۲ــ الف). در نوعی از این روش رنگ‌پاشی، سطح فلزی‌ای که قرار است رنگ شود به زمین متصل می‌شود. از طرفی قطره‌های ریز رنگ هنگام خروج از دهانهٔ رنگ‌پاش باردار می‌شوند. با نزدیک شدن قطره‌های رنگ به هدف فلزی، بارهای القایی با علامت مخالف بر روی فلز ظاهر می‌شوند و به این ترتیب، قطره‌ها را به سطح فلز جذب می‌کنند (شکل ۱ــ۳۲ــ ب). این روش رنگ‌پاشی، پاشیده شدن رنگ از افشانهٔ قطره‌ها را کاهش می‌دهد و رنگ یکنواختی بر سطح جسم فلزی ایجاد می‌کند.

الف) تصویری از رنگ‌پاشی الکتروستاتیکی

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

شکل ۱ــ ۳۲

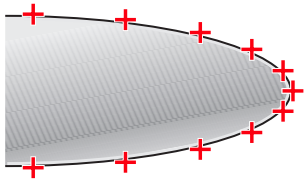
چگالی سطحی بار الکتریکی رسانا : برای اینکه بتوانیم تراکم بار الکتریکی در بخش‌های مختلف سطح یک جسم را با هم مقایسه کنیم کمیتی به نام چگالی سطحی بار را تعریف می‌کنیم. اگر مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده است برابر A و بار الکتریکی موجود در آن سطح برابر Q باشد چگالی سطحی بار که با نماد σ نشان داده می‌شود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

$$\sigma = \frac{Q}{A} \qquad (۱ــ۱۴)$$

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

شکل ۱ــ۳۳ اسباب آزمایش چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی یک جسم رسانای باردار

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 می کنیم. به این منظور آزمایش زیر را در نظر بگیرید که اسباب آن در شکل ۱ــ۳۳ نشان داده شده است. یک جسم رسانای دوکی‌شکل را روی پایهٔ عایق قرار دهید و آن را با تماس با کلاهک مولد وان‌دوگراف 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 ۱ــ۳۴). همچنین می‌توان نشان داد که خطوط میدان الکتریکی در نقاط نوک‌تیز چنین رسانایی متراکم‌تر و میدان الکتریکی در نزدیکی این نقاط، قوی‌تر است.



شکل ۱ــ۳۴ چگالی بار در نقاط تیزتر سطح یک جسم رسانای باردار بیشتر است.

فعالیت ۱ــ۸

دو قطعه ورقهٔ آلومینیمی نازک به ابعاد ۳cm×۴cm را مچاله کنید و به سرهای دو تکه نخ هم اندازه به طول ۳۰cm وصل کنید. پس از آنکه جسم فلزی دوکی‌شکل را با مولد وان دوگراف باردار کردید، یکی از آونگ‌ها را مقابل نوک تیز و دیگری را مقابل بخش پهن دوک بیاویزید. چه مشاهده می کنید؟ مشاهدهٔ خود را توجیه کنید.

مثال ۱ــ۱۴

سطح فلزی بزرگ بارداری را در نظر بگیرید که بار الکتریکی در سطح آن و دور از لبه‌ها به‌طور یکنواخت توزیع شده است. اگر چگالی بار روی این سطح $۲/۰\times۱۰^{-۶}\ C/m^۲$ باشد، در بخشی از این سطح به شکل مربعی به ضلع ۱/۰mm چقدر بار قرار گرفته است؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۴ و تبدیل یکاها در SI، خواهیم داشت :

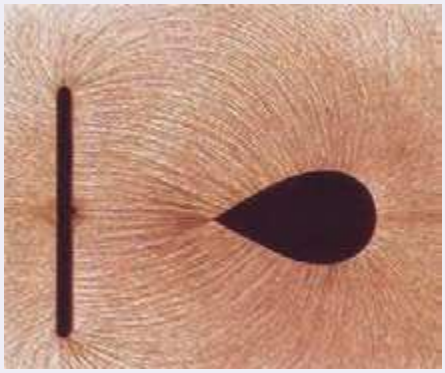
$$Q = \sigma A = (۲/۰\times۱۰^{-۶}C/m^۲)(۱/۰\times۱۰^{-۳}m\times۱/۰\times۱۰^{-۳}m) = ۲/۰\times۱۰^{-۱۲}C = ۲/۰pC$$

فعالیت ۱ــ۹

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

خوب است بدانید: تخلیهٔ هاله‌ای[1]

همان‌طور که دیدیم در قسمت‌های نوک تیز اجسام رسانا، چگالی سطحی بار الکتریکی بیشتر است. با اسباب آزمایش فعالیت ۱ــ۳ می‌توان نشان داد که خطوط میدان الکتریکی در نقاط نوک‌تیز متراکم‌تر و در نتیجه میدان الکتریکی قوی‌تر است (شکل الف). اگر بزرگی این میدان از یک مقدار حدّی فراتر برود، این میدان شدید می‌تواند الکترون‌ها را از مولکول‌های هوا بکَند 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 جِلِزّ وِلِز و هیس مانندی است که در حین تخلیه‌های جرقه‌ای شنیده می‌شود. به این جرقه‌های الکتریکی که در نوک تیز اجسام رسانای بلند و نازک ایجاد می‌شود، تخلیهٔ هاله‌ای یا آتش سنت الموّ[2] گفته می‌شود.



(الف) اسباب آزمایش فعالیت ۱ــ۳ به‌طوری‌که در آن الکترودها با یک صفحه تخت رسانا و یک رسانای دوکی‌شکل جایگزین شده‌اند. میدان الکتریکی در نقاط تیزتر جسم دوکی‌شکل قوی‌تر است.

(ب) تخلیهٔ هاله‌ای

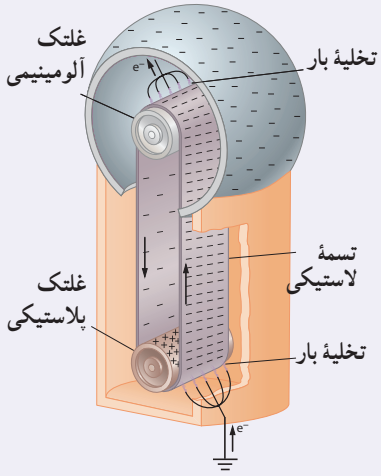
خوب است بدانید: مولّد وان دوگراف

مولّد وان‌دوگراف، 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 نمونهٔ سادهٔ مولد وان‌دوگراف، غلتک پایینی توسط یک موتور الکتریکی می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود.

۱ــ Corona discharge

۲ــ St. Elmo fire



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

۱ــ۱۰ خازن

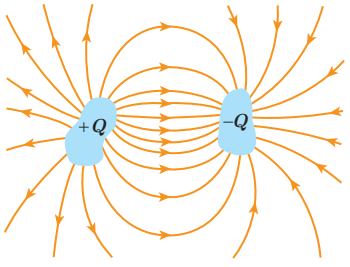
خازن وسیله‌ای الکتریکی است که می‌تواند بار و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند؛ مثلاً باتری‌های یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در خازن فلاش دوربین ذخیره می‌کنند (شکل ۱ــ۳۵). باتری‌ها معمولاً می‌توانند انرژی را فقط با آهنگ نسبتاً کمی به مدار بدهند که این آهنگ برای گسیل نور از فلاش دوربین بسیار کم است، اما وقتی خازن باردار می‌شود، می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار زیادی برای فلاش زدن آماده کند.

شکل ۱ــ۳۵ انرژی فلاش دوربین در یک خازن ذخیره شده است.

شکل ۱ــ۳۶ چند خازن را در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۱ــ۳۷ اجزای اصلی یک خازن معمولی را نشان می‌دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. این رساناها را صفحه‌های خازن می‌نامیم.

شکل ۱ــ۳۶ تصویری از چند خازن مختلف

شکل ۱ــ۳۸ آرایش خازنی موسوم به خازن‌تخت[۱] را نشان می‌دهد که شامل دو صفحهٔ رسانای موازی با مساحت A است که به فاصلهٔ d (که در برابر ابعاد صفحه‌ها ناچیز است) از هم قرار گرفته‌اند. گرچه نمادی که برای نشان دادن یک خازن به‌کار می‌بریم (⊣⊢) مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن‌ها با هر شکلی استفاده می‌شود. خازن‌ها به‌طور گسترده‌ای در مدارهای الکترونیکی وسایلی مانند رادیو، تلویزیون، رایانه، گوشی همراه و... به‌کار می‌روند؛ مثلاً شکل ۱ــ۳۹ مدار یک تقویت‌کننده (آمپلی‌فایر) را نشان می‌دهد که در آن چندین خازن به‌کار رفته است. برخی از این خازن‌ها با پیکان‌هایی مشخص شده‌اند.

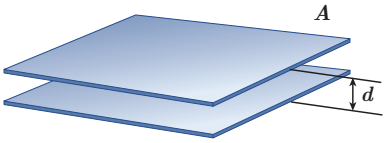


شکل ۱ــ۳۷ اجزای اصلی یک خازن باردار

باردار (شارژ) کردن خازن : روش ساده و مرسوم برای باردار کردن خازن قرار دادن آن در مدار الکتریکی ساده‌ای است که یک باتری دارد (شکل ۱ــ۴۰ــ الف). وقتی کلید K بسته (وصل) شود بار از طریق سیم‌های رسانا جریان می‌یابد. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحهٔ خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانهٔ باتری یکسان شود. وقتی یک خازن باردار می‌شود، صفحه‌های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی با علامت مخالف می‌شود : $+Q$ و $-Q$. با این حال،

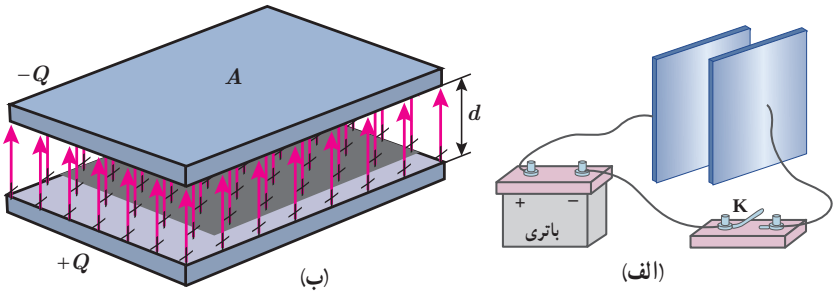
۱ــ parallel – plate capacitor

بار یک خازن را به‌صورت Q نشان می‌دهند که همان بار صفحهٔ مثبت است. بین دو صفحهٔ خازن باردار یک میدان الکتریکی ایجاد می‌شود که خطوط این میدان از صفحهٔ مثبت به منفی است (شکل ۱ــ۴۰ــ ب).



شکل ۱ــ۳۸ یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت A ساخته شده است که به فاصلهٔ d از هم قرار گرفته‌اند.

شکل ۱ــ ۳۹ مدار یک تقویت‌کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن‌ها با پیکان مشخص شده‌اند.



شکل ۱ــ ۴۰ الف) یک روش برای باردار کردن خازن، اتصال صفحه‌های آن به یک باتری است. ب) صفحه‌های این خازن بارهایی هم‌اندازه و با علامت مخالف پیدا می‌کنند. میدان الکتریکی از صفحهٔ مثبت به سمت صفحهٔ منفی است.

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

$$C=\frac{Q}{V} \qquad (۱ــ۱۵)$$

در رابطهٔ ۱ــ۱۵ یکای بار الکتریکی، کولن (C)، یکای اختلاف پتانسیل، ولت (V) و بنابراین یکای ظرفیت، کولن بر ولت (C/V) می‌شود که به پاس خدمات مایکل فاراده، فاراد (F) نامیده شده است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و عملاً ظرفیت اکثر خازن‌های متداول در محدودهٔ پیکوفاراد (10^{-12}F) تا میلی‌فاراد (10^{-3}F) است. گرچه امروزه فنّاوری ساخت خازن‌ها، دستیابی به ظرفیت‌هایی بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

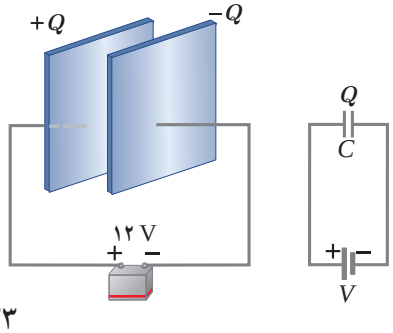
ظرفیت خازن به ویژگی‌های هندسی و جنس عایق بین صفحه‌های خازن بستگی دارد و با تغییر بار یا اختلاف پتانسیل خازن، تغییر نمی‌کند.

مثال ۱ــ۱۵

صفحه‌های خازنی را مطابق شکل به پایانه‌های یک باتری با اختلاف پتانسیل ۱۲V وصل می‌کنیم. اگر بار خازن ۲۴μC شود،

الف) ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

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



پاسخ :

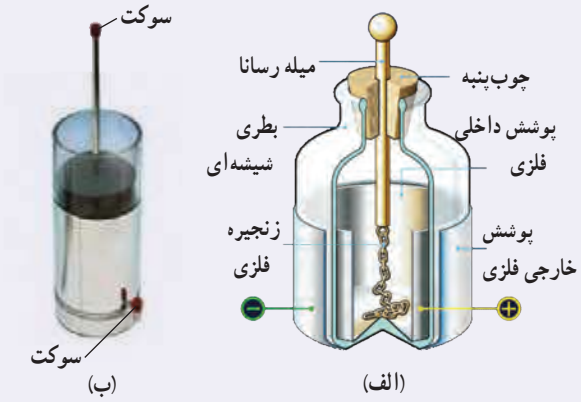
الف) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۵ داریم :

$$C=\frac{Q}{V}=\frac{۲۴\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{C}}{۱۲\,\mathrm{V}}=۲/۰\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{F}=۲/۰\,\mu\mathrm{F}$$

ب) با توجه به اینکه ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است از ظرفیت به‌دست آمده در قسمت الف استفاده می‌کنیم. آنگاه با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۵ می‌توان نوشت :

$$Q=CV=(۲/۰\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{F})(۳۶\,\mathrm{V})=۷۲\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{C}=۷۲\,\mu\mathrm{C}$$

خوب است بدانید: بطری لیدن[1]

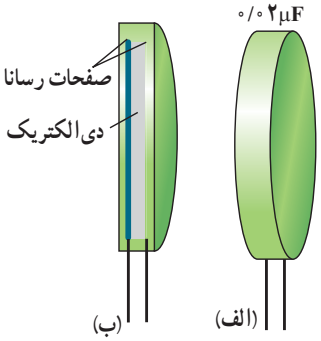


بطری لیدن، قدیمی‌ترین نوع خازن است که در میانهٔ سدهٔ هجدهم در شهر لیدن که امروزه در هلند واقع شده است، ساخته شد. در یک نوع ابتدایی، این خازن از یک بطری شیشه‌ای ساخته شده است که سطح درونی و بیرونی آن با ورقهٔ نازک قلع پوشیده شده است. ورقهٔ درونی توسط سیم یا زنجیری فلزی به میلهٔ فلزی ثابت داخل بطری اتصال دارد (شکل الف). امروزه برای باردار کردن بطری لیدن، روی بدنهٔ فلزی و سر میلهٔ فلزی سوکت (جای فیش)هایی نصب شده است (شکل ب) که از طریق آنها، خازن توسط قطب‌های یک مولد ولتاژبالا مانند مولد وان‌دوگراف یا مولد *ویم‌چرست*[2] باردار می‌شود. ظرفیت یک بطری لیدن با اندازهٔ متوسط از مرتبهٔ ۱nF است. آزمایش با بطری لیدن خطرناک است و باید تحت نظارت مربی یا دبیر محترم انجام شود.

۱ــ۱۱ خازن با دی‌الکتریک

اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با ماده‌ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن دی‌الکتریک گفته می‌شود پُرکنیم (شکل ۱ــ۴۱) برای ظرفیت خازن چه پیش می‌آید؟ مایکل فاراده نخستین بار در سال ۱۸۳۷ میلادی، با استفاده از وسایل ساده‌ای دریافت که ظرفیت خازن با ضریبی موسوم به ثابت دی‌الکتریک مادهٔ عایق (که آن را با κ[3] نشان می‌دهند) افزایش می‌یابد؛ یعنی اگر ظرفیت خازن بدون دی‌الکتریک را با C_0 نمایش دهیم آن‌گاه ظرفیت خازن با دی‌الکتریک برابر است با

$$C=\kappa C_0 \qquad (۱۶ــ۱)$$



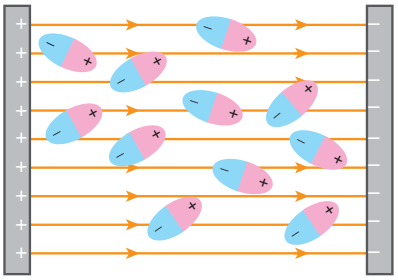
شکل ۱ــ۴۱ الف) بیرون و ب) درون یک خازن که بین صفحه‌های فلزی آن لایهٔ عایقی قرارگرفته است.

جدول ۱ــ۴ ثابت دی‌الکتریک چند مادهٔ عایق را نشان می‌دهد.

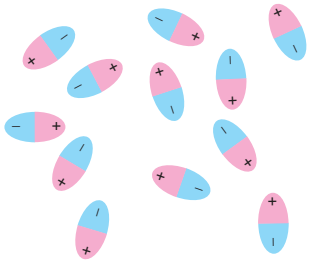
فرض کنید خازنی را نخست توسط یک باتری باردار و سپس از باتری جدا کرده‌ایم. اکنون فضای داخل این خازن را با یک دی‌الکتریک پر می‌کنیم. توجه کنید که دی‌الکتریک‌ها بر دو نوع‌اند : قطبی و غیرقطبی. وقتی یک دی‌الکتریک قطبی (مانند آب، NH_3، HCl) در میدان الکتریکی بین دو صفحهٔ

۱ــ Leyden jar
۲ــ Wimshurst Machine
۳ــ از حروف الفبای یونانی که کاپا خوانده می‌شود.

خازن قرار می‌گیرد، سر منفی مولکول‌های دوقطبی به‌طرف صفحهٔ مثبت و سر مثبت آنها به طرف صفحهٔ منفی کشیده می‌شود و درنتیجه این مولکول‌های دوقطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی بین دو صفحهٔ خازن هم ردیف کنند (شکل ۱ــ۴۲).



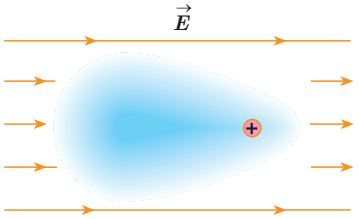
ب) در حضور میدان الکتریکی، مولکول‌های قطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی خارجی هم‌ردیف کنند.



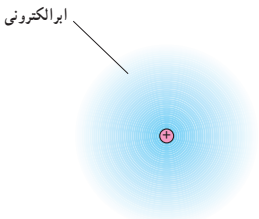
الف) در نبود میدان الکتریکی، سمت‌گیری مولکول‌های دوقطبی نامنظم است.

شکل ۱ــ۴۲

وقتی یک دی‌الکتریک غیرقطبی (مانند متان، بنزن و...) در میدان بین دو صفحهٔ خازن قرار می‌گیرد بر اثر القا قطبیده می‌شود؛ یعنی میدان الکتریکی اعمال‌شده باعث می‌شود که ابر الکترونی مولکول‌های دی‌الکتریک در خلاف جهت میدان جابه‌جا شود (شکل ۱ــ۴۳) 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 می شوند و ابرالکترونی در خلاف جهت میدان جابه جا می شود.



الف) درنبود میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی برهم منطبق‌اند.

شکل ۱ــ۴۳

می‌توان نشان داد این رفتار مولکول‌های دی‌الکتریک (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 فاصلهٔ جدایی صفحه‌های d، از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$C_{\circ} = \varepsilon_{\circ} \frac{A}{d} \qquad (۱۷ــ۱)$$

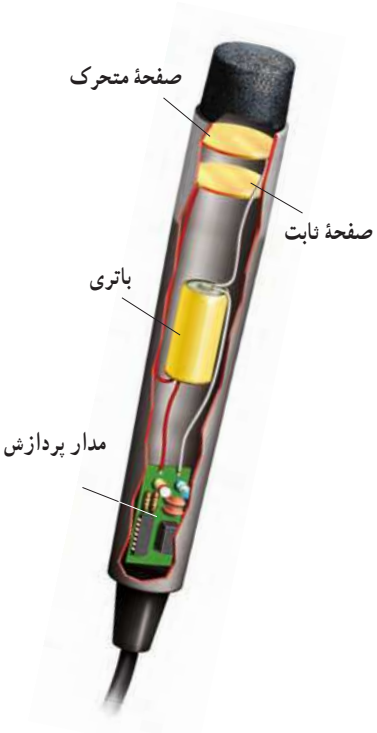
جدول ۱ــ۴ــ ثابت دی الکتریک برخی عایق‌ها در دمای $20^{\circ}C$

مادهٔ دی‌الکتریک	ثابت دی‌الکتریک
هوای ۱atm	۱/۰۰۰۶
تفلون	۲/۱
پارافین	۲/۲
پلی‌استیرن	۲/۶
میلار	۳/۱
پی‌وی‌سی	۳/۴
کاغذ	۳/۵
کوارتز	۴/۳
شیشهٔ پیرکس	۵
میکا	۷
آب خالص	۸۰
تیتانید استرانسیوم	۳۱۰

که در آن ε_0 همان ضریب گذردهی الکتریکی خلأ ($\varepsilon_0 = ۸/۸۵ \times ۱۰^{-۱۲}\ F/m$) است. مثالی کاربردی از این رابطه، میکروفون خازنی است که براثر تغییر ظرفیت یک خازن تخت سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کند(شکل ۱ــ۴۴).

حال اگر فضای بین صفحه‌های این خازن را با یک دی‌الکتریک با ثابت دی‌الکتریک κ کاملاً پر کنیم، طبق رابطه ۱ــ۱۶ برای ظرفیت خازن جدید داریم :

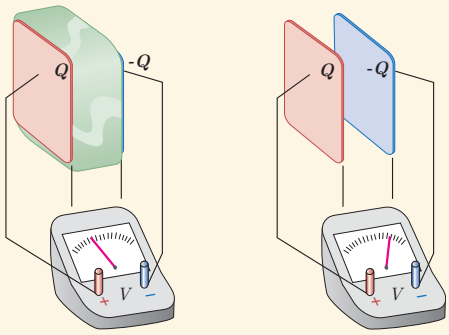
$$C = \kappa \varepsilon_0 \frac{A}{d} \qquad (۱ــ۱۸)$$



شکل ۱ــ۴۴ در یک میکروفون خازنی، با ارتعاش صفحهٔ متحرک (دیافراگم) خازن براثر صدا، فاصلهٔ صفحه‌های خازن تغییر می‌کند بنابراین ظرفیت خازن تخت تغییر می‌کند که به ایجاد یک سیگنال الکتریکی می انجامد.

پرسش ۱ــ۶

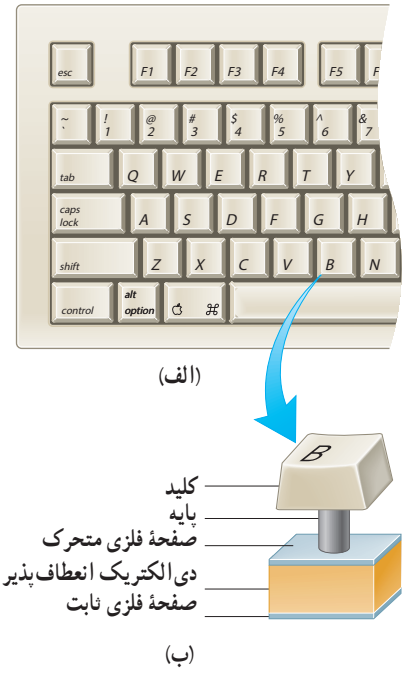
در شکل زیر صفحه‌های باردار یک خازن تخت را که بین آنها هواست، به ولت‌سنج وصل می‌کنیم. با وارد کردن دی‌الکتریک در بین صفحه‌ها، اختلاف پتانسیل دو صفحه کاهش می‌یابد. علت آن را توضیح دهید. (توجه کنید که این آزمایش با بیشتر ولت‌سنج‌های معمولی و رایج ممکن نیست.)



مثال ۱ــ۱۶

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 صفحهٔ فلزی متحرک متصل است. این صفحهٔ فلزی خود توسط یک دی‌الکتریک انعطاف‌پذیر از صفحهٔ فلزی ثابتی جدا شده است و درواقع این دو صفحه یک خازن تخت را تشکیل می‌دهند (شکل ب). با فشار دادن کلید، صفحهٔ متحرک به صفحهٔ ثابت نزدیک می‌شود و ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. این تغییر ظرفیت به‌صورت سیگنالی الکتریکی توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود و بدین‌ترتیب، مشخص می‌شود که کدام کلید فشار داده شده است.

فاصلهٔ بین صفحه‌ها عموماً $۵/۰۰ \times ۱۰^{-۳}\ m$ است که این فاصله با فشار دادن کلید به $۰/۱۵۰ \times ۱۰^{-۳}\ m$ می‌رسد. مساحت صفحه‌ها $۹/۵۰ \times ۱۰^{-۵}\ m^۲$ است و خازن از ماده‌ای با ثابت دی‌الکتریک ۳/۵۰ پر شده است. تغییر ظرفیتی که با فشار دادن کلید، توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود چقدر است؟



پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۸ ظرفیت خازن پیش از فشار دادن کلید برابر است با

$$C = \kappa\varepsilon_{\circ}\frac{A}{d} = ۳/۵۰(۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\,\mathrm{F/m})\frac{(۹/۵۰\times۱۰^{-۵}\,\mathrm{m^{۲}})}{(۵/۰۰\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{m})}$$

$$= ۰/۵۸۹\times۱۰^{-۱۲}\mathrm{F} = ۰/۵۸۹\mathrm{pF}$$

پس از فشرده شدن کلید، فاصلهٔ بین صفحه‌ها به $۱۰^{-۳}\mathrm{m}\times۰/۱۵۰$ می‌رسد و با محاسبه‌ای مشابه به $C = ۱۹/۶\times۱۰^{-۱۲}\mathrm{F} = ۱۹/۶\mathrm{pF}$ می‌رسیم. بنابراین، تغییر ظرفیت خازن که به‌صورت سیگنالی آشکار می‌شود از تفاضل دو مقدار بالا به‌دست می‌آید :

$$\Delta C = ۱۹/۶\mathrm{pF} - ۰/۵۸۹\mathrm{pF} = ۱۹/۰\mathrm{pF}$$

فعالیت ۱ــ۱۰

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

خوب است بدانید: نیروی وان‌دروالس[۱] و چسبیدن مارمولک‌ها به دیوار

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

پای مارمولک تعداد بی‌شماری مو موسوم به *سِتا* دارد که هر مو صدها برجستگی یا سرمثلثی 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.

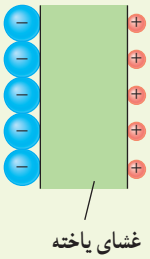
۱ــ Van der Waals

شکل ۱ــ۴۵ نقش‌های لیچنبرگ. فروریزش الکتریکی باعث تشکیل مسیرهای رسانشی سرخس شکلی در دی الکتریک شده است.

فروریزش الکتریکی: اثر دیگر حضور دی الکتریک‌ها درخازن، افزایش حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن است. اگر اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ یک خازن را به اندازهٔ کافی زیاد کنیم، تعدادی از الکترون‌های اتم‌های مادهٔ دی‌الکتریک، توسط میدان الکتریکی ایجادشده بین دو صفحه، کنده می‌شوند و مسیرهایی رسانا درون دی‌الکتریک[1] ایجاد می‌شود (شکل ۱ــ۴۵) که سبب تخلیهٔ خازن می‌گردد. به این پدیده فروریزش الکتریکی[2] مادهٔ دی‌الکتریک می‌گویند. فروریزش الکتریکی در عایق بین دو صفحهٔ 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 ۱ــ۴۶).

شکل ۱ــ۴۶ تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل بیشینهٔ قابل تحمل نوشته شده است.

تمرین ۱ــ۱۲



یک یاختهٔ عصبی(نورون) را می توان با یک خازن تخت مدل‌سازی کرد، به‌طوری‌که غشای سلول به عنوان دی الکتریک و یون های 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 یون های لازم (بافرض آنکه هر یون یک بار یونیده باشد)، برای آنکه یک اختلاف پتانسیل ۸۵mV ایجاد شود چقدر است؟ فرض کنید غشا دارای ثابت دی الکتریک $\kappa = ۳/۰$، ضخامت ۱۰/۰ nm و مساحت سطح $۱/۰ \times ۱۰^{-۱۰}\ m^۲$ است.

فعالیت ۱ــ۱۱

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

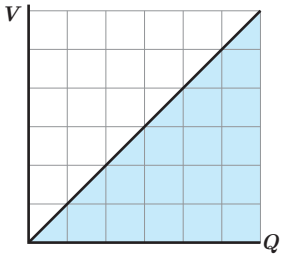
۱ــ۱۲ انرژی خازن

وقتی صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شوند در خازن انرژی ذخیره می‌شود. برای اینکه انرژی ذخیره‌شده در خازن را مشاهده کنیم، کافی است دو سر یک خازن پرشده را به دو سر یک لامپ کوچک وصل کنیم. به‌شرط آنکه ظرفیت و اختلاف پتانسیل خازن به اندازهٔ کافی زیاد باشد، لامپ برای مدتی روشن و سپس خاموش می‌شود. درهنگام شارژ شدن خازن توسط باتری، دائماً باری جزئی از یک صفحهٔ خازن جدا و به همان اندازه به صفحهٔ دیگر منتقل می‌شود. در این فرایند، طبق رابطهٔ ۱ــ۱۳

۱ــ موسوم به نقش‌های لیچنبرگ (Lichtenberg)

۲ــ Electrical Breakdown

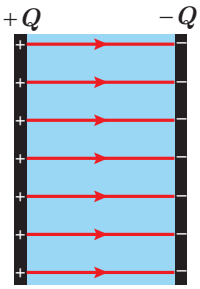
($W_{\text{خارجی}} = Q\,\Delta V$)، باتری روی این بار کار انجام می‌دهد. هنگام انتقال بار، اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ خازن نیز به آهستگی افزایش می‌یابد. بنابراین، برای انتقال بارهای بعدی به کار بیشتری نیاز است. بنا به رابطهٔ ۱ــ۱۵ ($V = Q/C$) و با توجه به اینکه در این فرایند ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است، اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ خازن تابعی خطی از بار ذخیره‌شده در آن می‌شود که به‌طور یکنواخت از صفر تا V افزایش می‌یابد (شکل ۱ــ۴۷). بنابراین، در هنگام باردار شدن خازن می‌توان اختلاف پتانسیل متوسطی را به‌صورت $V_{av} = \frac{V+0}{2}$ برای دو صفحهٔ خازن درنظر گرفت. آن‌گاه با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۳ کار انجام شده برای باردار شدن کامل خازن برابر با حاصل‌ضرب کلّ بارهای جزئی منتقل شده (Q) در اختلاف پتانسیل متوسط است :



شکل ۱ــ۴۷ نمودار ولتاژ برحسب بار برای خازنی که توسط یک باتری باردار می شود.

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

این کار به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی فضای بین صفحه‌های خازن ذخیره می‌شود (شکل ۱ــ۴۸) :



شکل ۱ــ۴۸ انرژی در میدان الکتریکی بین صفحات خازن ذخیره می‌شود.

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} \qquad (۱ــ۱۹)$$

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

مثال ۱ــ۱۸

مدار یک فلاش عکاسی، انرژی را با ولتاژ ۳۳۰ V، در یک خازن ۶۶۰ μF، ذخیره می‌کند. الف) چه مقدار انرژی الکتریکی در این خازن ذخیره می‌شود؟ ب) اگر تقریباً همهٔ این انرژی در مدت ۱/۰ ms آزاد شود، توان متوسط خروجی فلاش چقدر است؟

پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۱ــ۱۹ داریم

$$U = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}(660\times10^{-6}\,\text{F})(330\,\text{V})^2 = 35/9\,\text{J}$$

با توجه به تعریف توان داریم :

$$P_{av} = \frac{U}{t} = \frac{35/9\,\text{J}}{1/0\times10^{-3}\,\text{s}} = 3/6\times10^4\,\text{J/s} = 36\,\text{kW}$$

که این در تأیید گفته ای است که در ابتدای بخش ۱ــ۱۰ در مورد خازن بیان کردیم و گفتیم یک خازن باردار می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار بیشتری از یک باتری برای فلاش دوربین مهیّا کند.

مثال ۱ــ۱۹: دستگاه رفع لرزش نامنظم قلب (دِفیبریلاتور[۱])

توانایی خازن برای ذخیرهٔ انرژی پتانسیل الکتریکی، اساس کار دستگاه‌های رفع لرزشی است که برای توقف لرزش بطنی افراد دچار حملهٔ قلبی به‌کار می‌رود. در این بیماری، انبساط و انقباض ناهماهنگ قلب باعث می‌شود خون به‌درستی به مغز فرستاده نشود. در این دستگاه یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود ۶kV باردار می‌کند. صفحه‌های رابط (کفشک‌ها[۲]) روی قفسهٔ سینهٔ بیمار قرار داده می‌شوند و خازن بخشی از انرژی ذخیره شدهٔ خود را از طریق کفشک‌ها به بدن بیمار منتقل می‌کند. هدف از این کار این است که قلب به‌طور موقت از کار بیفتد و پس از آن با آهنگ منظم و طبیعی خود به‌کار افتد.

اگر ظرفیت خازن این دستگاه ۱۱/۰ μF باشد و با ولتاژ ۶/۰۰kV 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 تخلیهٔ انرژی تقریباً در مدت ۲/۰۰ms 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 رابطهٔ ۱ــ۱۹ به‌دست می‌آید :

$$U=\frac{1}{2}CV^2=\frac{1}{2}(11/0\times10^{-6}\,\mathrm{F})(6/00\times10^{3}\,\mathrm{V})^2=198\,\mathrm{J}$$

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

ب) بار اولیهٔ روی صفحات خازن برابر است با

$$Q=CV\Rightarrow Q=(11/0\times10^{-6}\mathrm{F})\,(6/00\times10^{3}\mathrm{V})=6/60\times10^{-2}\mathrm{C}$$

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

$$P_{av}=\frac{U}{t}=\frac{198\,\mathrm{J}}{2/00\times10^{-3}\,\mathrm{s}}=99/0\,\mathrm{kW}$$

۱ــ Defibrillator ۲ــ Paddles

۱ـ۱ و ۱ـ۲ بارالکتریکی، پایستگی و کوانتیده بودن بار

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

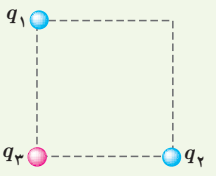
۲ یک میلهٔ پلاستیکی را با پارچهٔ پشمی مالش می‌دهیم. پس از مالش، بار الکتریکی میلهٔ پلاستیکی $-۱۲/۸\,nC$ می‌شود.
الف) بار الکتریکی ایجاد شده در پارچهٔ پشمی چقدر است؟
ب) تعداد الکترون‌های منتقل‌شده از پارچهٔ پشمی به میلهٔ پلاستیکی را محاسبه کنید.

۳ الف) بار الکتریکی اتم و هستهٔ اتم کربن ($_{۶}^{۱۲}C$) چند کولن است؟
ب) بار الکتریکی اتم کربن یک بار یونیده (C^{+}) چقدر است؟

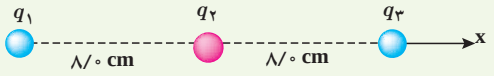
۱ـ۳ قانون کولن

۴ دو گوی رسانا، کوچک و یکسان به بارهای $q_۱=۴/۰\,nC$ و $q_۲=-۶/۰\,nC$ را با هم تماس می‌دهیم و سپس تا فاصلهٔ $r=۳۰\,cm$ از هم دور می‌کنیم. نیروی برهم‌کنش الکتریکی بین دو گوی را محاسبه کنید. این نیرو رانشی است یا ربایشی؟

۵ سه ذرّهٔ باردار $q_۱$، $q_۲$ و $q_۳$ مطابق شکل در سه رأس مربعی به ضلع $۳/۰\,m$ ثابت شده‌اند. اگر $q_۱=q_۲=-۵/۰\,\mu C$ و $q_۳=+۰/۲۰\,\mu C$ باشد، نیروی خالص الکتریکی وارد بر بار $q_۳$ را برحسب بردارهای یکهٔ $\vec{i}$ و $\vec{j}$ تعیین کنید.



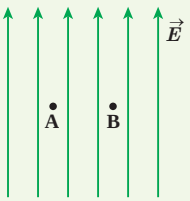
۶ بارهای الکتریکی نقطه‌ای $q_۱=-۴/۰\,nC$ ، $q_۲=+۵/۰\,nC$ و $q_۳=-۴/۰\,nC$ مطابق شکل، در جای خود ثابت شده‌اند. نیروی خالص الکتریکی وارد بر هریک از بارهای $q_۲$ و $q_۳$ را محاسبه کنید.



۷ در شکل روبه‌رو، دو گوی مشابه به جرم $۰/۲۵\,g$ و بار یکسان مثبت q در فاصلهٔ $۱/۰\,cm$ از هم قرار دارند، به‌طوری که گوی بالایی به حالت معلق مانده است.
الف) اندازهٔ بار q را به‌دست آورید.
ب) تعداد الکترون‌های کنده‌شده از هر گوی چقدر است؟

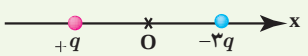
۱ـ۴، ۱ـ۵ و ۱ـ۶ میدان الکتریکی، میدان الکتریکی حاصل از یک ذرّهٔ باردار و خطوط میدان الکتریکی

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



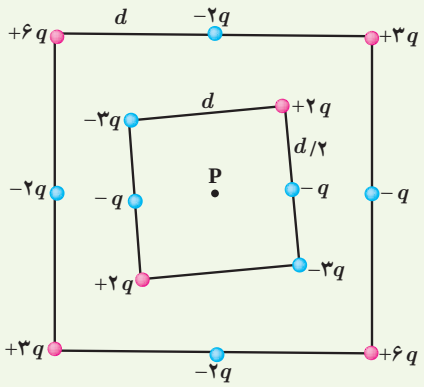
۹ هستهٔ اتم آهن شعاعی در حدود $۴/۰\times۱۰^{-۱۵}\,m$ دارد و تعداد پروتون‌های آن ۲۶ عدد است. الف) بزرگی نیروی دافعهٔ بین دو پروتون این هسته که به فاصلهٔ $۴/۰\times۱۰^{-۱۵}\,m$ از هم قرار دارند چقدر است؟ ب) اندازهٔ میدان الکتریکی ناشی از هسته در فاصلهٔ $۱/۰\times۱۰^{-۱۰}\,m$ از مرکز هسته چقدر است؟

۱۰ شکل زیر، دو ذرّهٔ باردار را نشان می‌دهدکه در جای خود روی محور x ثابت شده‌اند. بارها در فاصلهٔ یکسان a از مبدأ مختصات (نقطهٔ O) قرار دارند.
(الف) در کجای این محور (غیر از بی‌نهایت) نقطه‌ای وجود دارد که در آنجا میدان الکتریکی برایند برابر با صفر است؟ (ب) بزرگی و جهت میدان الکتریکی برایند در مبدأ مختصات را بیابید.

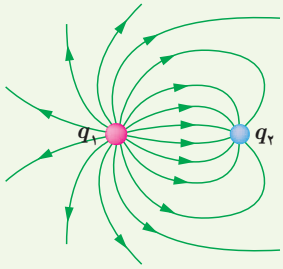


۱۱ در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $۴/۹\times۱۰^{۵}\,N/C$ که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذرّهٔ بارداری به جرم $۲/۰\,g$ معلّق و به حال سکون قرار دارد. اگر $g=۹/۸\,N/kg$ باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذرّه را مشخص کنید.

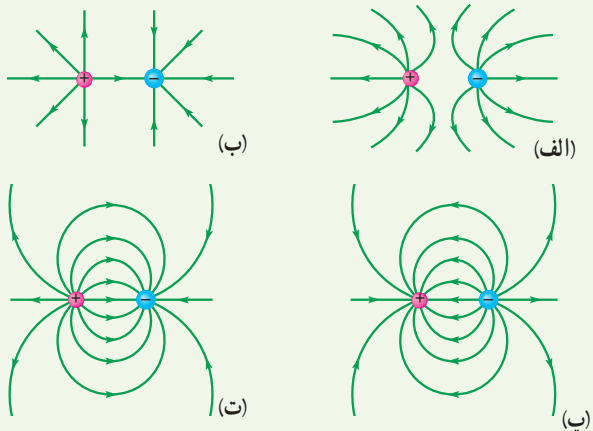
۱۲ شکل زیر دو آرایهٔ مربعی از ذرات باردار را نشان می‌دهد. مربع‌ها که در نقطهٔ P هم‌مرکزند، همدیف نیستند. ذرّه‌ها روی محیط مربع به فاصلهٔ d یا $d/۲$ از هم قرار گرفته‌اند. بزرگی و جهت میدان الکتریکی برایند در نقطهٔ P چیست؟



۱۳ خطوط میدان الکتریکی برای دو کرهٔ رسانای باردار کوچک در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. نوع بار هر کره را تعیین کرده و اندازهٔ آنها را مقایسه کنید.



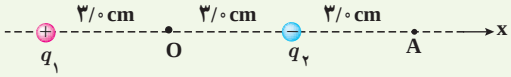
۱۴ در شکل‌های زیر، اندازهٔ دو بار، یکسان ولی علامت آنها مخالف هم است. کدام آرایش‌های خطوط میدان نادرست است؟ دلیل آن را توضیح دهید.



۱۵ دو بار الکتریکی نقطه‌ای غیرهمنام $q_۱=+۱/۰\,nC$ و $q_۲=-۱/۰\,nC$ مطابق شکل زیر به فاصلهٔ $۶/۰\,cm$ از یکدیگر قرار دارند.

الف) جهت و اندازهٔ میدان الکتریکی را در نقطه‌های O و A به‌دست آورید.

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



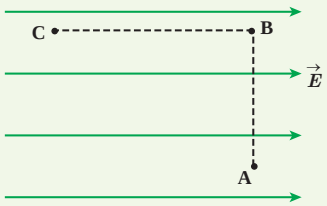
۱ــ۷ و ۱ــ۸ انرژی پتانسیل الکتریکی و پتانسیل الکتریکی

۱۶ مطابق شکل زیر، بار $q=+۵۰\,nC$ را در میدان الکتریکی یکنواخت $۸/۰\times۱۰^{۵}\,N/C$ نخست از نقطهٔ A تا نقطهٔ B و سپس تا نقطهٔ C جابه‌جا می‌کنیم. اگر $AB=۰/۲۰\,m$ و $BC=۰/۴۰\,m$ باشد، مطلوب است:

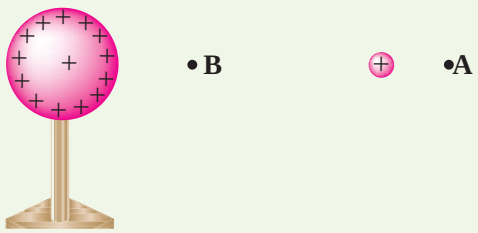
الف) نیروی الکتریکی وارد بر بار q،

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

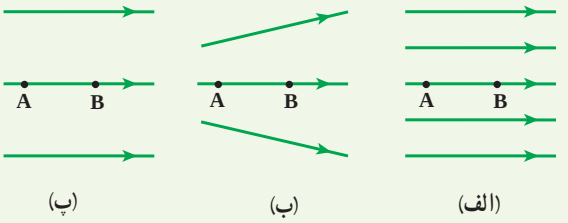
پ) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار q در این جابه‌جایی.



۱۷ در شکل زیر ذرّهٔ باردار مثبت و کوچکی را از حالت سکون، از نقطهٔ A به سمت کرهٔ باردار که روی پایهٔ عایقی قرار دارد، نزدیک می‌کنیم و در نقطهٔ 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 ذرّهٔ باردار در این جابه‌جایی چگونه تغییر می‌کند؟ (ت) پتانسیل نقطه‌های A و B را با هم مقایسه کنید.



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

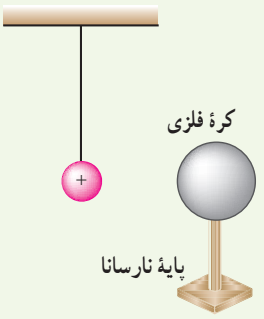


۱۹ دو صفحهٔ رسانا با فاصلهٔ ۲/۰۰ cm را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را به‌اختلاف پتانسیل ۱۰۰V وصل می‌کنیم. درنتیجه، یکی از صفحه‌ها به‌طور منفی و دیگری به‌طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی به‌وجود می‌آید. اندازهٔ این میدان الکتریکی را حساب کنید و با توجه به جهت خطوط میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه توضیح دهید که کدام‌یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیشتری دارند.

۲۰ بار الکتریکی $q=-۴۰\,nC$ از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی $V_۱=-۴۰\,V$ تا نقطه‌ای با پتانسیل $V_۲=-۱۰\,V$ 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.

۱ــ۹ میدان الکتریکی در داخل رساناها

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



۲۲ یک صفحهٔ پلاستیکی باردار (تلق یا ورق باردار) را به براده‌های ریز آلومینیمی بدون بار نزدیک می‌کنیم. مشاهده می‌شود که براده‌ها به طرف صفحهٔ 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 $q=۲/۰\times۱۰^{-۹}\,C$ شود. این ماهواره، مکعبی به ضلع ۴۰cm است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود.)

۱ــ۱۰ 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.

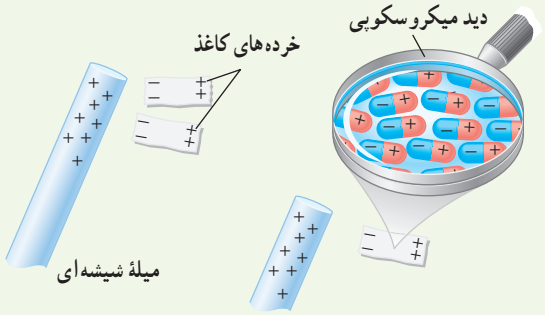
ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌های آن سه برابر شود.

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

۱ـ۱۱ خازن با دی‌الکتریک

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

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



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

۲۹ یک خازن تخت به یک باتری بسته شده است تا باردار شود. پس از مدتی، درحالی‌که باتری همچنان به خازن متصل است، فاصلهٔ بین صفحه‌های خازن را دو برابر می‌کنیم. کدام‌یک از موارد زیر درست است؟

الف) میدان الکتریکی میان صفحه‌ها نصف می‌شود.

ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌ها نصف می‌شود.

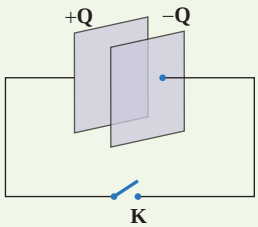
پ) ظرفیت خازن دو برابر می شود.

ت) بار روی صفحه‌ها تغییر نمی‌کند.

۳۰ مساحت هریک از صفحه‌های خازن تختی، $۱/۰۰\,m^۲$ و فاصلهٔ دو صفحه از هم، ۰/۵۰۰ mm است. عایقی با ثابت دی‌الکتریک ۴/۹ بین دو صفحه قرار داده شده است. ظرفیت خازن را تعیین کنید.

۱ـ۱۲ 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 باردار 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.



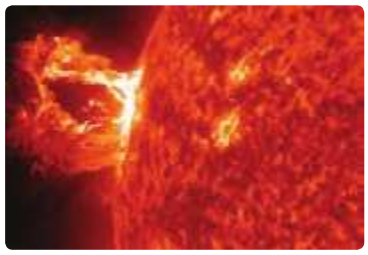
۳۲ ظرفیت خازنی ۱۲ میکروفاراد و بارالکتریکی آن q است. اگر $+۳/۰\,mC$ بار الکتریکی از صفحهٔ منفی به صفحهٔ مثبت منتقل شود، انرژی ذخیره‌شده در خازن به اندازهٔ ۸/۰J زیاد می‌شود. q را محاسبه کنید.

۲
جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

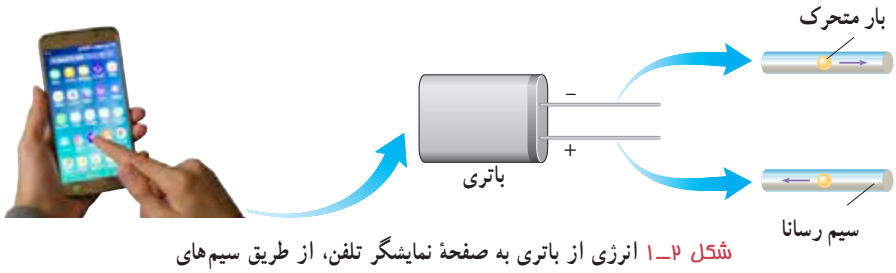
پژوهش‌های زیادی دربارهٔ بهبود کیفیت باتری خودروهای الکتریکی و هیبریدی (که در آنها از موتورهای درون‌سوز بنزینی و موتورهای الکتریکی با هم استفاده می‌شود) در حال انجام است. یک نوع از این باتری‌ها، باتری لیتیمی است که یکی از قطب‌های آن لیتیم و قطب دیگر آن کربن است. مسافتی که یک خودروی الکتریکی با هر بار 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 تلاش‌اند زمان شارژ این باتری‌ها را کاهش دهند. یکی از این راه‌ها استفاده از منبع‌های نیروی محرکه است که از اَبَر خازن‌ها استفاده می‌کند. با استفاده از این فنّاوری 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 بر هم کنش بارهای الکتریکی در حالت سکون پرداختیم. در این فصل به بررسی و مطالعهٔ جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم می‌پردازیم.

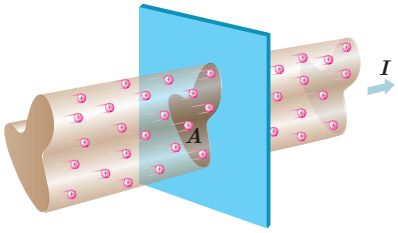
مثال‌های فراوانی می‌توان از کاربردهای جریان الکتریکی ارائه کرد؛ مثلاً انرژی موردنیاز صفحهٔ نمایشگر تلفن همراه، توسط یک باتری تأمین می‌شود. انرژی الکتریکی از طریق مسیرهای رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند به نمایشگر تلفن همراه می‌رسد (شکل ۲ــ۱). همچنین مهندسان برق با دستگاه‌های الکتریکی زیادی از قبیل مولدهای برق و دستگاه‌های ذخیرهٔ اطلاعات سر و کار دارند و مهندسان مخابرات نگران اختلالات ناشی از فوران‌های خورشیدی (شکل ۲ــ ۲) هستند. فیزیولوژیست‌ها و مهندسان پزشکی نیز با جریان‌های الکتریکی در رشته‌های عصبی سروکار دارند.



شکل ۲ــ۲ فوران عظیمی از الکترون‌ها و یون‌ها که از سطح خورشید پرتاب می‌شوند.

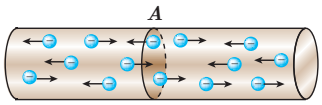


شکل ۲ــ۱ انرژی از باتری به صفحهٔ نمایشگر تلفن، از طریق سیم‌های رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند، منتقل می‌شود.



شکل ۲ــ۳ باریکه‌ای از بارهای مثبت از سطح مقطع A می‌گذرند و جریان I را ایجاد می‌کنند.

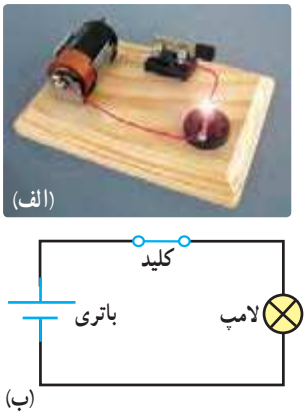
اکنون با این پرسش شروع می‌کنیم که چرا هر مجموعه‌ای از بارهای متحرک لزوماً جریان الکتریکی ایجاد نمی‌کنند؟ در واقع برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم، باید یک انتقال خالص بار از یک سطح مقطع معیّن رخ دهد (شکل ۲ــ۳) که به این منظور نیاز به ابزاری مانند باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را در جهت معینی به حرکت درآورد.



شکل ۲ــ۴ در نبود اختلاف پتانسیل، شارش بار خالصی از مقطع معیّن A سیم، نداریم.

۲ــ۱ جریان الکتریکی

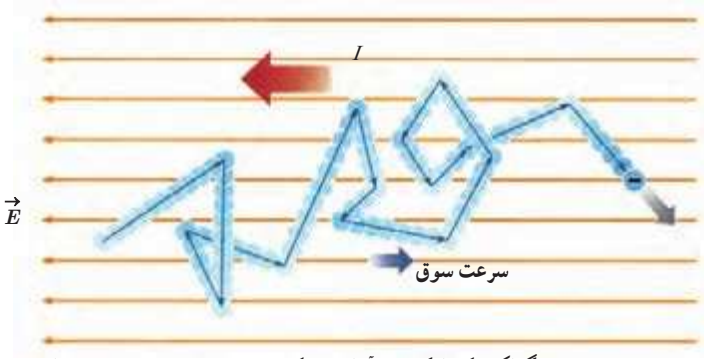
جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همهٔ بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. برای داشتن جریان الکتریکی باید یک شارش خالص بار از یک سطح مقطع معیّن داشته باشیم. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. الکترون‌های آزاد در طول این سیم با تندی‌هایی از مرتبهٔ $10^6 m/s$ در حرکت‌اند، ولی این حرکت به‌طور کاتوره‌ای در همهٔ جهت‌هاست. بنابراین، هیچ شارش خالص باری از مقطعی معیّن نداریم (شکل ۲ــ۴). ولی اگر این سیم را در مداری الکتریکی مانند شکل ۲ــ۵ 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 ۲ــ۶) به‌طوری که می‌تواند لامپ مدار ۲ــ۵ 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[1] در خلاف جهت میدان به‌طور بسیار آهسته‌ای سوق پیدا می‌کنند که این موجب



شکل ۲ــ۵ الف) یک مدار الکتریکی ساده که از لامپ، باتری، کلید و سیم‌های رابط تشکیل شده است. ب) معمولاً برای رسم مدار از نمادهای استاندارد شده‌ای برای نشان دادن اجزای مدار استفاده می‌شود.

۱ــ drift velocity

برقراری جریان الکتریکی در رسانا می‌شود (شکل ۲ــ۷). اندازهٔ سرعت سوق در یک رسانای فلزی در مقایسه با تندی کاتوره‌ای الکترون‌های آزاد، بسیار کم و مثلاً در سیم‌های مسی از مرتبهٔ بزرگی $10^{-5}\,m/s$ یا $10^{-4}\,m/s$ است. توجه کنید که جهت قراردادی جریان الکتریکی I، برخلاف جهت سوق الکترون‌هاست.



شکل ۲ــ۷ مسیر زیگزاگ یک الکترون آزاد در یک رسانای فلزی. در حضور میدان الکتریکی، این مسیر زیگزاگ در خلاف جهت میدان سوق یافته است[1].

فعالیت ۲ــ۱

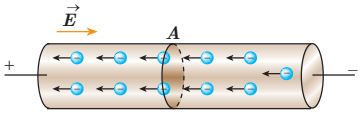
سرعت سوق الکترون‌های آزاد در یک رسانا می‌تواند به کندیِ سرعت حرکت یک حلزون باشد. اگر سرعت سوق الکترون‌ها این‌قدر کم است، پس چرا وقتی کلید برق را می‌زنیم چراغ‌های خانه به سرعت روشن می‌شوند؟ (*راهنمایی*: شیلنگ شفافی را در نظر بگیرید. وقتی شیر را باز می‌کنید، هنگامی که شیلنگ پر از آب است، آب بلافاصله از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

اکنون می‌خواهیم تعریفی برای جریان الکتریکی در یک رسانا ارائه کنیم. فرض کنید بار خالص Δq در بازهٔ 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

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \qquad (۲ــ۱)$$

در رابطهٔ ۲ــ۱ بار الکتریکی (Δq) برحسب کولن (C)، مدت زمان (Δt) برحسب ثانیه (s) و جریان (I) برحسب آمپر (A) است. برخی از مقادیر تقریبی جریان‌های متداول عبارت‌اند از ۱A برای لامپ حبابیِ ۲۰۰W، ۲۰۰A برای استارت خودرو، ۱mA برای تأمین انرژی نمایشگر گوشی همراه، ۱nA برای جریان نورون‌های مغزی، ۱۰kA در یک یورش آذرخش نوعی، و ۱GA در بادهای خورشیدی[2].

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[3] است.



شکل ۲ــ۶ در حضور اختلاف پتانسیل، شارش بار خالص از مقطع A سیم، دیگر برابر صفر نیست.

آندره ماری آمپر (۱۸۳۶ــ ۱۷۷۵م)

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

۱ــ در واقع، هر بخش این مسیر زیگزاگ اندکی خمیده است که در شکل برای سادگی نشان داده نشده است.

۲ــ به‌خاطر سپردن این مقادیر ضرورتی ندارد.

۳ــ Direct Current (DC)

مثال ۲ــ۱

ولتاژ باتری یک نوع ماشین‌حساب ۳/۰V است. وقتی ماشین‌حساب روشن است، این باتری باعث عبور جریان ۰/۱۷mA 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 ماشین‌حساب می‌دهد؟

پاسخ : الف) باری که در یک ساعت از مدار می‌گذرد، با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱ برابر است با

$$\Delta q = I(\Delta t) = (۰/۱۷ \times ۱۰^{-۳}\mathrm{A})(۳/۶ \times ۱۰^{۳}\mathrm{s}) = ۰/۶۱\mathrm{C}$$

ب) انرژی‌ای که باتری به مدار می‌دهد، بنابه رابطهٔ ۱ــ۱۳ ($W_{\text{خارجی}} = q\Delta V$) چنین می‌شود :

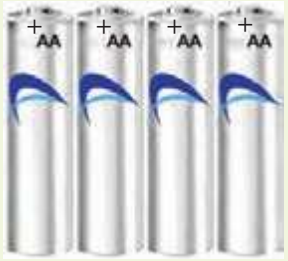
$$q\Delta V = (۰/۶۱\mathrm{C})(۳/۰\mathrm{V}) = ۱/۸\mathrm{J} = \text{انرژی داده شده به مدار}$$

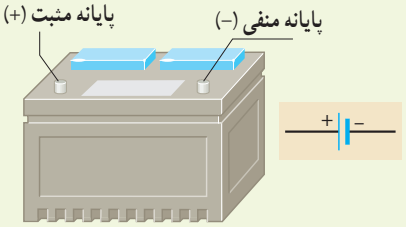
تمرین ۲ــ۱

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

الف) باتری استاندارد خودرویی، ۵۰Ah است. اگر این باتری جریان متوسط ۵/۰A را فراهم سازد، چقدر طول می‌کشد تا خالی شود؟

ب) روی یک باتری قلمی مقدار ۱۰۰۰mAh نوشته شده است. اگر این باتری جریان متوسط ۱۰۰μA را فراهم سازد، چه مدت طول می‌کشد تا خالی شود؟





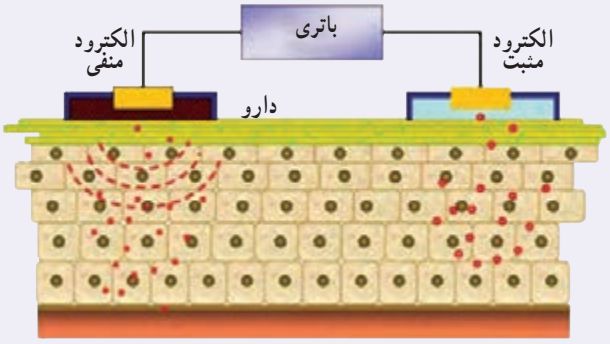
خوب است بدانید: یون‌رانی[1]

برای درمان التهاب سه روش وجود دارد. روش نخست که بدون درد است، خوردن دارو است. در این روش مقدار کمی دارو، از مرتبهٔ ۱μg، به بافت آسیب‌دیده می‌رسد. روش دوم تزریق آمپول است. این روش دردناک است، ولی می‌تواند داروی زیادی، از مرتبهٔ ۱۰mg را به بافت آسیب‌دیده برساند، یعنی ۱۰۰۰۰ برابر بیش از روش خوردن دارو. اما از دههٔ ۹۰ میلادی روش سومی نیز مطرح شده است که بدون درد است، ولی می‌تواند مقدار دارویی از مرتبهٔ ۱۰۰μg را به بافت آسیب‌دیده برساند. این روش که موسوم به *یون‌رانی* است، دارو را با استفاده از جریان‌های الکتریکی بسیار ضعیف به بافت آسیب دیده می‌رساند. یک وسیلهٔ 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[2]) را به محل التهاب مالیده و الکترود منفی را روی آن

۱ــ Iontophoresis

۲ــ 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 ۰/۱۴mA به پای آسیب دیده برساند (شکل ب)، محاسبه نشان می‌دهد که این عمل ۱۵ دقیقه به طول خواهد انجامید.



(الف)

(ب)

۲ــ۲ مقاومت الکتریکی و قانون اهم

همان‌طور که در بخش قبل دیدیم وقتی در مداری 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**[1] است. از اینجا می‌توان پیش‌بینی کرد که مقاومت الکتریکی به ابعاد هندسی رسانا، یعنی طول و سطح مقطع رسانا بستگی دارد. همچنین جنس مادهٔ 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؛ به‌طوری که سیم با مقاومت کمتر، جریان بیشتری از خود عبور می‌دهد و بالعکس. از اینجا می‌توان مقاومت الکتریکی بین دو نقطه از یک رسانا را به صورت زیر تعریف کرد:

$$R = \frac{V}{I} \qquad (۲ــ۲)$$

در این رابطه مقاومت الکتریکی (R) برحسب ولت بر آمپر (V/A) می‌شود که به پاس خدمات علمی *جُرج سیمون اُهم* به نام **اُهم** نام‌گذاری شده است و با نماد Ω[2] نشان داده می‌شود. رسانایی را که دارای مقاومت الکتریکی مشخصی است، اصطلاحاً **مقاومت**[3] می‌نامند و آن را در مدارهای الکتریکی با نماد ⎓ نمایش می‌دهند.

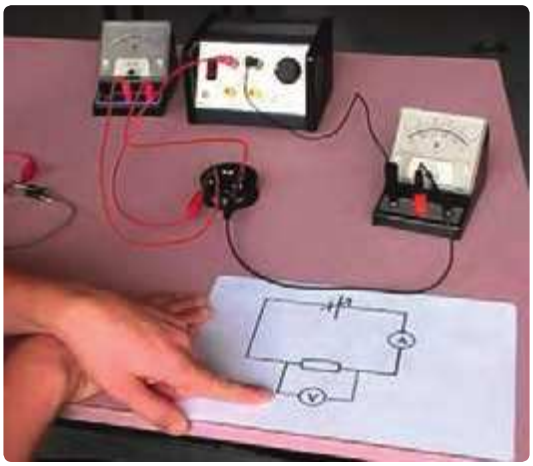
جورج سیمون اُهم (۱۸۵۴ــ۱۷۸۷م)

جورج سیمون اُهم در شهر باواریا آلمان متولد شد. جورج در ۱۸ سالگی به‌عنوان معلم ریاضی در یکی از مدارس سوئیس مشغول به کار شد. اُهم مطالعاتش را در رشتهٔ ریاضی دنبال کرد و در سال ۱۸۱۱ موفق به اخذ درجهٔ 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 «اُهم» نام‌گذاری کردند.

۱ــ Resistance

۲ــ از حروف الفبای یونانی که اُمگا خوانده می‌شود.

۳ــ Resistor



شکل ۲ــ۸ اسباب تحقیق قانون اُهم. توجه کنید که آمپرسنج در مدار به‌صورت متوالی و ولت‌سنج به‌صورت موازی بسته شده است.

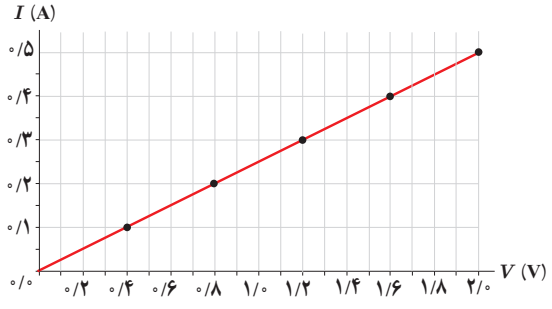
وسیله‌هایی که جریان الکتریکی را از خود عبور می‌دهند ممکن است با تغییر اختلاف پتانسیل اعمال‌شده و در نتیجه تغییر جریان عبوری، مقاومت ثابتی از خود بروز دهند و یا با تغییر اختلاف پتانسیل، مقاومت‌شان تغییر کند. برای تشخیص چنین وسایلی از هم، آزمایشی را تدارک می‌بینیم؛ به‌این ترتیب که وسیله را مانند شکل ۲ــ۸ 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 ولت‌سنجِ مدار اندازه می‌گیریم و سپس با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۲ 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 اُهمی می‌نامند. به عبارتی جریان عبوری از یک مقاومت اهمی همواره با اختلاف پتانسیل اعمال‌شده به دو سر آن رابطهٔ مستقیم دارد.

این قانون برای فلزات و بسیاری از رساناهای غیر فلزی در دمای ثابت برقرار است. جدول ۲ــ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده برای جریان و اختلاف پتانسیل یک مقاومت را نشان می‌دهد که از قانون اُهم پیروی می‌کند. همان‌طور که نمودار شکل ۲ــ۹ نشان می‌دهد جریان با ولتاژ برای این وسیله به‌طور خطی افزایش می‌یابد.

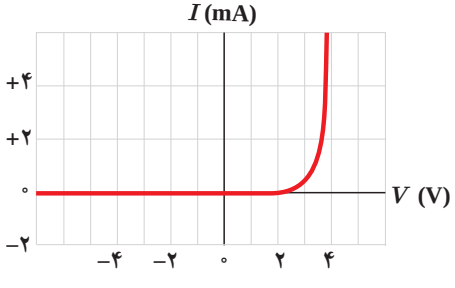
با این حال وسیله‌های زیادی نیز یافت می‌شود که از این قانون پیروی نمی‌کنند. یکی از این وسیله‌های غیراهمی، دیود نورگسیل (LED) است که با آن بعداً آشنا می‌شویم. نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل چنین دیودی تقریباً شبیه شکل ۲ــ۱۰ است.

جدول ۲ــ۱ مقادیری نوعی برای یک رسانای اُهمی

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

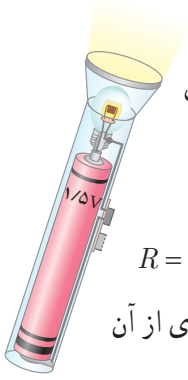


شکل ۲ــ۹ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل نشان می‌دهد که برای این رسانای اُهمی، جریان به‌طور مستقیم با ولتاژ افزایش می‌یابد.



شکل ۲ــ۱۰ نمودار جریان برحسب اختلاف پتانسیل برای یک دیود نورگسیل

مثال ۲ــ۲



یک لامپ چراغ قوهٔ کوچک از یک باتری ۱/۵V، جریانی برابر ۰/۳۰A می‌کشد. با فرض آنکه رشتهٔ لامپ، یک رسانای اُهمی باشد، الف) مقاومت آن چقدر است؟ ب) اگر باتری ضعیف شود و ولتاژ به ۱/۲V افت کند، جریان چقدر می‌شود؟ از تغییر مقاومت رشتهٔ لامپ در اثر تغییر دما چشم‌پوشی می‌شود.

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۲ برای مقاومت رشتهٔ لامپ داریم :

$$R=\frac{V}{I}=\frac{۱/۵\text{V}}{۰/۳۰\text{A}}=۵/۰\Omega$$

ب) دوباره از رابطهٔ ۲ــ۲ استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه اکنون مقاومت رشتهٔ لامپ را داریم، جریان عبوری از آن چنین می‌شود :

$$I=\frac{V}{R}=\frac{۱/۲\text{V}}{۵/۰\Omega}=۰/۲۴\text{A}$$

۲ــ۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

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

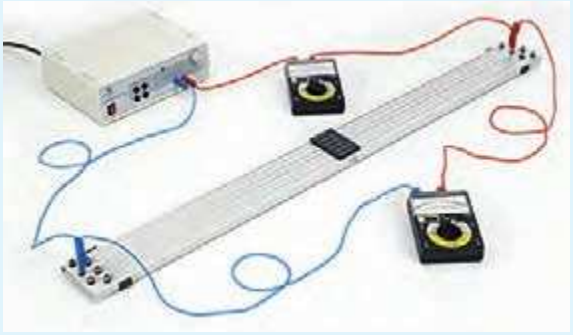
فعالیت ۲ــ۲

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

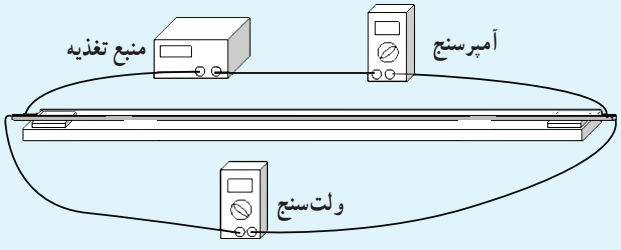
۱ــ قطعهٔ سیم‌هایی از جنس یکسان، مثلاً کنستانتان (یا نیکروم) با قطر برابر ولی طول‌های متفاوت را در مدار قرار دهید و با استفاده از تعریف مقاومت، مقاومت هر کدام از سیم‌ها را با استفاده از عددی که آمپرسنج و ولت‌سنج نشان می‌دهند محاسبه و نتایج خود را در جدولی ثبت کنید. به‌نظر شما چه رابطه‌ای بین مقاومت سیم‌ها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

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

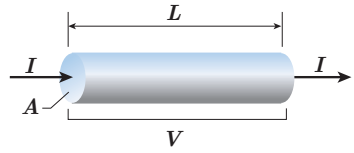
۳ــ آزمایش را با دو قطعه سیم هم‌طول و با قطر یکسان انجام دهید که این بار جنس یکی از آنها کنستانتان و دیگری نیکروم است و نتایج خود را یادداشت کنید. از این فعالیت چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



(الف) اسباب آزمایش اندازه‌گیری مقاومت یک سیم رسانا



(ب) طرحی از مدار این آزمایش



شکل ۲ــ۱۱ از سیمی به طول L و مقطع یکنواخت A، تحت اختلاف پتانسیل V، جریان I می‌گذرد.

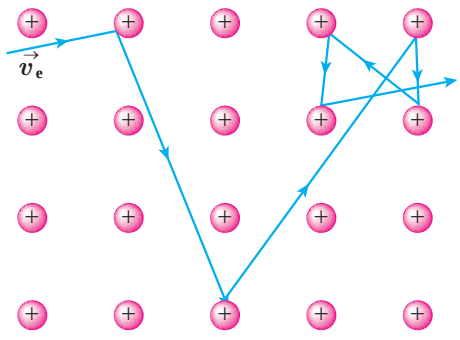
با انجام فعالیت بالا درمی‌یابیم که مقاومت جسم در دمای ثابت به طول، مساحت مقطع، و جنس آن بستگی دارد. این آزمایش‌ها که با محاسبات نظری نیز تأیید شده‌اند نشان می‌دهد اگر سطح مقطع جسم در تمام طول آن یکسان باشد (شکل ۲ــ۱۱)، مقاومت آن از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad (۲ــ۳)$$

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

مقاومت ویژهٔ یک ماده به ساختار اتمی و دمای آن بستگی دارد. رساناهای الکتریکی خوب مقاومت ویژهٔ بسیار کم و عایق‌های خوب مقاومت ویژهٔ بسیار زیادی دارند. جدول ۲ــ۲ مقاومت ویژهٔ 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 ویژهٔ آنها بین مقاومت ویژهٔ رساناها و نارساناهاست. به‌این 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 شبکهٔ اتمی رسانای فلزی می‌شود (شکل ۲ــ۱۲) و به این ترتیب، مقاومت رسانا در برابر



شکل ۲ــ۱۲ حرکت الکترون در داخل شبکهٔ بلوری فلز. با افزایش دما، ارتعاشات شبکه و درنتیجه برخورد الکترون‌ها با شبکه افزایش می‌یابد.

جدول ۲ــ۲ــ مقاومت ویژه در دمای $20^\circ C$ و ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ برخی از رساناها و نیم‌رساناها

ماده	مقاومت ویژه ρ ($\Omega.m$)	ضریب دمایی مقاومت ویژه α (K^{-1})
رسانای فلزی		
نقره	$1/6\times10^{-8}$	$4/1\times10^{-3}$
مس	$1/7\times10^{-8}$	$4/3\times10^{-3}$
طلا	$2/4\times10^{-8}$	$3/4\times10^{-3}$
آلومینیم	$2/8\times10^{-8}$	$4/4\times10^{-3}$
تنگستن	$5/5\times10^{-8}$	$4/5\times10^{-3}$
آهن	$9/7\times10^{-8}$	$6/5\times10^{-3}$
پلاتین	10×10^{-8}	$3/9\times10^{-3}$
سرب	22×10^{-8}	$4/3\times10^{-3}$
کُنستانتان [1]	44×10^{-8}	$2/0\times10^{-6}$
نیکروم [2]	100×10^{-8}	$4/0\times10^{-4}$
نیم‌رسانا		
گرافیت	$3/5\times10^{-5}$	-5×10^{-4}
ژرمانیُم	$0/46$	-5×10^{-2}
سیلیسیم خالص	$2/5\times10^{3}$	-7×10^{-2}
عایق		
انواع شیشه	$10^{10}-10^{14}$	
لاستیک سخت	10^{13}	
کوارتز (ذوب شده)	10^{16}	

۱ــ ۶۰ درصد مس، ۴۰ درصد نیکل

۲ــ ۵۹ درصد نیکل، ۲۳ درصد مس، ۱۶ درصد کرم و ...

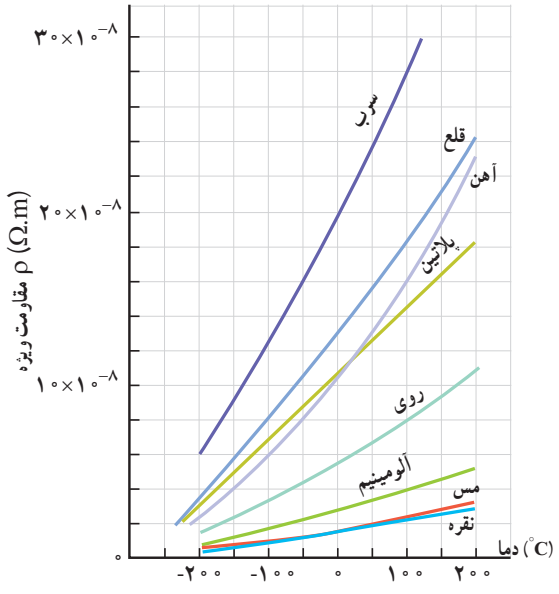
عبور جریان زیاد می‌شود؛ مثلاً در یک لامپ رشته‌ای حبابی (شکل ۲ــ۱۳) مقاومت آن با افزایش دمای رشته به‌شدت افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت ویژهٔ فلزات در یک گسترهٔ دمایی نسبتاً بزرگ، با دما تقریباً به‌طور خطی تغییر می‌کند. شکل ۲ــ۱۴، مقاومت ویژهٔ برخی از فلزات را در محدوده‌ای از دما نشان می‌دهد. یک تقریب تجربی خوب که برای اغلب مقاصد، به حدّ کافی مناسب است توسط رابطهٔ زیر داده می‌شود :

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \qquad (۴ــ۲)$$

شکل ۲ــ۱۳ عبور جریان از رشتهٔ (فیلامان)تنگستنی موجب درخشش لامپ حبابی شده است.

که در آن T_0 دمای مرجع و ρ_0 مقاومت ویژه در آن دماست (معمولاً T_0 را دمای اتاق $T_0 = ۲۰^\circ C = ۲۹۳K$ می‌گیرند) و α ثابتی موسوم به ضریب دمایی مقاومت ویژه و T دمای رسانا (برحسب $^\circ C$ یا K) است. یکای α در این رابطه K^{-1} (یا $^\circ C^{-1}$) است.

اگر یک نیم‌رسانا داشته باشیم، در دماهای پایین تعداد حامل‌های بار[1] 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 شبکهٔ اتمی افزایش می‌یابد، اما تأثیر افزایش تعداد حامل‌های بار بیشتر از افزایش این برخوردهای کاتوره‌ای است. به این ترتیب، مقاومت ویژهٔ نیم‌رساناها با افزایش دما کاهش می‌یابد. ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ برخی از مواد در جدول ۲ــ۲ داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌کنید این ضریب برای نیم‌رساناها منفی است که به معنی کاهش مقاومت ویژهٔ این مواد با افزایش دما است.



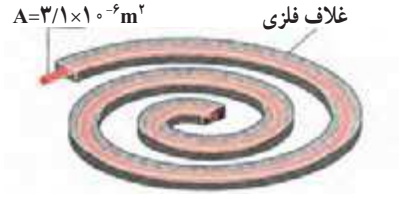
شکل ۲ــ۱۴ نمودار مقاومت ویژهٔ چند فلز در یک گسترهٔ دمایی

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

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

مثال ۲ــ۳

شکل روبه‌رو، المنت یک اجاق برقی را نشان می‌دهد. این المنت شامل سیمی به طول ۱/۱m و سطح مقطع $۳/۱\times۱۰^{-۶}m^۲$ است که داخل مادهٔ عایقی قرار گرفته است که خود، درون یک غلاف فلزی است. با عبور جریان، المنت داغ می‌شود. مقاومت ویژهٔ مادهٔ سازندهٔ سیم در دمای $T_۰ = ۳۲۰^\circ C$ برابر با $\rho_۰ = ۶/۸\times۱۰^{-۵}\Omega.m$ است و ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ آن $\alpha = ۲/۰\times۱۰^{-۳}K^{-۱}$ است. مقاومت سیم در دمای $۴۲۰^\circ C$ چقدر است؟



یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

پاسخ : مقاومت ویژهٔ ρ را از رابطهٔ $\rho = \rho_۰[۱ + \alpha(T - T_۰)]$ حساب می‌کنیم :

$$\rho = \rho_۰[۱ + \alpha(T - T_۰)] = (۶/۸\times۱۰^{-۵}\Omega.m)[۱ + (۲/۰\times۱۰^{-۳}K^{-۱})(۱۰۰K)]$$
$$= ۸/۲\times۱۰^{-۵}\Omega.m$$

حال از رابطهٔ ۳ــ۲ مقاومت سیم در دمای $۴۲۰^\circ C$ برابر است با

$$R = \rho\frac{L}{A} = (۸/۲\times۱۰^{-۵}\Omega.m)\frac{(۱/۱m)}{(۳/۱\times۱۰^{-۶}m^۲)} = ۲۹\Omega$$

مثال ۲ــ۴: 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 گسترهٔ دمایی حدوداً از ۱۴K تا ۱۲۳۵K 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 نقطهٔ ذوب بالایی دارد.

تصویری از یک دماسنج مقاومت پلاتینی

فرض کنید در دمای $۲۰/۰^\circ C$ مقاومت پلاتین یک دماسنج برابر با ۱۶۴Ω باشد. وقتی این دماسنج در محلول خاصی قرار گیرد، مقاومت آن ۱۸۷Ω می‌شود. دمای این محلول چقدر است؟ (مقدار دقیق α برای پلاتین برابر $۳/۹۲\times۱۰^{-۳}(^\circ C)^{-۱}$ است.)

پاسخ : چون مقاومت R رابطهٔ مستقیمی با مقاومت ویژهٔ ρ دارد ($R = \rho L/A$)، آن‌گاه از رابطهٔ ۲ــ۴ نتیجه می‌گیریم [۱] :

$$R = R_۰[۱ + \alpha(T - T_۰)]$$

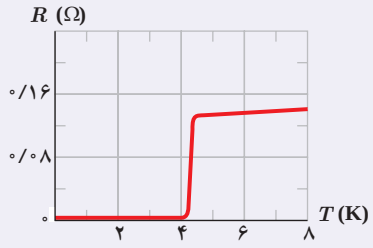
که در آن $R_۰ = \rho_۰\frac{L}{A}$ مقاومت سیم در دمای $T_۰ = ۲۰/۰^\circ C$ است. با جایگذاری مقادیر معلوم در معادلهٔ بالا خواهیم داشت :

$$۱۸۷\Omega = (۱۶۴\Omega)[۱ + (۳/۹۲\times۱۰^{-۳}(^\circ C)^{-۱})(T - ۲۰/۰^\circ C)] \Rightarrow T = ۵۵/۸^\circ C$$

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

خوب است بدانید: ابَررسانایی[1]

در اوایل قرن بیستم میلادی پدیدهٔ شگفت‌انگیزی برای برخی از فلزات در دمای خیلی پایین مشاهده شد و دریافتند با کاهش دما، مقاومت ویژهٔ این فلزات در دمای خاصی موسوم به دمای بحرانی[2]، *ناگهان* به صفر افت می‌کند و از آن دما پایین‌تر همچنان صفر باقی می‌ماند. به این پدیده ابررسانایی می‌گویند. فیزیک‌دان هلندی *کامرلینگ اونز*[3] در سال ۱۹۱۱ برای نخستین بار، این پدیده را برای جیوه مشاهده کرد و دریافت که در دمای حدود ۴K مقاومت ویژهٔ جیوه به‌طور ناگهانی صفر می‌شود (شکل را ببینید). دمای بحرانی برای فلزات ابر رسانای مختلف، متفاوت است، ولی برای اغلب آنها نزدیک به صفر کلوین 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 نمونهٔ 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.



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

عنصر	دمای بحرانی(K)
تنگستن	۰/۰۱۵۴
بریلیم	۰/۰۲۶
تیتانیم	۰/۳۹
کادمیم	۰/۵۲
اُسمیم	۰/۶۵۵
مولیبدن	۰/۹۱۶
گالیم	۱/۰۸۳۳
آلومینیم	۱/۱۷۵
پروتاکتینیم	۱/۴
ایندیم	۳/۴۰۵
قلع	۳/۷۲۱
جیوه	۴/۱۵۴
تانتال	۴/۴۷
سرب	۷/۲۳
نیوبیم	۹/۲۵

برای اینکه به درکی از پدیدهٔ 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 محرکهٔ شاره استفاده کنید؛ زیرا اگر اصطکاکی نباشد برای ادامهٔ حرکت یکنواخت نیاز به هیچ نیروی خارجی‌ای نخواهد بود. مثلاً اگر این شاره را در لولهٔ 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. *کاپیتزا*[4] فیزیکدان روسی در سال ۱۹۳۷ میلادی مشاهده کرد که هلیم مایع اگر تا زیر ۲/۱۲K سرد شده باشد، چسبندگی بسیار ناچیزی خواهد داشت و در قیاس با ابررساناها به این هلیم ابرشاره گفته می‌شود. پس شارش مایع بدون چسبندگی، مانند جریان الکتریکی در ابررساناهاست. به همین ترتیب اگر در یک حلقهٔ ابر رسانا جریانی الکتریکی ایجاد کنیم، پس از حذف نیروی محرکهٔ الکتریکی جریان متوقف نخواهد شد و برای مدتی طولانی ادامه خواهد یافت. فیزیک‌دانی به نام *کالینز*[5] در سال ۱۹۵۶ میلادی توانست جریان ثابتی را در یک حلقهٔ ابررسانا به مدت ۲/۵ سال حفظ کند. بنابراین، ابر رسانایی اهمیت بالقوهٔ زیادی در فنّاوری دارد؛ زیرا بدان معناست که بار می‌تواند بدون اتلاف انرژی در داخل یک ابر رسانا جریان پیدا کند، و کشف مواد سرامیکی که می‌توانند در دمای بالا ابر رسانا شوند وعدهٔ روزی را می‌دهد که وسایل ابررسانا در دمای اتاق به کار گرفته شوند.

۱ــ Super ــ Conductivity
۲ــ Critical Temperature
۳ــ Kamerlingh Onnes
۴ــ P. L. Kapitza
۵ــ T. Collins

خوب است بدانید: نمره‌بندی سیم‌ها

در صنعتِ تولید سیم، سیم‌ها را با ضخامت‌های معیّنی 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 معیّن کُد (نمره) مشخصی را اختصاص می‌دهند. جدول روبه‌رو، برخی از این نمره‌بندی‌ها با جریان مجاز بیشینهٔ چند سیم را براساس استاندارد بین‌المللی SWG[1] و استاندارد آمریکایی AWG[2] نشان می‌دهد.

نمره‌بندی سیم‌های توپر مسی براساس دو استاندارد SWG و AWG

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

مثال ۲ــ۵

سیم‌کشی خانه‌ها معمولاً با سیم‌های مسی نمرهٔ ۱۴ بر اساس 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

$$A=\pi r^2=\pi D^2/4=(3/14)(2/032\times10^{-3}\text{m})^2/4=3/24\times10^{-6}\text{m}^2$$

از طرفی مقاومت ویژهٔ سیم مسی در دمای 20°C با استفاده از جدول ۲ــ۲، برابر $1/69\times10^{-8}\Omega.\text{m}$ و طول سیم مسی ۱۰۰ m است. بنابراین، با استفاده از رابطهٔ $R=\rho L/A$ برای مقاومت سیم مسی خواهیم داشت :

$$R=\rho\frac{L}{A}=(1/69\times10^{-8}\Omega.\text{m})\frac{(100\text{m})}{(3/24\times10^{-6}\text{m}^2)}=0/522\Omega$$

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.

۱ــ **مقاومت‌های پیچه‌ای**[3] شامل پیچه‌ای از یک سیم نازک‌اند که معمولاً جنس آنها از آلیاژهایی مانند

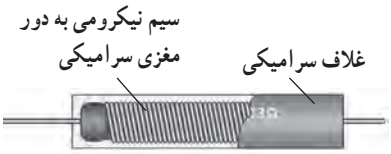
۱ــ Standard Wire Gauge

۲ــ American Wire Gauge

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

نیکروم[1] یا *منگانین*[2] است. شکل ۲ــ۱۵ــ الف نمونه‌ای از ساختار چنین مقاومت‌هایی را نشان می‌دهد.

این مقاومت‌ها برای به‌دست آوردن مقاومت‌های پایین بسیار دقیق و همچنین توان‌های بالا ساخته می‌شوند. بیشینهٔ توان الکتریکی که این مقاومت‌ها می‌توانند تحمل کنند، بی‌آنکه بسوزند روی آنها نوشته شده است (شکل ۲ــ ۱۵ــ ب).

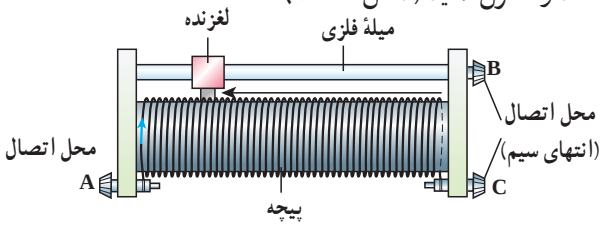


الف) نمونه‌ای از ساختار یک مقاومت پیچه‌ای

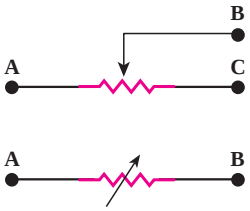
ب) تصویری از یک مقاومت پیچه‌ای

شکل ۲ــ۱۵

یکی از انواع مشهور مقاومت‌های پیچه‌ای، رئوستا[3] نام دارد که یک نوع مقاومت متغیر است. در مدارهای الکترونیکی وسیله‌ای به نام پتانسیومتر[4] به نوعی همان نقش را انجام می‌دهد. این نوع مقاومت‌ها، متغیرند. یک رئوستا از سیمی با مقاومت ویژهٔ نسبتاً زیاد ساخته شده است. در یکی از انواع رئوستا (رئوستای خطی)، این سیم روی استوانه‌ای نارسانا پیچیده شده و با استفاده از دکمه‌ای لغزنده که روی ریلی در بالای استوانه قرار دارد و انتهای آن با سیم در تماس است می‌تواند قسمت دلخواهی از سیم را در مسیر جریان قرار دهد، و بنابراین مقدار مقاومت را تغییر داده و جریان را در مدار کنترل نماید (شکل ۲ــ۱۶).

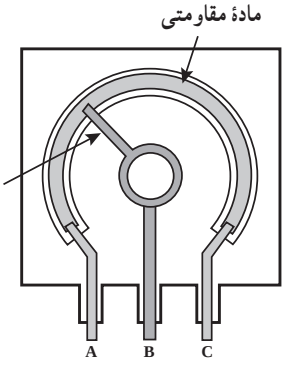


الف) طرحی از ساختار یک رئوستای خطی



ب) نماد یک رئوستا یا پتانسیومتر در مدار الکتریکی

پ) تصویر واقعی یک رئوستای خطی



ت) طرحی از یک پتانسیومتر

ث) تصویری واقعی از یک پتانسیومتر

شکل ۲ــ۱۶

جدول ۲ــ۳ــ کد رنگی مقاومت‌ها

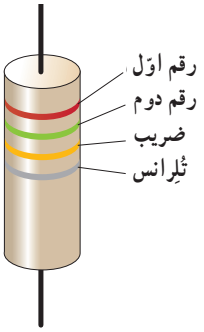
رنگ	عدد	ضریب	تلرانس
سیاه	۰	۱	
قهوه‌ای	۱	10^1	
قرمز	۲	10^2	
نارنجی	۳	10^3	
زرد	۴	10^4	
سبز	۵	10^5	
آبی	۶	10^6	
بنفش	۷	10^7	
خاکستری	۸	10^8	
سفید	۹	10^9	
طلایی		10^{-1}	٪۵
نقره‌ای		10^{-2}	٪۱۰
بی‌رنگ			٪۲۰

۲ــ **مقاومت‌های ترکیبی**[5] معمولاً از کربن، برخی نیم‌رساناها، و یا لایه‌های نازک فلزی ساخته شده‌اند. مقاومت‌های ترکیبی را در اندازه‌های خاص استانداردی تولید می‌کنند. مقدار این مقاومت‌ها یا روی آنها نوشته می‌شود، یا عمدتاً به‌صورت کدی رنگی نشان داده می‌شود که با ۳ یا ۴ حلقهٔ رنگی روی آنها مشخص شده است (شکل ۲ــ۱۷). هر رنگ، معرّف عددی است که در جدول ۲ــ۳

۱ــ Nichrome (آلیاژ نیکل و کُرم)　۲ــ Manganin (آلیاژ مس، نیکل و منگنز)　۳ــ Rheostat

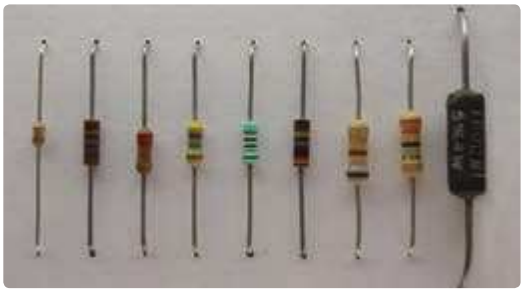
۴ــ Potentiometer. پتانسیومتر می‌تواند نقش پتانسیل‌سنجی نیز در مدارها داشته باشد که در آن صورت به آن پتانسیل‌سنج گفته می‌شود. این موضوع خارج از موضوع درسی این کتاب است.

۵ــ composition resistors



شکل ۲ــ۱۸ مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل ۲۵kΩ با تلرانس ۱۰ درصد است.

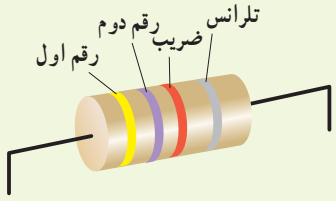
داده شده است. دو حلقهٔ اوّل (از آن طرفی که به یک سر مقاومت نزدیک‌تر است) به ترتیب، رقم اوّل و رقم دوم مقاومت را نشان می‌دهند. رقم حلقهٔ سوم ضریبی است به‌صورت 10^n که در ستون سوم جدول مشخص شده است.حلقهٔ چهارم یک حلقهٔ طلایی یا نقره‌ای رنگ است که تُلِرانس[1] نامیده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت را برحسب درصد مشخص می‌کند (شکل ۲ــ۱۸). نبود نوار چهارم به معنای آن است که تلرانس ۲۰ درصد است. برای خواندن حلقه‌های رنگی، مقاومت را طوری به دست می‌گیریم که حلقهٔ تلرانس در سمت راست قرار گیرد و بقیهٔ حلقه‌ها را از سمت چپ به راست می‌خوانیم.



شکل ۲ــ۱۷ تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی

تمرین ۲ــ۲

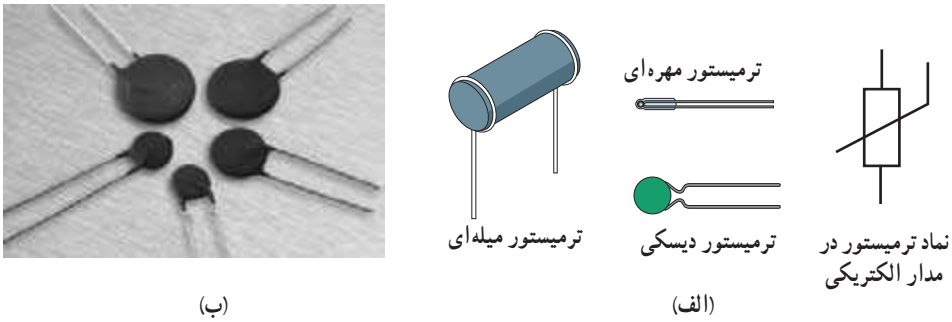
مقدار مقاومت نشان داده شده در شکل، و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت، بر حسب اُهم چقدر است؟



مقاومت‌های خاص و دیودها :

۱ــ **ترمیستور**[2] : 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 ۲ــ۱۹).



شکل ۲ــ۱۹ الف) طرحی از چند ترمیستور و نماد آن در مدارهای الکتریکی و ب) تصویری از چند ترمیستور دیسکی واقعی

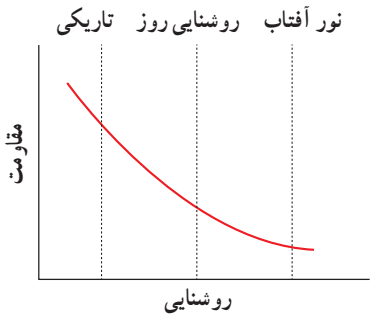
۱ــ tolerance

۲ــ Thermistor، برگرفته از عبارت Thermal Sensetive Resistor به معنای مقاومت حساس به دما.

فعالیت ۲ــ۳

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

۲ــ مقاومت‌های نوری[۱] (LDR[۲]): مقاومت نوری، نوعی مقاومت است که مقاومت الکتریکی آن به نور تابیده شده به آن بستگی دارد، به طوری که با افزایش شدت نور، از مقاومت آن کاسته می‌شود. مثلاً یک LDR نوعی در تاریکی مقاومتی چند مگا اُهمی دارد، در حالی که در یک نور مناسب، مقاومت آن به چند صد اُهم می‌رسد. نوعی از این مقاومت‌ها از جنس نیم‌رسانای 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 می‌شود. مثلاً شکل ۲ــ۲۰ مقاومت الکتریکی چنین LDRهایی را بر حسب روشنایی[۳] (که با یکای LUX سنجیده می‌شود) نشان می‌دهد. شکل ۲ــ۲۱ الف تصویری از چند LDR و شکل ۲ــ۲۱ب دو نماد این مقاومت‌ها در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ــ۲۰ مقاومت بر حسب روشنایی برای یک LDR نوعی

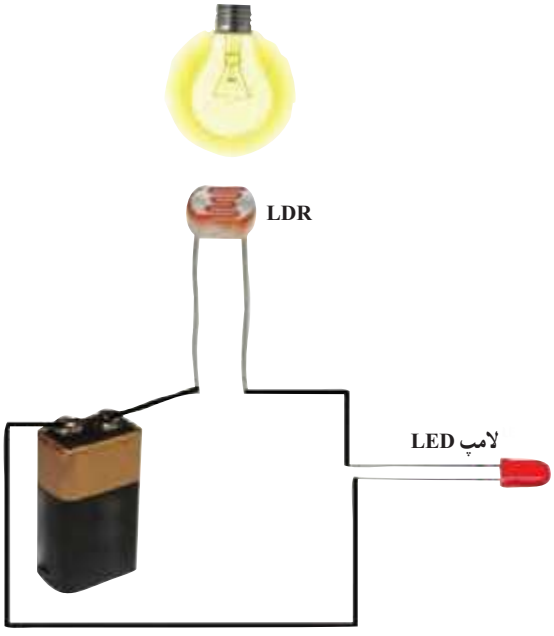
برای اینکه به درکی از ساز وکار این مقاومت‌ها برسید، شکل ۲ــ۲۲ را در نظر بگیرید که در آن یک LDR در مداری ساده به یک لامپ LED متصل شده است. تا هنگامی که لامپِ روشناییِ شکل خاموش باشد، LDR مقاومت بالایی دارد و مانع از روشن شدن لامپ LED می‌شود. با روشن شدن لامپ روشنایی از مقاومت LDR کاسته می‌شود و لامپ LED روشن می‌گردد. با تنظیم لامپ روشنایی به ترتیبی که LDR در معرض نور بیشتری قرار گیرد، شدت نور لامپ LED بیشتر می‌شود.

از این ویژگی LDR‌ها در تجهیزات گوناگونی از جمله چشم های الکترونیکی، دزدگیرها، کنترل کننده‌های خودکار، و چراغ‌های روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شود.

(الف)

(ب)

شکل ۲ــ۲۱ الف) تصویری از چند LDR
ب) نماد LDR در دو استاندارد متفاوت



شکل ۲ــ۲۲ یک مدار ساده متشکل از یک LDR، یک باتری، و یک لامپ LED. با روشن شدن چراغ روشنایی لامپ LED روشن می‌شود.

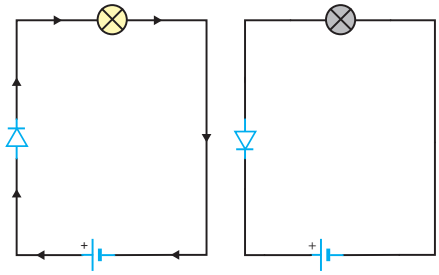
۱ــ Photoresistor
۲ــ Light Dependent Resistor
۳ــ Illumination

فنّاوری و کاربرد

در یک نوع از چراغ‌های روشنایی، اساس کار به این ترتیب است که با تابش نور به LDR و ایجاد جریان در آن، یک گرم‌کن الکتریکی فعال شده و با استفاده از یک دماپا، اتصال لامپ‌های روشنایی به منبع اصلی جریان را قطع می‌کند. در شب که نوری به LDR برخورد نمی‌کند، گرم‌کن خاموش می‌ماند و بدین‌ترتیب، اتصال لامپ‌های روشنایی قطع نمی‌شود و لامپ‌ها روشن می‌مانند (شکل ۲ــ۲۳).

شکل ۲ــ۲۳ اجزای داخلی یک مدار کنترل‌کنندهٔ نوری، که در نوعی از چراغ‌های روشنایی خیابان‌ها استفاده می‌شود.

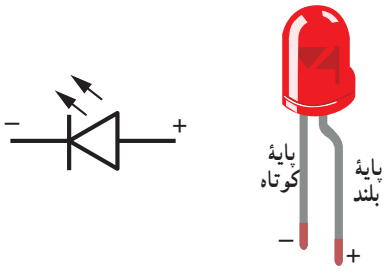
۳ــ دیودها[۱] : دیود قطعه‌ای است که هرگاه در مداری قرار گیرد، جریان را تنها از یک سو عبور می‌دهد و مقاومت آن در برابر عبور جریان در این سو ناچیز است. به‌همین دلیل، دیود را اغلب به عنوان یک‌سوکنندهٔ جریان در نظر می‌گیرند و آن را با نماد ⊣▷⊢ در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهند. پیکان در این نماد جهتی را نشان می‌دهد که جریان می‌تواند از دیود عبور کند. مثلاً مدارهای سادهٔ شکل ۲ــ۲۴ نشان می‌دهد که با تعویض جهت دیود، جریان از مدار عبور نمی‌کند و لامپ خاموش می‌شود. همچنین از دیود در مدارهای یک‌سوکننده برای تبدیل جریان‌های متناوب به جریان‌های مستقیم استفاده می‌شود که در فصل ۴ با آن آشنا می‌شوید.



شکل ۲ــ۲۴ 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 ۲ــ۲۵). شکل ۲ــ۲۶ تصویری واضح از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی را نشان می‌دهد. در این دیودها از نیم‌رساناهایی استفاده می‌شود که با عبور جریان از آنها LED از خود نورگسیل می‌کند و بنابراین، مقداری از انرژی الکتریکی به نور تبدیل می‌شود. بسته به نوع نیم‌رسانای به کاررفته، رنگ نورگسیل شده از LED می‌تواند از فروسرخ تا فرابنفش باشد. نخستین LEDهای ساخته‌شده، قرمز و زرد بودند. فنّاوری LED در دههٔ ۹۰ میلادی با تولید LEDهایی که قابلیت تولید نور آبی و سفید داشتند، دستخوش تحوّل بزرگی شد. LED در مقایسه با لامپ‌های روشنایی معمولی، توان الکتریکی کمی مصرف کرده و در عوض، نور قابل ملاحظه‌ای تولید می‌کند. به همین دلیل از آنها در چراغ خودروها، روشنایی منازل، تابلوهای تبلیغاتی، نمایشگرهای LED و ... استفاده می‌شود. LEDها در مقایسه با لامپ‌های رشته‌ای عمر طولانی‌تری دارند و به‌دلیل نداشتن رشته به هنگام تولید نور انرژی گرمایی زیادی تولید نمی‌کنند.

شکل ۲ــ۲۵ تصویری از چند دیود نورگسیل



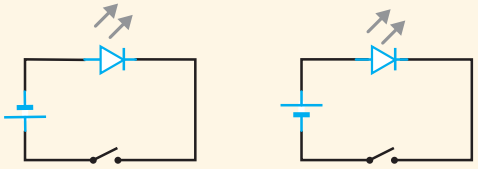
شکل ۲ــ۲۶ تصویری از یک LED و نماد آن در مدارهای الکتریکی

۱ــ Diode

۲ــ Light Emitting Diode

پرسش ۲ــ۱

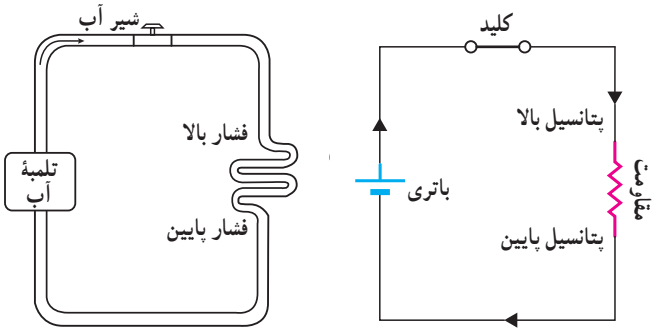
در کدام شکل با بستن کلید، LED روشن می‌شود؟



۲ــ۴ نیروی محرکهٔ الکتریکی و مدارها

برای بالا بردن آب از سطح زمین به یک تلمبهٔ آب نیاز است تا آب را به ارتفاع معیّنی برساند. بدین ترتیب، آب انرژی پتانسیل گرانشی لازم برای جریان یافتن و انجام کار معیّنی را کسب می‌کند (شکل ۲ــ۲۷). برای اینکه بارهای الکتریکی را نیز از یک مقاومت الکتریکی عبور دهیم تا جریان ثابتی برقرار شود، لازم است بین دو سر مقاومت اختلاف پتانسیلی برقرار کنیم. این کار می‌تواند توسط وسیله‌هایی مانند باتری انجام شود. به چنین وسیله‌هایی که با انجام کار روی بار الکتریکی، جریان ثابتی از بارهای الکتریکی در یک مدار ایجاد می‌کند، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی گفته می‌شود. منبع‌های نیروی محرکهٔ 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 ۲ــ۲۸).

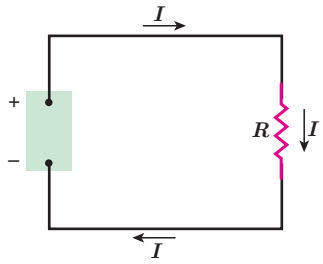
شکل ۲ــ ۲۷ یک سرسرهٔ آبی. در واقع یک تلمبه، آب را مدام به بالای سرسره پمپ می‌کند و موجب جریان یافتن آب و سُرخوردن شخص بر روی سرسره می‌شود.



شکل ۲ــ۲۸ همان‌طور که تلمبهٔ آب انرژی لازم برای شارش آب را فراهم می‌کند، باتری نیز انرژی لازم برای برقراری یک جریان را مهیا می‌سازد.

انرژی لازم برای ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی در یک منبع نیروی محرکهٔ 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 مهیّا می‌سازند. پیل‌های سوختی، سلول‌های خورشیدی، و مولدهای الکتریکی نمونه‌های دیگری از منبع‌های نیروی محرکهٔ الکتریکی‌اند.

مدار سادهٔ الکتریکی شکل ۲ــ۲۹ را در نظر بگیرید. منبع نیروی محرکه هنگام عبور بار Δq از منبع کاری به اندازهٔ ΔW روی آن انجام می‌دهد تا آن را در مدار به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا آن را از پایانهٔ با پتانسیل کمتر به پایانهٔ با



شکل ۲ــ۲۹ یک مدار سادهٔ الکتریکی شامل مقاومت R، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ و سیم‌های رابط

پتانسیل بیشتر ببرد، اصطلاحاً نیروی محرکهٔ الکتریکی (emf[1]) نامیده و با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود[2] :

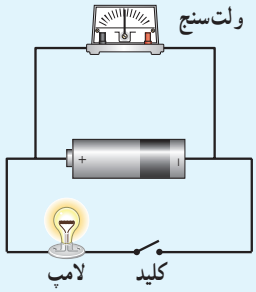
$$\mathscr{E}=\frac{\Delta W}{\Delta q} \qquad (۵_۲)$$

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

فعالیت ۲ــ۴

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

در ادامه با علت تفاوت این دو عدد آشنا خواهید شد.



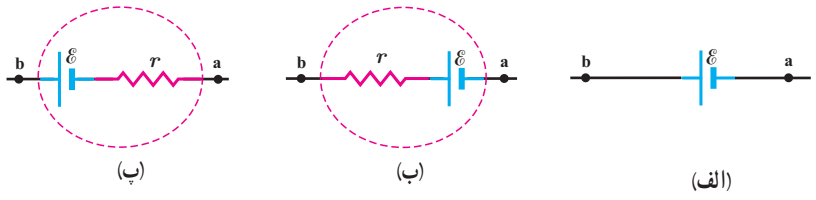
منبع‌های نیروی محرکهٔ الکتریکی، یا آرمانی هستند و یا واقعی. اگر پایانه‌های منفی و مثبت یک منبع نیروی محرکه را به ترتیب با a و b نمایش دهیم، اختلاف پتانسیل میان این دو پایانه برای یک منبع آرمانی برابر با نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ آن است :

$$V_b-V_a=\mathscr{E} \qquad (۶_۲)$$

فعالیت ۲ــ۵

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

منبع آرمانی در واقعیت وجود ندارد و منبع‌های نیروی محرکهٔ 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 محرکهٔ الکتریکی خواهد شد. شکل ۲ــ۳۰ نماد منبع نیروی محرکه را در مدارهای الکتریکی نشان می‌دهد.



شکل ۲ــ۳۰ در مدارهای الکتریکی، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی آرمانی را به‌صورت (الف) و منبع‌های واقعی را به صورت (ب) یا (پ) نمایش می‌دهند.

۱ــ Electromotive Force

۲ــ توجه کنید که نیروی محرکهٔ الکتریکی واژهٔ نامناسبی است؛ زیرا emf نیرو نیست؛ بلکه مانند پتانسیل یک کمیت انرژی به ازای واحد بار است.

خوب است بدانید: ماهی الکتریکی

ماهی‌های عظیم‌الجثهٔ 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 الکتریسیته بر بدن انسان

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 سَر باز داشته باشد، و یا با کرمی 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 منطقهٔ تماس زیاد باشد و مثلاً شخص بر پایه‌های عایق ایستاده باشد، این خطر بسیار کم می‌شود.

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 عضلهٔ بطنی قلب
۰/۵۰A تا چند آمپر	ایست قلبی، اگر جریان سریع قطع شود، قلب مجدداً به‌کار می‌افتد.
بیشتر از چند آمپر	ایست قلبی، قطع تنفس، سوختگی.

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 تک‌حلقه‌ای و افت پتانسیل در مقاومت : مدار سادهٔ تک‌حلقه‌ای شکل ۲ــ۳۱ را در نظر بگیرید. این مدار شامل باتری آرمانی B با نیروی محرکهٔ $\mathscr{E}$، مقاومت R، و دو سیم رابط است. فرض کنید می‌خواهیم از نقطهٔ 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 نقطهٔ a مثلاً به‌طور ساعتگرد شروع کنیم، نخست با باتری B مواجه می‌شویم. همان‌طور که دیدیم با حرکت از پایانهٔ منفی باتری به سمت پایانهٔ مثبت آن پتانسیل الکتریکی به اندازهٔ $\mathscr{E}+$ 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 رابطهٔ $\Delta V = IR$ تغییر می‌کند، ولی توجه کنید پتانسیل باید کاهش یابد؛ زیرا ما از طرف پتانسیل بالاتر به سمت پتانسیل پایین‌تر حرکت کرده‌ایم (شکل ۲ــ۳۲). 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 نقطهٔ a باز گردیم چون مقاومت این سیم نیز ناچیز فرض شده است باز تغییر پتانسیل نخواهیم داشت. با بازگشت به نقطهٔ a، پتانسیل دوباره برابر با پتانسیل نقطهٔ a می‌شود؛ یعنی می‌توان نوشت :

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

و با حذف V_a از دو طرف معادلهٔ بالا به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

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

این رابطه نشان می‌دهد که جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در مدار ما برابر با صفر است.

توجه کنید که اگر حلقه را درخلاف جهت نشان داده شده در شکل دور می‌زدیم به رابطهٔ $-\mathscr{E}+IR=0$ می‌رسیدیم که همان رابطهٔ بالاست. در حالت کلی جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در هر حلقه صفر است. به این قاعده، **قاعدهٔ حلقه** می‌گویند. قاعدهٔ 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 قاعدهٔ حلقه چیزی جز پایستگی انرژی نیست (تمرین ۲ــ۴ را ببینید).

اکنون اگر باتری آرمانی مدار شکل ۲ــ۳۱ را با یک باتری واقعی که مقاومت داخلی r دارد جایگزین کنیم (شکل ۲ــ۳۳)، با به‌کاربستن قاعدهٔ حلقه به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

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

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

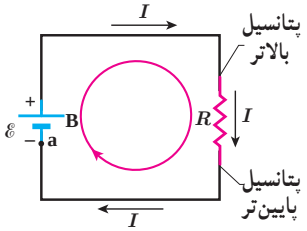
$$V_a + \mathscr{E} - Ir = V_b$$

و یا

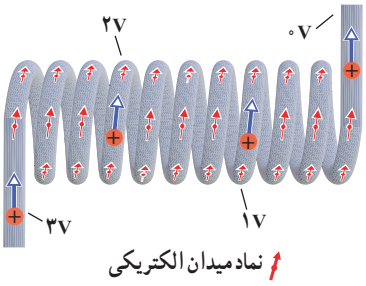
$$V_b - V_a = \mathscr{E} - Ir \qquad (۲ــ۷)$$

در حلّ مسئله‌های مدار تک‌حلقه‌ای همواره دو دستورالعمل سادهٔ زیر را به‌کار می‌بندیم :

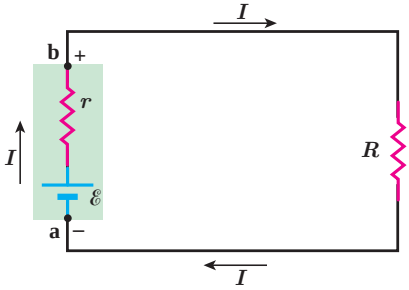
۱ــ هرگاه در مدار در جهت جریان از مقاومت مثلاً R بگذریم، پتانسیل به اندازهٔ IR کاهش می‌یابد و اگر در خلاف جهت جریان حرکت کنیم پتانسیل به همان اندازه افزایش می‌یابد.



شکل ۲ــ۳۱ مداری تک‌حلقه‌ای که در آن مقاومت R به دو سر باتری آرمانی B با نیروی محرکهٔ $\mathscr{E}$ بسته شده است. جریان I در کل مدار یکسان است.



شکل ۲ــ۳۲ با حرکت در جهت جریان در این مقاومت، پتانسیل پیوسته کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۲ــ۳۳ مدار تک‌حلقه‌ای شکل ۲ــ۳۱ که باتری آرمانی آن با یک باتری واقعی جایگزین شده است.

۲ــ هرگاه از پایانهٔ منفی به طرف پایانهٔ مثبت یک منبع نیروی محرّکه حرکت کنیم، پتانسیل به اندازهٔ $\mathscr{E}$ افزایش می‌یابد و اگر در خلاف این جهت (یعنی از پایانهٔ مثبت به طرف پایانهٔ منفی) حرکت کنیم پتانسیل به اندازهٔ $\mathscr{E}$ کاهش می‌یابد. در جدول ۲ــ۴ این دستورالعمل‌ها خلاصه شده‌اند.

جدول ۲ــ۴ جدول قرارداد تعیین علامت اختلاف پتانسیل‌ها در یک مدار تک‌حلقه‌ای، شامل مقاومت و منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی

عنصر مدار	جهت حرکت	تغییر پتانسیل	
مقاومت	در جهت جریان	$-IR$	جهت حرکت، R، I، $\Delta V=-IR$
مقاومت	در خلاف جهت جریان	$+IR$	I، جهت حرکت، R، $\Delta V=+IR$
منبع نیروی محرکه	از پایانهٔ منفی به پایانهٔ مثبت	$+\mathscr{E}$	جهت حرکت، $-$، $+$، $\Delta V=+\mathscr{E}$
منبع نیروی محرکه	از پایانهٔ مثبت به پایانهٔ منفی	$-\mathscr{E}$	جهت حرکت، $+$، $-$، $\Delta V=-\mathscr{E}$

گوستاو کیرشهوف (۱۸۸۷ــ۱۸۲۴م.)

گوستاو رابرت کیرشهوف[1] در غرب آلمان کنونی به دنیا آمد. کیرشهوف سهمی اساسی در درک مدارهای الکتریکی، طیف‌نگاری، ترمودینامیک و تابش اجسام گرم داشته است. درواقع او نخستین کسی بود که واژهٔ جسم سیاه را در سال ۱۸۶۲ به‌کار برد و دو قانون مهم در نظریهٔ مدارهای الکتریکی (قاعده‌های حلقه و انشعاب) و ترمودینامیک به افتخار او نام‌گذاری شده است. کیرشهوف قانون مدارهای الکتریکی خود را در سال ۱۸۴۵ درحالی پی‌ریزی 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.

مثال ۲ــ۶

در مدار شکل ۲ــ۳۳ فرض کنید $\mathscr{E}=12\,V$، $r=2/0\,\Omega$ و $R=4/0\,\Omega$ 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 حلقهٔ کامل با استفاده از قاعدهٔ حلقه داریم :

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

و در نتیجه

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

ب) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۷ اختلاف پتانسیل دوسر باتری برابر است با

$$V_b-V_a=\mathscr{E}-Ir=12\,V-(2/0\,A)(2/0\,\Omega)=8\,V$$

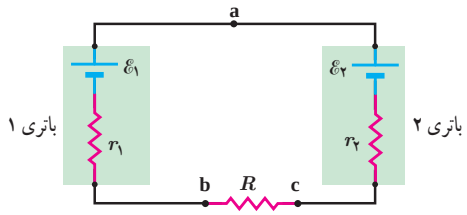
تمرین ۲ــ۳

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

۱ــ Gustov Robert Kirchhoff

مثال ۲ــ۷

مدار شکل روبه‌رو را درنظر بگیرید. مقادیر نیروهای محرکهٔ الکتریکی و مقاومت‌های مدار عبارت‌اند از :



$\mathscr{E}_1 = ۸/۰\,\text{V}$، $\mathscr{E}_2 = ۲/۰\,\text{V}$، $r_1 = ۲/۰\,\Omega$، $r_2 = ۱/۵\,\Omega$ و $R = ۸/۵\,\Omega$

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

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

و از آنجا

$$I = \frac{\mathscr{E}_1 - \mathscr{E}_2}{r_1 + R + r_2} = \frac{۸/۰\,\text{V} - ۲/۰\,\text{V}}{۲/۰\,\Omega + ۸/۵\,\Omega + ۱/۵\,\Omega} = ۰/۵۰\,\text{A}$$

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

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

در نتیجه

$$V_a - V_b = \mathscr{E}_1 - Ir_1 = ۸/۰\,\text{V} - (۰/۵۰\,\text{A})(۲/۰\,\Omega) = ۷/۰\,\text{V}$$

که این نتیجه را می‌توانستیم به‌طور مستقیم از رابطهٔ ۲ــ۷ نیز به‌دست 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.

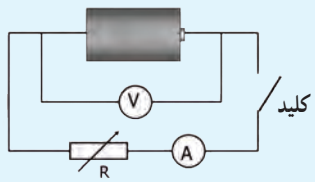
برای محاسبهٔ اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ حتماً باید مسئله را از نو حل کرد. به این منظور، از نقطهٔ c به سمت نقطهٔ a حرکت می‌کنیم :

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

و در نتیجه :

$$V_a - V_c = \mathscr{E}_2 + Ir_2 = ۲/۰\,\text{V} + (۰/۵۰\,\text{A})(۱/۵\,\Omega) = ۲/۸\,\text{V}$$

فعالیت ۲ــ۶ (کار در کلاس)



تفاوت یک باتری نو و فرسوده عمدتاً در مقدار مقاومت داخلی آن است که می‌تواند کمتر از یک اُهم برای باتری نو تا چند هزار اُهم 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 درحالی‌که 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 رابطهٔ ۲ــ۷ 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.

۲ــ۵ توان در مدارهای الکتریکی

اکنون می‌خواهیم رابطه‌هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به‌دست آوریم. جعبهٔ شکل ۲ــ۳۴ بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که می‌تواند شامل باتری، مقاومت و یا هرچیز دیگری باشد که اختلاف پتانسیلی بین پایانه‌های آن برقرار است. فرض کنید بار q در مدت زمان t تحت اختلاف پتانسیل $\Delta V = V_b - V_a$ از پایانهٔ a به پایانهٔ 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 :

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

$$P = I\Delta V \qquad (۸ــ۲)$$

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

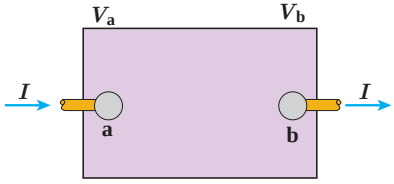
توان الکتریکی مصرفی در یک مقاومت : همان‌طور که گفتیم رابطهٔ ۲ــ۸ برای مقاومت‌های الکتریکی نیز برقرار است. برای یک مقاومت، همان‌طور که پیش از این دیدیم ΔV را با V نشان می‌دهیم. برای محاسبهٔ مقدار توان مصرفی، کافی است در این رابطه به‌جای V از رابطهٔ تعریف مقاومت ($R = V/I$) استفاده کنیم :

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

در نتیجه :

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 \qquad (۹ــ۲)$$

$$P_{\text{مصرفی}} = \frac{V^2}{R} \qquad (۱۰ــ۲)$$



شکل ۲ــ۳۴ یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی بین دوسر آن برقرار است.

$P = I(V_b - V_a)$

این جز، به بقیهٔ مدار انرژی می‌دهد $\Rightarrow P > 0$ اگر

این جز، از بقیهٔ مدار انرژی می‌گیرد $\Rightarrow P < 0$ اگر

مثال ۲ــ۸

وقتی دو سر یک بخاری برقی را به اختلاف پتانسیل ۲۲۰ V وصل کنیم، جریان ۱۰/۰A از آن می‌گذرد. الف) توان این بخاری چقدر است؟ ب) اگر این بخاری به مدت ۳/۰۰h در روز کار کند و قیمت برق مصرفی به ازای هر کیلووات ساعت ۵۰ تومان باشد، هزینهٔ یک ماه مصرف این بخاری چقدر می‌شود؟

پاسخ : الف) بنا به رابطهٔ ۲ــ۸ توان مورد نیاز بخاری چنین می‌شود :

$$P = I\Delta V = (10/0\,\text{A})(220\,\text{V}) = 2/20\times10^3\,\text{W} = 2/20\,\text{kW}$$

ب) انرژی مصرفی بخاری برابر Pt می‌شود که بر حسب یکاهای SI ، P بر حسب وات (W) ، t بر حسب ثانیه (s) است و انرژی مصرفی بر حسب ژول (J) می‌شود. اما برای محاسبهٔ مصرف برق، P را بر حسب کیلووات (kW) و t را بر حسب ساعت (h) می‌گیرند. بنابراین، انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت (kWh) می‌شود ($1\,\text{kWh} = (1000\,\frac{\text{J}}{\text{s}})(3600\,\text{s}) = 3/6\times10^6\,\text{J}$).

پس انرژی مصرفی بخاری در یک ماه، برابر است با

$$U = Pt = (۲/۲۰\text{kW})(۳۰ \times ۳/۰۰\text{h}) = ۱۹۸\text{kWh}$$

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

$$\text{بها} = (۱۹۸\text{kWh})(۵۰ \frac{\text{تومان}}{\text{kWh}}) = ۹۹۰۰ \text{تومان}$$

فعالیت ۲ـ۷

قانون ژول بیان می‌دارد گرمای تولید شده توسط جریان Iی عبوری از یک مقاومت R در مدت زمان t برابر با $RI^۲t$ است. این قانون را می‌توان به روش گرماسنجی با یک گرماسنج که در فیزیک دهم با آن آشنا شدید تحقیق کرد. اسباب این آزمایش در شکل نشان داده شده است. دربارهٔ چگونگی این آزمایش تحقیق کنید.

فعالیت ۲ـ۸

الف) همانند شکل با یک اهم‌متر، مقاومت رشتهٔ سیم داخل لامپ ۱۰۰واتی را اندازه‌گیری کنید. سپس با استفاده از رابطهٔ ۲ـ۱۰ و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. نتیجهٔ محاسبه را با مقدار اندازه‌گیری‌شده مقایسه کنید و نتیجه را پس از گفت‌وگوی گروهی گزارش دهید.

ب) اکنون با استفاده از نتیجهٔ به‌دست آمده، دمای رشتهٔ سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشتهٔ سیم لامپ از جنس تنگستن و ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ آن $۴/۵\times۱۰^{-۳}\,^\circ\text{C}^{-۱}$ است[۱]).

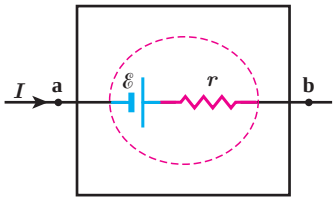
پرسش ۲ـ۲

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

۱ـ مقاومت ویژهٔ تنگستن در یک گسترهٔ بزرگ دمایی تا نزدیکی نقطهٔ ذوبش در $۳۴۰۰\,^\circ\text{C}$ رفتاری خطی دارد.

توان خروجی یک منبع نیروی محرکهٔ واقعی : در بخش پیش اختلاف پتانسیل ΔVی دو سر یک باتری واقعی را مانند شکل ۲ــ۳۵ به‌صورت $\mathscr{E} - Ir$ به‌دست آوردیم. با قرار دادن این اختلاف پتانسیل در رابطهٔ توان الکتریکی خواهیم داشت :

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



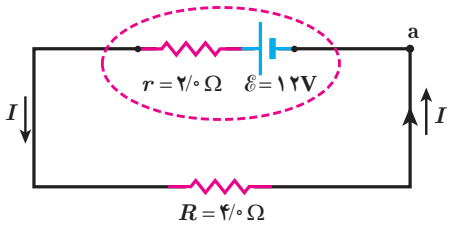
شکل ۲ــ۳۵ توان خروجی از باتریِ شکل، از رابطهٔ $P = (V_b - V_a)I$ به‌دست می‌آید.

$$P_{\text{خروجی}} = \mathscr{E}I - rI^2 \qquad (۲ــ۱۱)$$

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

مثال ۲ــ۹

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 قاعدهٔ حلقه به دست می‌آوریم :

$$V_a + \mathscr{E} - Ir - IR = V_a \implies I = \frac{\mathscr{E}}{R+r} = \frac{۱۲\text{V}}{۴/۰\Omega + ۲/۰\Omega} = ۲/۰\text{A}$$

اکنون توان الکتریکی خروجی از باتری با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ چنین می‌شود :

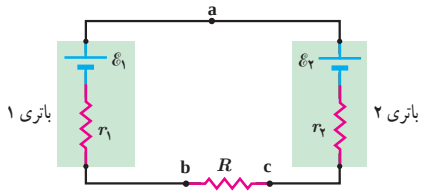
$$P_{\text{خروجی}} = \mathscr{E}I - rI^2 = (۱۲\text{V})(۲/۰\text{A}) - (۲/۰\Omega)(۲/۰\text{A})^2 = ۱۶\text{W}$$

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

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (۴/۰\Omega)(۲/۰\text{A})^2 = ۱۶\text{W}$$

مثال ۲ــ۱۰

در مثال ۲ــ۷ توان هریک از اجزای مدار را محاسبه کنید.



پاسخ : توان مصرفی در مقاومت $R = ۸/۵\Omega$ با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۹ چنین می‌شود :

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (۸/۵\Omega)(۰/۵۰\text{A})^2 = ۲/۱\text{W}$$

که در آن از $I = ۰/۵۰\text{A}$ استفاده کرده‌ایم.

توان خروجی باتری ۱ را با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ محاسبه می‌کنیم :

$$P_{\text{خروجی}} = \mathscr{E}_1 I - r_1 I^2 = (۸/۰\text{V})(۰/۵۰\text{A}) - (۲/۰\Omega)(۰/۵۰\text{A})^2 = ۳/۵\text{W}$$

اما توان باتری ۲ از رابطهٔ ۲ــ۱۱ به‌دست نمی‌آید؛ زیرا همان‌طور که دیدیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ از رابطهٔ $V_a - V_c = \mathscr{E}_2 + Ir_2$ به‌دست می‌آید. اما طبق تعریف این کتاب، برای استفاده از رابطهٔ ۲ــ۸ ($P = I\Delta V$)، باید اختلاف پتانسیل $V_c - V_a$ را درنظر بگیریم که $-(\mathscr{E}_2 + Ir_2)$ می‌شود. بنابراین، مقدار (قدرمطلق) توان ورودی به باتری ۲ چنین می‌شود :

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

$$= (۲/۰\text{V})(۰/۵۰\text{A}) + (۱/۵\Omega)(۰/۵۰\text{A})^2 = ۱/۴\text{W}$$

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

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

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

$$۳/۵\text{W} = ۱/۴\text{W} + ۲/۱\text{W}$$

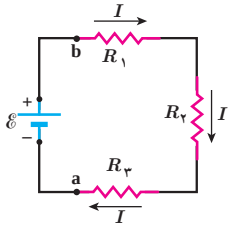
تمرین ۲ــ۴

با توجه به قانون ژول (فعالیت ۲ــ۷) و تعریف نیروی محرکهٔ الکتریکی، برای یک حلقهٔ ساده، شامل یک باتری و یک مقاومت نشان دهید که قاعدهٔ حلقه یا قانون ولتاژها چیزی جز پایستگی انرژی نیست.

۲ــ۶ ترکیب مقاومت‌ها

مقاومت‌ها در انواع وسایل الکتریکی دیده می‌شوند، از ساده‌ترین وسیله‌ها مانند بخاری‌های برقی و موخشک‌کن‌ها گرفته تا وسایل الکتریکی پیچیده‌تری مانند تلویزیون و رایانه‌ها. مدارهای این وسیله‌ها اغلب چندین مقاومت دارند؛ در نتیجه لازم است که ترکیبی از مقاومت‌ها را در نظر بگیریم. رشته‌ای از لامپ‌ها که در چراغانی‌ها به‌کار می‌رود، نمونهٔ ساده‌ای از ترکیب مقاومت‌هاست که در آن هر لامپ به‌عنوان یک مقاومت عمل می‌کند و رشتهٔ لامپ‌ها از دیدگاه تحلیل مدار، ترکیبی است از مقاومت‌ها. ترکیب مقاومت‌ها ممکن است بسیار پیچیده باشد، اما کار کردن با دو نوع از این ترکیب‌ها بسیار ساده است : مقاومت‌های متوالی و مقاومت‌های موازی. وقتی مقاومت‌ها به‌طور متوالی، یا موازی یا ترکیبی از هر دو بسته شده باشند، آنها را می‌توانیم با یک مقاومت معادل جایگزین کنیم. در این بخش به این موضوع می‌پردازیم و اینکه چگونه می‌توان مقاومت معادل ترکیبی از مقاومت‌ها را تعیین کرد.

به هم بستن متوالی مقاومت‌ها : شکل ۲ــ۳۶ سه مقاومت را نشان می‌دهد که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ بسته شده‌اند. توجه کنید واژهٔ «متوالی» ربط چندانی به‌چگونگی رسم مقاومت‌ها ندارد. «متوالی» به معنای بسته شدن مقاومت‌ها یکی پس از دیگری است، به‌طوری که هیچ انشعابی بین آنها وجود نداشته باشد و اختلاف پتانسیل V به دوسر این مجموعه از مقاومت‌ها اعمال شده باشد. در بستن متوالی مقاومت‌ها از همهٔ مقاومت‌ها جریان یکسان I عبور می‌کند. به عبارتی اگر آمپرسنج‌هایی را در نقطه‌های مختلفی از این مدار قرار دهیم، همگی جریان یکسانی را نشان می‌دهند. مقاومت‌هایی را که به‌طور متوالی بسته شده‌اند می‌توان با یک مقاومت معادل R_{eq} جایگزین کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دو سر مجموعهٔ مقاومت‌ها و همان جریان I است.



شکل ۲ــ۳۶ سه مقاومت که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده‌اند.

با به‌کارگیری قاعدهٔ حلقه، مثلاً با حرکت در جهت جریان I و با شروع از نقطهٔ a و بازگشت دوباره به آن، داریم :

$$V_a + \mathscr{E} - IR_۱ - IR_۲ - IR_۳ = V_a$$

و در نتیجه

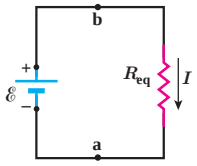
$$\mathscr{E} = IR_۱ + IR_۲ + IR_۳$$

به عبارتی اختلاف پتانسیل کل اعمال شده، برابر با جمع اختلاف پتانسیل‌های دو سر مقاومت‌هاست : $V = \mathcal{E} = V_1 + V_2 + V_3$. اکنون به سراغ محاسبهٔ جریان I می‌رویم. از رابطهٔ بالا داریم :

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

با تعریف مقاومت معادل، به‌صورت

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



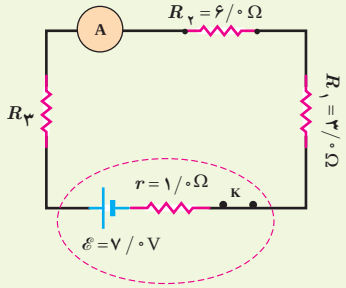
شکل ۲ــ۳۷ مدار معادل شکل ۲ــ۳۶ که در آن سه مقاومت با مقاومت R_{eq} جایگزین شده است.

مدار شکل ۲ــ۳۶ را می‌توان با مدار معادل شکل ۲ــ۳۷ جایگزین کرد. بدیهی است که اگر به‌جای سه مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آنها از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \qquad (۱۲ــ۲)$$

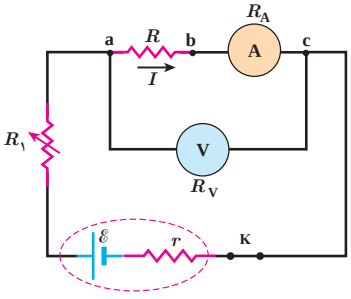
توجه کنید وقتی مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند، مقاومت معادل آنها بزرگ‌تر از مقاومت هریک از آنهاست.

تمرین ۲ــ۵



در شکل روبه‌رو، سه مقاومت به همراه یک آمپرسنج به‌صورت 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 $13/0\,\Omega$ باشد : الف) مقاومت R_3 چقدر است؟ ب) جریانی را که آمپرسنج نشان می‌دهد به‌دست آورید. پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان‌های مصرفی مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_3 در مدار برابر است.

مثال ۲ــ۱۱



شکل روبه‌رو مداری را برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول R نشان می‌دهد. فرض کنید در این مدار ولت‌سنج $24/0\,V$ و آمپرسنج $0/200\,A$ را نشان دهد. مقاومت ولت‌سنج $R_V = 1/00 \times 10^4\,\Omega$ و مقاومت آمپرسنج $R_A = 1/00\,\Omega$ است. مقاومت R را به‌دست آورید.

پاسخ : مقاومت‌های R و R_A به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند و اختلاف پتانسیل دوسر آنها برابر با $24/0\,V$ است. با توجه به اینکه آمپرسنج جریان $0/200\,A$ را نشان می‌دهد و به‌طور متوالی به مقاومت R بسته شده است، جریان عبوری از این دو مقاومت نیز برابر $0/200\,A$ است :

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{24/0\,V}{0/200\,A} = 120\,\Omega$$

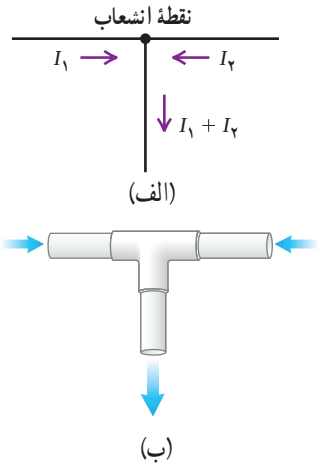
با توجه به اینکه $R_{eq} = R + R_A$ و $R_A = 1/00\,\Omega$ است مقاومت مجهول برابر با $R = 119\,\Omega$ می‌شود.

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

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

مجموع جریان‌هایی که به هر نقطهٔ انشعاب وارد می‌شود برابر با مجموع جریان‌هایی است که از آن نقطهٔ انشعاب خارج می‌شود.

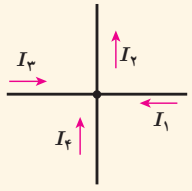
قاعدهٔ انشعاب در واقع مبتنی بر پایستگی بار الکتریکی است و اینکه هیچ باری نمی‌تواند در یک نقطهٔ انشعاب جمع گردد. بنابراین، مجموع بار وارد شده به هر نقطهٔ انشعاب در واحد زمان باید برابر با مجموع بار خارج شده از آن نقطه در واحد زمان باشد (شکل ۲ــ۳۸ الف). همان‌طور که می‌دانیم بار عبوری در واحد زمان همان جریان است. بنابراین، پایستگی بار، به قاعدهٔ انشعاب جریان می‌انجامد. این مشابه یک اتصال سه‌راهی لوله‌های آب است (شکل ۲ــ۳۸ ب)؛ اگر یک لیتر آب در هر دقیقه از سمت چپ، و یک لیتر آب در هر دقیقه از سمت راست وارد اتصال شود، واضح است که آب خارج شده در هر دقیقه برابر با ۲ لیتر است.



شکل ۲ــ۳۸ الف) طرحی از قاعدهٔ انشعاب. ب) مشابهت‌سازی اتصال لولهٔ آب برای قاعدهٔ انشعاب

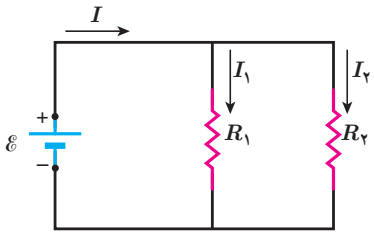
پرسش ۲ــ۳

برای نقطهٔ انشعاب نشان داده شده در شکل، رابطهٔ بین جریان‌ها را بنویسید.



مثال ۲ــ۱۲ *

در شکل روبه‌رو، یک باتری آرمانی اختلاف پتانسیل $\mathscr{E}=12\,V$ را به دو سر مقاومت‌های $R_1 = 4/0\,\Omega$ و $R_2 = 6/0\,\Omega$ اعمال می‌کند. الف) جریان عبوری از هر مقاومت و ب) جریانی که از باتری می‌گذرد چقدر است؟



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

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

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

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

ب) اکنون با استفاده از قاعدهٔ انشعاب، جریان عبوری از باتری را می‌یابیم :

$$I = I_1 + I_2 = 3/0\,A + 2/0\,A = 5/0\,A$$

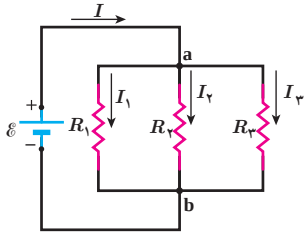
* حل مدارهای چندحلقه‌ای که در حلقه‌های مختلف از باتری استفاده می‌شود و همچنین سایر به هم بستن‌های مقاومت‌ها به‌غیر از به هم بستن متوالی و موازی جزء برنامه درسی این کتاب نبوده و نباید در آموزش و ارزشیابی‌ها مدّنظر قرار گیرد.

فعالیت ۲ــ۹

مداری مانند مدار مثال ۲ــ۱۲ ببندید و در هر شاخهٔ آن، یک آمپرسنج قرار دهید. با خواندن آمپرسنج‌ها، رابطهٔ بین جریان‌ها را بررسی کنید.

بستن مقاومت‌ها به‌صورت موازی : شکل ۲ــ۳۹ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که سه مقاومت به‌صورت موازی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E}$ بسته شده‌اند. توجه کنید واژهٔ «موازی» ارتباط چندانی به چگونگی رسم مقاومت‌ها ندارد؛ بلکه «به‌صورت موازی» به معنای آن است که یک سر مقاومت‌ها مستقیماً به یکدیگر و سر دیگر آنها نیز مستقیماً به هم وصل شده است و اختلاف پتانسیل یکسان V به دوسر این مقاومت‌ها اعمال شده است. بنابراین، هریک از مقاومت‌ها اختلاف پتانسیل یکسان V در دوسر خود دارد؛ یعنی :

$$V = \mathscr{E} = V_۱ = V_۲ = V_۳$$



شکل ۲ــ۳۹ مداری شامل سه مقاومت که به‌صورت موازی به نقطه‌های a و b بسته شده‌اند.

مجموعهٔ 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 قاعدهٔ انشعاب استفاده می‌کنیم. اگر این قاعده را برای نقطهٔ a شکل ۲ــ۳۹ به کار ببریم خواهیم داشت :

$$I = I_۱ + I_۲ + I_۳$$

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

$$I_۱ = \frac{V}{R_۱} \ , \ I_۲ = \frac{V}{R_۲} \ , \ I_۳ = \frac{V}{R_۳}$$

با قرار دادن این جریان‌ها در معادلهٔ حاصل از قاعدهٔ انشعاب خواهیم داشت :

$$I = V(\frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳})$$

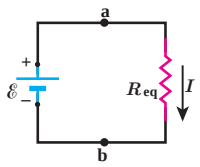
اگر ترکیب موازی مقاومت‌ها را با مقاومت R_{eq} جایگزین کنیم $I = \frac{V}{R_{eq}}$ می‌شود و از آنجا خواهیم داشت :

$$\frac{۱}{R_{eq}} = \frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳}$$

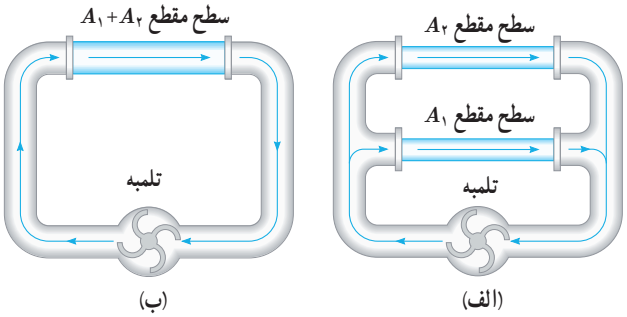
در حالت کلی برای n مقاومت موازی به رابطهٔ زیر می‌رسیم :

$$\frac{۱}{R_{eq}} = \frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳} + \cdots + \frac{۱}{R_n} \qquad (۱۳ــ۲)$$

مدار شکل ۲ــ۳۹ به مدار معادل شکل ۲ــ۴۰ تبدیل می‌شود. توجه کنید هرگاه چند مقاومت به‌صورت 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 مشابهت‌سازی با لوله‌های آب می‌تواند راه‌گشا باشد. شکل ۲ــ۴۱ــ الف دو لولهٔ هم‌طول با سطح مقطع‌های $A_۱$ و $A_۲$ را نشان می‌دهد



شکل ۲ــ۴۰ مدار معادل شکل ۲ــ۳۹ که در آن مقاومت معادل، R_{eq} جایگزین مقاومت‌های $R_۱$، $R_۲$ و $R_۳$ شده است.

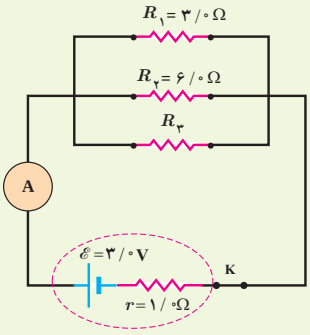


شکل ۲ــ۴۱ (الف) دو لولهٔ هم‌طول با سطح مقطع‌های A_1 و A_2 به طور موازی به تلمبهٔ آبی متصل شده‌اند. (ب) دو لولهٔ بخش الف معادل با تک‌لوله‌ای با همان طول و سطح مقطع مجموع آنهاست.

که به‌طور موازی به یک تلمبهٔ آب متصل شده‌اند. در شکل ۲ــ۴۱ــ 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 لولهٔ عریض‌تر در مقایسه با هر یک از لوله‌ها عبور می‌دهد. به عبارتی، لولهٔ عریض‌تر مقاومت کمتری نسبت به شارش آب در مقایسه با هر یک از دو لولهٔ باریک‌تر دارد.

تمرین ۲ــ۶

در شکل روبه‌رو سه مقاومت موازی به همراه یک آمپرسنج آرمانی به دو سر یک باتری وصل شده‌اند. اگر مقاومت معادل این ترکیب ۱/۶Ω باشد، الف) مقاومت R_3 چقدر است؟ ب) جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد را به‌دست آورید. پ) نشان دهید توان خروجی باتری با مجموع توان‌های مصرفی مقاومت‌های R_1 ، R_2 و R_3 برابر است.

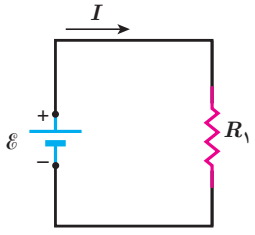


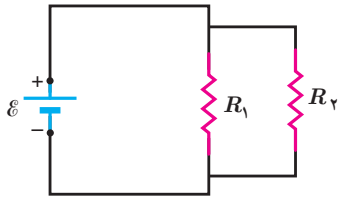
مثال ۲ــ۱۳

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

الف) جریان عبوری از منبع را به‌دست آورید.

ب) اگر مقاومت $R_2=10/0M\Omega$ به‌طور موازی به دو سر مقاومت R_1 متصل شود، مقاومت معادل مدار چقدر می‌شود و چه جریانی از منبع می‌گذرد؟





پاسخ : الف) با استفاده از تعریف مقاومت داریم :

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R_1}=\frac{150V}{100\times10^3\Omega}=1/50\times10^{-3}A=1/50mA$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۳ داریم :

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

در نتیجه

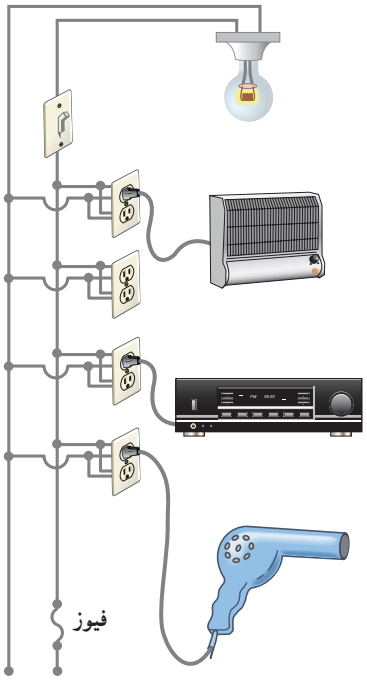
$$R_{eq}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{(100\times10^3\Omega)(10/0\times10^6\Omega)}{100\times10^3\Omega+10/0\times10^6\Omega}=99/0k\Omega$$

و بنابراین، جریان عبوری از منبع برابر است با

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R_{eq}}=\frac{150V}{9/90\times10^4\Omega}=1/52\times10^{-3}A=1/52mA$$

همان‌طور که می‌بینید، مقاومت معادل در این حالت که یکی از مقاومت‌ها خیلی بزرگ‌تر از مقاومت دیگر است ($R_2>>R_1$) تقریباً برابر با مقاومت کوچک‌تر (R_1) است.

مثال ۲ـ ۱۴



یک لامپ رشته‌ای ۱۰۰W، یک بخاری برقی ۲۰۰۰W، یک دستگاه پخش‌صوت ۲۰۰W، و یک سشوار (موخشک‌کن) ۲۲۰۰W مطابق شکل به پریزهای یک مدار سیم‌کشی خانگی ۲۲۰V 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، ۱۵A باشد، یعنی حداکثر بتواند جریان ۱۵A 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 همهٔ مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر با مجموع جریان‌های عبوری از هریک از مصرف‌کننده‌هاست. با استفاده از رابطهٔ $I = P/V$ جریان عبوری از هریک از این چهار مصرف‌کننده را به‌دست می‌آوریم. بنابراین، به ترتیب داریم :

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

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

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

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

بنابراین، جریان کل عبوری از فیوز برابر است با :

$$I_{\text{فیوز}} = I_{\text{کل}} = I_{\text{لامپ}} + I_{\text{بخاری}} + I_{\text{پخش}} + I_{\text{سشوار}}$$
$$= ۰/۴۵۵\text{A} + ۹/۰۹\text{A} + ۰/۹۰۹\text{A} + ۱۰/۰\text{A} = ۲۰/۵\text{A}$$

چون فیوز ۱۵A است. بنابراین، فیوز 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 وسیلهٔ برقی استفاده کنیم، باید وسایل برقی را به‌طور هم‌زمان به یک مدار وصل نکنیم و مدارهای دیگر را نیز به‌کار گیریم.

ب) دیدیم که همهٔ مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند. بنابراین، مقاومت معادل مصرف‌کننده‌های شکل از رابطهٔ ۲ـ۱۳ به‌دست می‌آید. بنابراین، برای محاسبهٔ مقاومت لازم است مقاومت هریک از وسیله‌ها را به‌طور جداگانه محاسبه کنیم. مقاومت هر مصرف‌کننده با استفاده از رابطهٔ $P = \frac{V^۲}{R}$ به‌دست می‌آید. بنابراین، به ترتیب داریم :

$$R_{\text{لامپ}} = \frac{V^۲}{P_{\text{لامپ}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۱۰۰\text{W}} = ۴۸۴\ \Omega$$

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

$$R_{\text{پخش}} = \frac{V^۲}{P_{\text{پخش}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۲۰۰\text{W}} = ۲۴۲\ \Omega$$

$$R_{\text{سشوار}} = \frac{V^۲}{P_{\text{سشوار}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۲۲۰۰\text{W}} = ۲۲/۰\ \Omega$$

پس مقاومت معادل چنین محاسبه می‌شود :

$$\frac{۱}{R_{eq}} = \frac{۱}{R_{\text{لامپ}}} + \frac{۱}{R_{\text{بخاری}}} + \frac{۱}{R_{\text{پخش}}} + \frac{۱}{R_{\text{سشوار}}} =$$

$$= \frac{۱}{۴۸۴\,\Omega} + \frac{۱}{۲۴/۲\,\Omega} + \frac{۱}{۲۴۲\,\Omega} + \frac{۱}{۲۲/۰\,\Omega} = ۰/۰۹۳۰\,\Omega^{-۱}$$

و در نتیجه $R_{eq} = ۱۰/۷۵\,\Omega \approx ۱۰/۸\,\Omega$. بنابراین، توان مصرفی مقاومت معادل چنین می‌شود :

$$P_{R_{eq}} = \frac{V^۲}{R_{eq}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۱۰/۷۵\,\Omega} = ۴/۵۰\,\text{kW}$$

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

مجموع توان مصرف‌کننده‌ها برابر است با :

$$P_{\text{کل}} = P_{\text{لامپ}} + P_{\text{بخاری}} + P_{\text{پخش}} + P_{\text{سشوار}} = ۱۰۰\text{W} + ۲۰۰۰\text{W} + ۲۰۰\text{W} + ۲۲۰۰\text{W} = ۴۵۰۰\text{W}$$

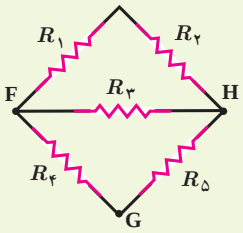
که همان توان مصرفی مقاومت معادل است.

تمرین ۲ــ۷

شکل روبه‌رو پنج مقاومت ۸/۰۰ اهمی را نشان می‌دهد.

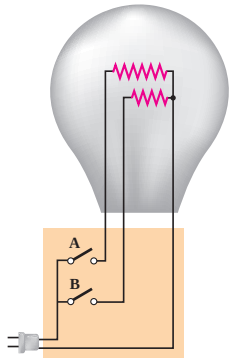
الف) مقاومت معادل بین نقطه‌های F و H چقدر است؟

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



مثال ۲ــ۱۵

یک لامپ سه‌راههٔ ۲۲۰V که دو رشته دارد مطابق شکل برای کار در سه توان مختلف ساخته شده است. کمترین و بیشترین توان مصرفی این لامپ به ترتیب ۵۰/۰W و ۱۵۰W است. مقاومت هریک از رشته‌ها را بیابید.



پاسخ : همان‌طور که می‌دانیم توان الکتریکی مصرفی از رابطهٔ $P = V^۲/R$ به‌دست می‌آید. بنابراین، بیشترین توان مربوط به کمترین مقاومت و کمترین توان مربوط به بیشترین مقاومت است. در بستن موازی مقاومت‌ها دیدیم مقاومت معادل کوچک‌تر از هریک از مقاومت‌هاست. بنابراین، بیشترین توان مربوط به وقتی است که کلیدهای a و b هردو بسته‌اند؛ یعنی :

$$\frac{۱}{R_{eq}} = \frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲}$$

که در آن $R_۱$ و $R_۲$ مقاومت‌های دو رشتهٔ لامپ‌اند. بنابراین، برای مقاومت معادل داریم :

$$R_{eq} = R_{min} = \frac{V^۲}{P_{max}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۱۵۰\text{W}} = ۳۲۳\Omega$$

از طرفی کمترین توان مربوط به وقتی است که کلید مربوط به رشتهٔ با مقاومت بیشتر بسته شده است. اگر این مقاومت را با $R_۱$ نمایش دهیم، داریم :

$$R_۱ = R_{max} = \frac{V^۲}{P_{min}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۵۰/۰\text{W}} = ۹۶۸\Omega$$

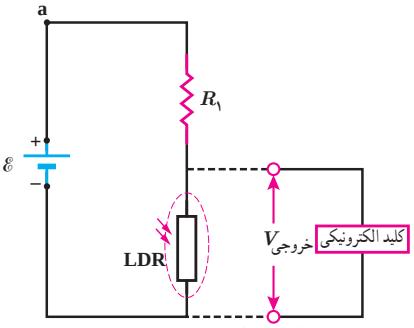
بنابراین، مقاومت مجهول $R_۲$ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\frac{۱}{R_۲} = \frac{۱}{R_{eq}} - \frac{۱}{R_۱} = \frac{۱}{۳۲۳\Omega} - \frac{۱}{۹۶۸\Omega} = ۲/۰۶\times۱۰^{-۳}\Omega^{-۱}$$

در نتیجه

$$R_۲ = \frac{۱}{۲/۰۶\times۱۰^{-۳}\Omega^{-۱}} = ۴۸۵\Omega$$

مثال ۲ـ۱۶



در بسیاری از مدارهای الکتریکی از تغییر مقاومت برای تقسیم ولتاژ استفاده می‌کنند. از این ویژگی در برخی از تجهیزات الکتریکی به‌عنوان کلید الکترونیکی بهره‌برداری می‌شود. آژیر خطر، کلید خودکار روشن شدن چراغ‌ها و ... مثال‌هایی از این دست هستند. شکل روبه‌رو چنین مداری را که در چراغ روشنایی خودروها به‌کار می‌رود، نشان می‌دهد. در این مدار از دو مقاومت $R_۱$ و مقاومت متغیر LDR استفاده شده است که به‌طور متوالی به هم وصل‌اند. همان‌طور که می‌دانیم وقتی تابش نور به LDR قطع می‌شود، مقاومت آن افزایش می‌یابد. در نتیجه ولتاژ خروجی ($V_{خروجی}$) زیاد می‌شود. این افزایش ولتاژ سبب فعال شدن کلید الکترونیکی می‌شود که به چراغ وصل است و بدین ترتیب چراغ روشن می‌شود. بنابراین تا زمانی که نور به اندازه کافی بتابد، کلید فعال نمی‌شود. فرض کنید در شکل بالا، منبع نیروی محرکه، آرمانی و ولتاژ آن ۱۲/۰V باشد و ولتاژ موردنیاز برای فعال شدن کلید الکترونیکی ۵/۰۰V باشد. وقتی مقاومت LDR به ۲۰۰kΩ می‌رسد، کلید الکترونیکی فعال می‌شود. مقاومت $R_۱$ چقدر است؟ (مقاومت کلید الکترونیکی آنقدر زیاد است که جریان قابل ملاحظه‌ای از آن عبور نمی‌کند. بنابراین می‌توانیم $R_۱$ و LDR را متوالی در نظر بگیریم.)

پاسخ : با استفاده از قاعدهٔ حلقه داریم :

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_۱ + R_{LDR}}$$

از طرفی بدیهی است

$$V_{خروجی} = R_{LDR} I$$

از ترکیب دو معادله بالا خواهیم داشت :

$$V_{خروجی} = R_{LDR}\frac{\mathscr{E}}{R_۱ + R_{LDR}}$$

و از آنجا برای $R_۱$ چنین به‌دست می‌آوریم :

$$R_۱ = \frac{R_{LDR}(\mathscr{E} - V_{خروجی})}{V_{خروجی}} = \frac{(۲۰۰\text{k}\Omega)(۱۲/۰\text{V} - ۵/۰۰\text{V})}{۵/۰۰\text{V}} = ۲۸۰\text{k}\Omega$$

خوب است بدانید: باتری اشکانی

اولین نشانه چگونگی تولید الکتریسیته در اواخر قرن هجدهم میلادی را به دانشمند ایتالیایی، **لوئیجی گالوانی** نسبت می‌دهند. گالوانی با یک مشاهده معمولی، ولی کاملاً اتفاقی به پدیده الکتریسیته جاری در مقابل الکتریسیته ساکن، پی‌برد. هموطن وی **الکساندر ولتا** دستگاهی براساس تجربهٔ گالوانی اختراع کرد که در تاریخ به عنوان اولین باتری الکتریکی ثبت گردید و **پیل ولتا** لقب گرفت و از آن پس به‌عنوان منبع الکتریسیته به‌کار 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 کونیگ[۱] باستان‌شناس اتریشی، فرضیه جسورانه‌ای را مبنی بر ساخت باتری در دورهٔ 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، باستان شناسان این یافته را متعلق به دوران امپراطوری اشکانیان دانسته و این باتری، باتری اشکانی یا باتری بغداد، نامیده شد.

دریچه 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 صفحهٔ مسی متصل شده و با قیر در مکان خود محکم شده و میله آهنی کاملاً زنگ زده بود.

برخی از باستان شناسان مانند ویلهلم کونیگ؛ 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 آبکاری لایه‌های طلا روی اشیای فلزی را دارند. این آبکاری به‌منظور 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 به‌عنوان محلول الکترولیت پرشد، مشاهده شد که این مجموعه می‌تواند اختلاف پتانسیل مناسبی تولید کند و براساس این مشاهدات نظرات متنوعی مطرح شد.

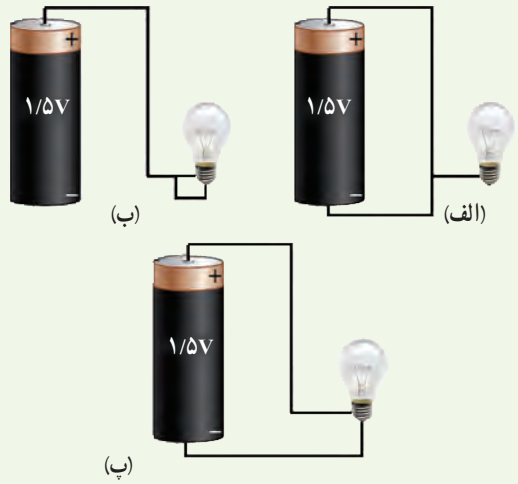
البته همه دانشمندان با کاربرد این یافته باستانی به‌عنوان یک منبع تغذیه که زرگران اشکانی برای آبکاری طلا از آن استفاده می‌کردند، موافق نبودند. برخی از آنها اعتقاد داشته و دارند که احتمالاً این باتری، یک منبع آماده الکتریکی و یا وسیله‌ای مشابه برای دادن شوک الکتریکی به بیماران بوده است.

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 کونیگ انجام داده‌اند.

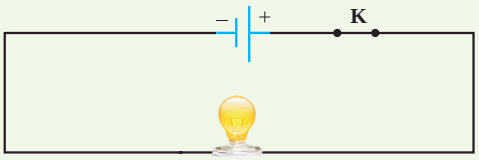
۱ــ Wilhelm Konig

۲ـ۱ و ۲ـ۲ جریان الکتریکی، مقاومت الکتریکی و قانون اهم

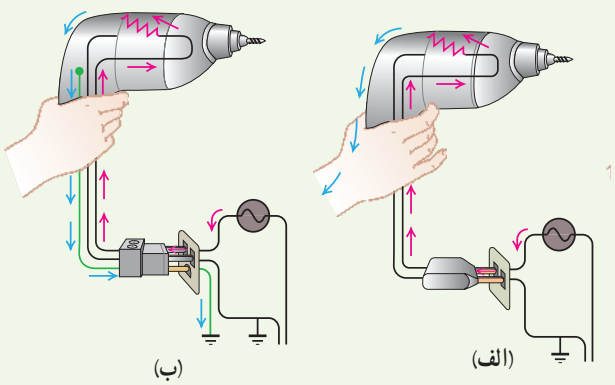
۱ در کدام یک از شکل‌های زیر، لامپ روشن می‌شود؟



۲ در مدار شکل زیر اختلاف پتانسیل دو سر لامپ ۴/۰V و مقاومت آن ۵/۰Ω است. در مدت ۵ دقیقه چه تعداد الکترون از لامپ می‌گذرد؟



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



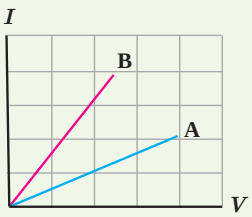
۴ آذرخش مثالی جالب از جریان الکتریکی در پدیده‌های طبیعی است. در یک آذرخش نوعی $۱/۰\times۱۰^{۹}\,J$ انرژی تحت اختلاف‌پتانسیل $۵/۰\times۱۰^{۷}\,V$ در بازهٔ زمانی ۰/۲۰s آزاد می‌شود. با استفاده از این اطلاعات الف) مقدار بار کل منتقل‌شده بین ابر و زمین، ب) جریان متوسط در یک یورش آذرخش و پ) توان الکتریکی آزادشده در ۰/۲۰s را به‌دست آورید.

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

شمارهٔ 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 کدام‌یک بیشتر است؟ چرا؟



۲ـ۳ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

۷ دو رسانای فلزی از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توپری به‌قطر ۱/۰ mm است. رسانای B لوله‌ای توخالی به‌شعاع خارجی ۲/۰ mm و شعاع داخلی ۱/۰ mm است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟

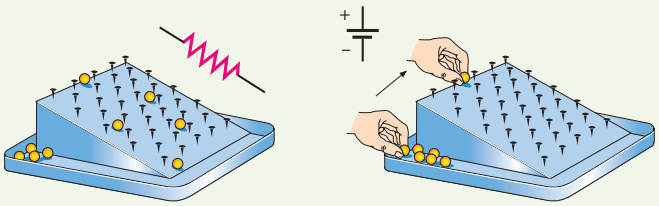
۸ در ماشین‌های چمن‌زنی برقی برای مسافت‌های حداکثر تا ۳۵ m از سیم‌های مسی نمرهٔ ۲۰ (قطر ۰/۰۸ cm) و برای مسافت‌های طولانی‌تر از سیم‌های ضخیم‌تر نمرهٔ ۱۶ (قطر ۰/۱۳cm) استفاده می‌کنند تا بدین ترتیب مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. الف) مقاومت یک سیم ۳۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ ب) مقاومت یک

سیم ۷۰ متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ (دمای سیم‌ها را $20^{\circ}C$ درنظر بگیرید.)

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

۲ـ۴ نیروی محرکهٔ الکتریکی و مدارها

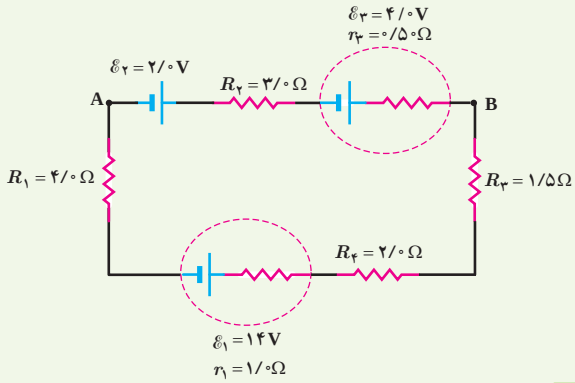
۱۰ شکل زیر یک مشابهت‌سازی مکانیکی برای درک مقاومت و نیروی محرکهٔ الکتریکی را نشان می‌دهد که در آن بر سطح شیب‌داری میخ‌هایی تعبیه شده و تیله‌ها از ارتفاع بالای سطح شیب‌دار رها می‌شوند و سپس دوباره به بالای سطح شیب‌دار بازگردانده می‌شوند. این مشابهت‌سازی مکانیکی را توجیه کنید.



۱۱ اختلاف پتانسیل دو سر باتری خودروهای سواری برابر ۱۲ولت است.اگر هشت باتری قلمی ۱/۵ ولتی را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعهٔ آنها نیز برابر ۱۲ ولت می شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از هشت باتری قلمی استفاده نمی‌شود.

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

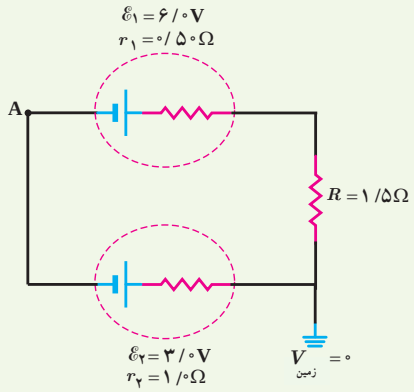
۱۳ در مدار شکل زیر جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ A و B ($V_B - V_A$) را محاسبه کنید.



۱۴ در شکل زیر

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

ب) پتانسیل نقطهٔ A را تعیین کنید.



۲ـ۵ توان در مدارهای الکتریکی

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

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

۲۲۰V، ۸۵۰W، اتوی برقی

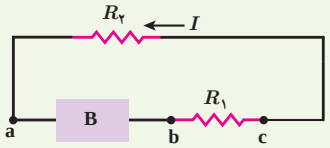
۲۲۰V، ۲۴۰۰W، کتری برقی

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

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

۱۷ لامپ یک چراغ قوهٔ معمولی با ولتاژ ۲/۹V کار می‌کند و در این حالت توان مصرفی آن ۰/۸۷W می‌شود. اگر مقاومت رشتهٔ تنگستنی این لامپ در دمای اتاق (۲۰°C) برابر ۱/۱Ω باشد، دمای این رشته وقتی که لامپ روشن است، چقدر می‌شود؟

۱۸ شکل زیر جریان I را در یک مدار تک‌حلقه‌ای با باتری B و مقاومت‌های R_1 و R_2 (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 به‌گونه‌ای مرتب کنید که بیشترین مقدار در ابتدا باشد.



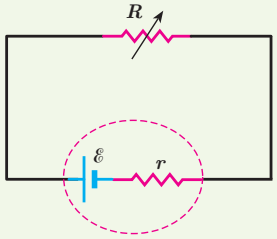
۱۹ تلویزیون و یکی از لامپ‌های خانهٔ خود را درنظر بگیرید و فرض کنید که هرکدام روزی ۸ ساعت با اختلاف پتانسیل ۲۲۰ولت روشن باشد.

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

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

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

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



منبع را که توان خروجی آن به ازای $I_1 = 5/00$A برابر ۹/۵۰W و به ازای $I_2 = 7/00$A برابر ۱۲/۶W است، محاسبه کنید.

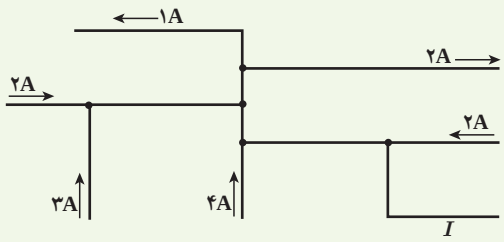
ب) نمودار اختلاف پتانسیل دو سر باتری برحسب جریان گذرنده از آن را رسم کنید.

۲ـ۶ ترکیب مقاومت‌ها

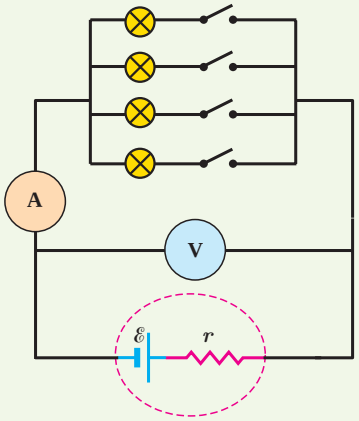
۲۱ لامپ‌های یک درخت زینتی، به طورمتوالی متصل شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتفاقی می‌افتد؟ به‌نظر شما چرا همهٔ چراغ‌های خودرو (چراغ‌های جلو، عقب و ...) به‌طور موازی بسته می‌شوند؟

۲۲ مقاومت یک آمپرسنج برای اندازه‌گیری جریان در یک مدار باید چگونه باشد تا جریان اندازه‌گیری‌شده 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؟

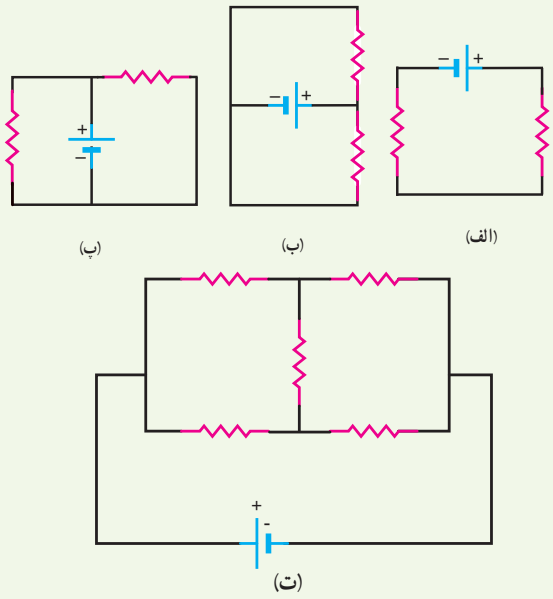


۲۴ در شکل زیر، تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده‌اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، عددهایی که آمپرسنج و ولت سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟



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؟

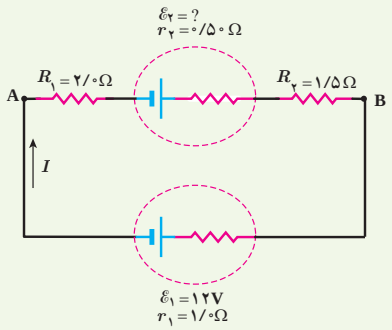
۲۶ در شکل‌های صفحهٔ بعد، آیا مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند یا موازی و یا هیچ کدام؟



۲۷ در مدار شکل زیر جریان در جهت نشان‌داده شده ۱/۲A است.

الف) نیروی محرکهٔ $\mathscr{E}_۲$ و $V_A - V_B$ چقدر است؟

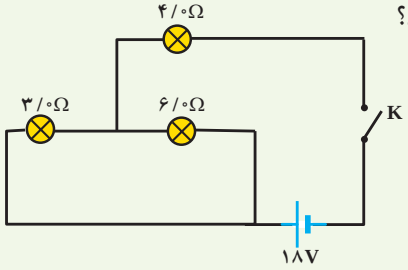
ب) انرژی مصرف‌شده در $R_۱$ و $R_۲$ در مدت ۵/۰ ثانیه چقدر است؟



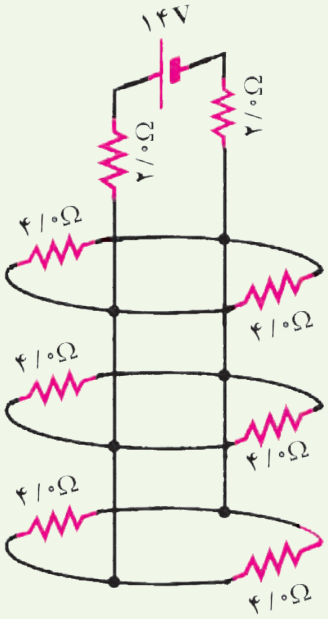
۲۸ سه مقاومت مشابه ۱۲ اُهمی را یک‌بار به‌طور متوالی و بار دیگر به‌طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ولت وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۲۹ دو مقاومت موازی ۶/۰ اُهمی و ۱۲ اُهمی به‌طور متوالی به یک مقاومت ۲/۰ اُهمی وصل شده است. اکنون، مجموعهٔ مقاومت‌ها را به دو سر یک باتری آرمانی ۳۶ ولتی می‌بندیم. توان مصرفی در مقاومت ۶/۰ اُهمی را محاسبه کنید.

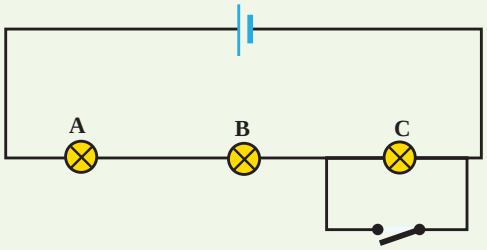
۳۰ در شکل زیر، وقتی کلید بسته شود چه جریانی از هر لامپ رشته‌ای می‌گذرد؟



۳۱ جریانی که از منبع نیروی محرکهٔ 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 اختلاف‌پتانسیل رخ می‌دهد؟ (ممکن است بیش از یک پاسخ درست باشد).



الف) اختلاف‌پتانسیل دو سر A و B تغییر نمی‌کند.

ب) اختلاف‌پتانسیل دو سر C به اندازهٔ ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

پ) هریک از اختلاف‌پتانسیل‌های دو سر A و B به‌اندازهٔ ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

ت) اختلاف‌پتانسیل دو سر C به صفر کاهش می‌یابد.

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

۳

مغناطیس

پرواز مغناطیسی یا ترابری مگ لِو[1]

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

۱ــ مگ‌لو (Maglev) کوتاه‌نوشت عبارت شناوری مغناطیسی (Magnetic Levitation) است.

کاربرد مغناطیس و آهنربا در جنبه‌های مختلف زندگی بشر، رشدی روزافزون دارد. فراتر از یک قرن، ضبط صدا و تصویر روی محیط‌هایی انجام می‌گرفت که مغناطیس در آنها نقش اصلی داشت. اگرچه فنّاوری دیجیتال به میزان زیادی جایگزین ضبط مغناطیسی به شیوه‌های سنتی شده‌است، با وجود این، ذخیرهٔ اطلاعات به‌صورت 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)، بهرهٔ فراوانی از مغناطیس و آثار آن می‌برد.

شکل ۳ــ۱ سنگ آهنربای طبیعی. تالس که اغلب از او به عنوان پدر علم یونان یاد می‌شود، مادهٔ کانی مگنتیت Fe_3O_4 را که ویژگی آهنربایی دارد می‌شناخت.

۳ــ۱ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی

آثار مغناطیسی دست‌کم ۲۵۰۰ سال پیش در تکه‌هایی از سنگ آهن مغناطیسی شده در نزدیکی شهر باستانی مگنسیا (که نام امروزی آن مانیسا و در غرب ترکیه واقع است) مشاهده شد. این تکه‌ها نمونه‌هایی هستند از چیزی که امروزه آهنربای دائمی خوانده می‌شود (شکل ۳ــ۱). چینی‌های باستان نیز با ویژگی‌های مغناطیسی برخی از سنگ‌های آهنربایی آشنایی داشتند و از آنها در ساخت قطب‌نما برای جهت‌یابی استفاده می‌کردند (شکل ۳ــ۲).

شکل ۳ــ۲ از گذشته‌های دور، برای جهت‌یابی در دریانوردی از قطب‌نما استفاده می‌شده است.

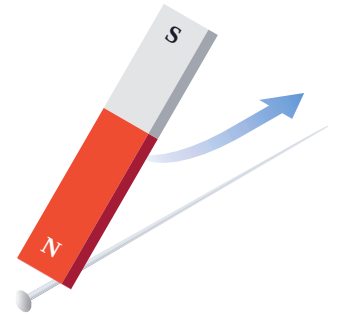
در علوم هشتم دیدید که هرگاه آهنربایی را درون ظرف محتوی برادهٔ آهن فرو ببریم، براده‌های آهن به مقدار زیادی جذب ناحیه‌های خاصی از آهنربا می‌شوند. این ناحیه‌ها را قطب‌های مغناطیسی یا قطب‌های آهنربا می‌نامند (شکل ۳ــ۳).

شکل ۳ــ۳ در آهنربا، دو ناحیه وجود دارد که خاصیت مغناطیسی درآنجا بسیار بیشتر از قسمت‌های دیگر است.

پرسش ۳ــ۱

فرض کنید دو میلهٔ 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 وسیلهٔ 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 ۳ــ۴). 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.



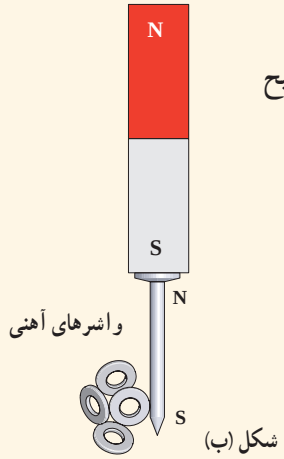
شکل ۳ــ۴ وقتی یکی از قطب‌های یک آهنربای دائمی را چندین بار و در یک جهت به یک سوزن ته‌گرد بکشید، سوزن برای مدتی دارای خاصیت مغناطیسی می‌شود.

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

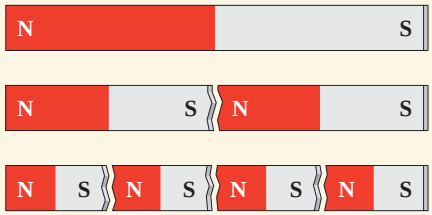
پرسش ۳ــ۲

۱ــ دریافت خود را از شکل الف بیان کنید.

۲ــ در علوم هشتم با پدیدهٔ القای مغناطیسی آشنا شدید. با توجه به شکل ب این پدیده را توضیح دهید و بیان کنید چرا در پدیدهٔ القای مغناطیسی همواره جذب وجود دارد؟

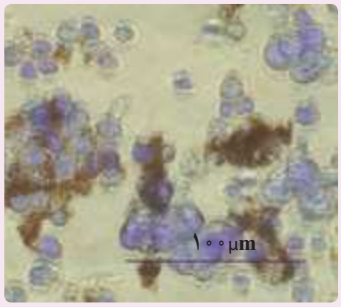


شکل (ب)



شکل (الف)

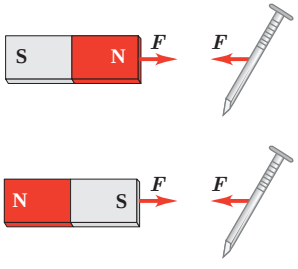
فنّاوری و کاربرد: نانو ذرّه‌های مغناطیسی برای درمان



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 ذرّه‌های یک مادهٔ مغناطیسی استفاده می‌شود که به بدن تزریق می‌شوند. این ذرّه‌ها با مادهٔ شیمیایی خاصی پوشیده شده‌اند که به‌طور هدفمند به یاخته‌های سرطانی متصل می‌شوند. سپس با استفاده از یک آهنربا در بیرون از بدن بیمار، این ذرّه‌ها (که در شکل به رنگ قهوه‌ای نشان داده شده است) بیرون «رانده» می‌شوند و یاخته‌های سرطانی را با خود می‌برند.

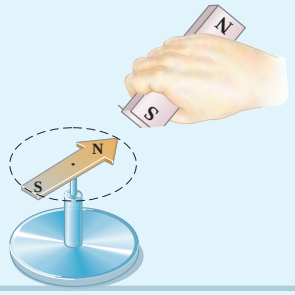
۳ــ۲ میدان مغناطیسی

هرگاه آهنربایی را به یک میخ آهنی نزدیک کنید می‌بینید که میخ به طرف آهنربا حرکت می‌کند و به سمت آن جذب می‌شود (شکل ۳ــ۵). مشابه آنچه دربارهٔ اجسام باردار دیدید، برای توجیه این پدیده می‌گوییم در فضای اطراف آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد که سبب جذب میخ شده است. میدان مغناطیسی نیز مانند میدان الکتریکی که در فصل ۱ با آن آشنا شدید، کمیتی برداری است و آن را با نماد $\vec{B}$ نمایش می‌دهیم.



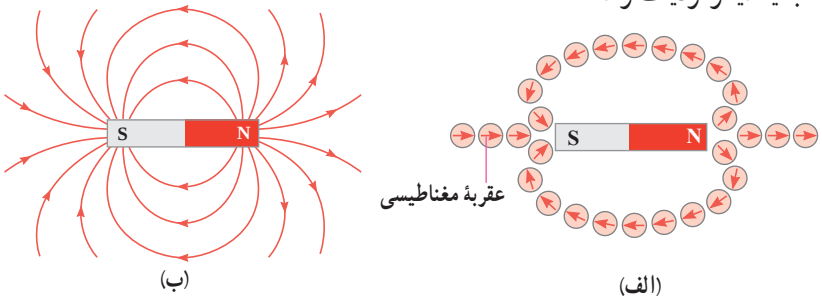
شکل ۳ــ۵ در فضای اطراف آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد به طوری که هر جسم آهنی مانند میخ را به سوی خود جذب می‌کند.

فعالیت ۳ــ۱



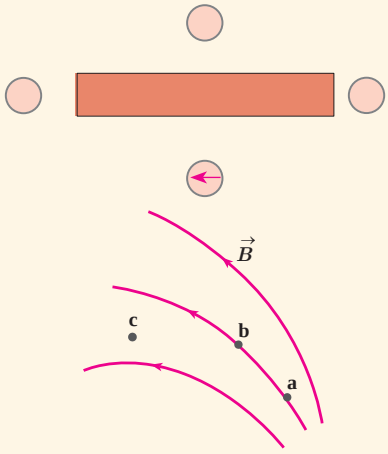
یکی از قطب‌های یک آهنربای میله‌ای را به یک عقربهٔ مغناطیسی نزدیک کنید (شکل روبه‌رو). آنچه را می‌بینید توضیح دهید. با دور کردن آهنربا از قطب‌نما چه اتفاقی می‌افتد؟ دلیل آن را شرح دهید. درصورتی‌که قطب‌نما در اختیار ندارید، یک سوزن ته‌گرد مغناطیسی شده را روی سطح آب، درون ظرفی شناور سازید. به این ترتیب،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

به کمک عقربهٔ مغناطیسی می توان جهت میدان مغناطیسی را در هر نقطه از فضای اطراف یک آهنربا تعیین کرد (شکل ۳ــ۶ الف). بنا به تعریف، بردار میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای پیرامون یک آهنربا در جهتی است که وقتی عقربهٔ 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 ۳ــ۶ ب خط های میدان مغناطیسی را در اطراف یک آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد. این خط‌ها از آهنربا می گذرند و هریک از آنها یک حلقهٔ بسته را تشکیل می‌دهند. افزون بر اینها، خط های میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند.



شکل ۳ــ۶ (الف) تعیین جهت میدان مغناطیسی به کمک عقربهٔ مغناطیسی.
(ب) خط‌های میدان مغناطیسی در هر نقطه در جهت عقربهٔ مغناطیسی‌اند و از قطب N خارج و به قطب S وارد می‌شوند. (در این شکل خط‌های درون آهنربا نشان داده نشده است.)

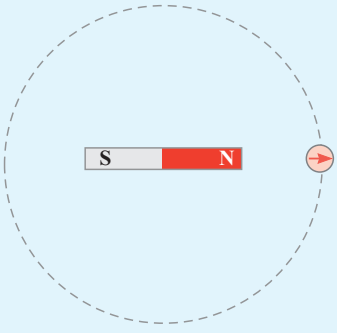
پرسش ۳ــ۳



۱ــ شکل روبه‌رو، یک آهنربای میله‌ای و تعدادی عقربهٔ مغناطیسی را نشان می‌دهد. (الف) کدام سر آهنربا قطب N و کدام سر قطب S است؟
(ب) جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی را در دیگر مکان‌های روی شکل تعیین کنید.

۲ــ شکل روبه‌رو، خط های میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا را نشان می‌دهد. بردار میدان مغناطیسی را در هر یک از نقطه‌های روی شکل رسم کنید. به اندازه و جهت بردار میدان در هر نقطه توجه کنید.

فعالیت ۳ــ۲



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

آزمایش ۳ـ۱

هدف: مشاهدهٔ طرح خط‌های میدان مغناطیسی با استفاده از برادهٔ آهن

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

شرح آزمایش :

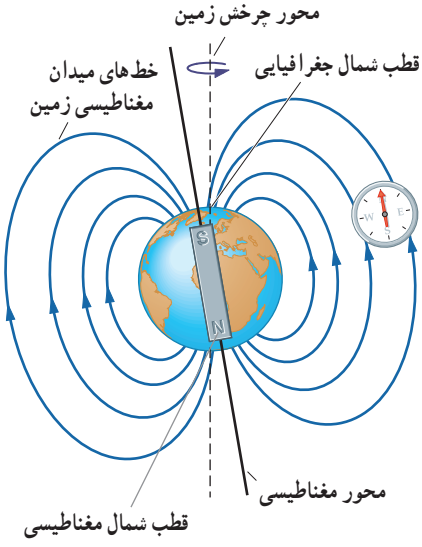
- یکی از آهنرباهای میله‌ای را روی میز قرار دهید و صفحهٔ شیشه‌ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.
- به کمک نمک پاش، کمی برادهٔ آهن را به طور یکنواخت روی شیشه (مقوا) بپاشید.
- چند ضربهٔ آرام به صفحهٔ شیشه‌ای بزنید تا برادهای آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرحی که روی صفحهٔ شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است (شکل الف).
- مراحل بالا را برای دو آهنربای میله‌ای که به‌ترتیب : قطب‌های ناهمنام و قطب‌های همنام آنها به یکدیگر نزدیک‌اند انجام دهید (شکل‌های ب و پ).

(الف)

(ب)

(پ)

میدان مغناطیسی زمین : زمین مانند یک آهنربای بسیار بزرگ رفتار می‌کند و طرح خط‌های میدان مغناطیسی آن مانند طرح خط‌های آهنربای میله‌ای بزرگی است که در نزدیکی مرکز زمین قرار دارد و قطب شمال آن در نزدیکی قطب جنوب جغرافیایی زمین است (شکل ۳ـ۷). نشان دادن خط‌های میدان مغناطیسی زمین به صورت خط‌های میدان یک آهنربای میله‌ای، تنها یک مدل ساده از ساختار پیچیده و ناشناختهٔ عوامل ایجاد میدان مغناطیسی زمین است. شواهد زمین‌شناختی نشان می‌دهند که جهت این میدان در بازه‌های زمانی نامنظّم از ده هزار تا یک‌میلیون سال به‌طور کامل وارون می‌شود. قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. در واقع، قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین فاصلهٔ نسبتاً زیادی از یکدیگر دارند؛ مثلاً قطب جنوب مغناطیسی تقریباً در فاصلهٔ ۱۸۰۰ کیلومتری قطب شمال جغرافیایی قرار دارد. این بدان معناست که عقربهٔ مغناطیسی قطب‌نما درجهت شمال واقعی جغرافیایی قرار نمی‌گیرد و تا حدودی از شمال جغرافیایی انحراف دارد.



شکل ۳ـ۷ طرح ساده‌ای از میدان مغناطیسی زمین. عقربهٔ مغناطیسی قطب‌نما در هر نقطه در امتداد خط‌های این میدان قرار می‌گیرد.

فعالیت ۳ــ۳

وقتی یک سوزن مغناطیسی شده یا یک عقربهٔ 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 عقربهٔ مغناطیسی بزرگ، نخی را ببندید و آن را آویزان کنید. پس از تعادل، به کمک نقاله، زاویه‌ای را اندازه بگیرید که امتداد سوزن یا عقربهٔ مغناطیسی با راستای افق می‌سازد. عدد به‌دست آمده، شیب مغناطیسی محل زندگی شماست[۱]. چنانچه در آزمایشگاه مدرسه شیب‌سنج مغناطیسی موجود باشد می‌توانید از آن نیز استفاده کنید.

خوب است بدانید: جهت‌یابی مغناطیسی در جانداران

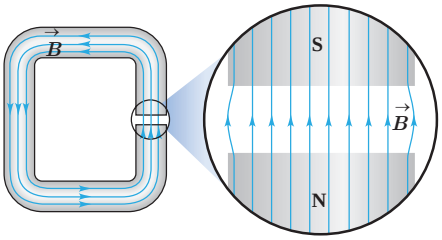
بسیاری از موجودات زنده از میدان مغناطیسی زمین برای جهت‌یابی استفاده می‌کنند. خرچنگ خاردار کارائیب در برابر میدان‌های مغناطیسی بسیار حساس است (شکل الف). این جاندار یک قطب‌نمای مغناطیسی درونی دارد که تشخیص شمال، جنوب، شرق و غرب را برایش امکان‌پذیر می‌کند. این خرچنگ همچنین می‌تواند تفاوت اندک در میدان مغناطیسی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

در سال ۱۹۷۵ میلادی دانشمندان مؤسسهٔ فنّاوری 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 عقربهٔ مغناطیسی کوچک را تشکیل می‌دهند (شکل ب). باکتری‌ها به کمک این مغناطیس داخلی می‌توانند از میدان مغناطیسی زمین بهره بگیرند و به طرف مواد غذایی در ته آبگیر هدایت شوند. جالب اینکه باکتری‌های مربوط به نیمکرهٔ جنوبی زمین، برای رسیدن به تهِ آبگیر در خلاف جهت خط‌های میدان مغناطیسی زمین قرار می‌گیرند.

(الف)

(ب)

میدان مغناطیسی یکنواخت : هرگاه در نقاط مختلف ناحیه‌ای از فضا جهت و اندازهٔ میدان مغناطیسی یکسان باشد، در این صورت میدان مغناطیسی را در آن ناحیه یکنواخت می‌گویند. ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت در ناحیهٔ بزرگی از فضا بسیار دشوار و در عمل امکان‌ناپذیر است. با این وجود، می‌توان در ناحیهٔ کوچکی از فضا، مانند ناحیهٔ بین قطب‌های یک آهنربای C شکل[۲]، میدان مغناطیسی یکنواخت ایجاد کرد (شکل ۳ــ۸).



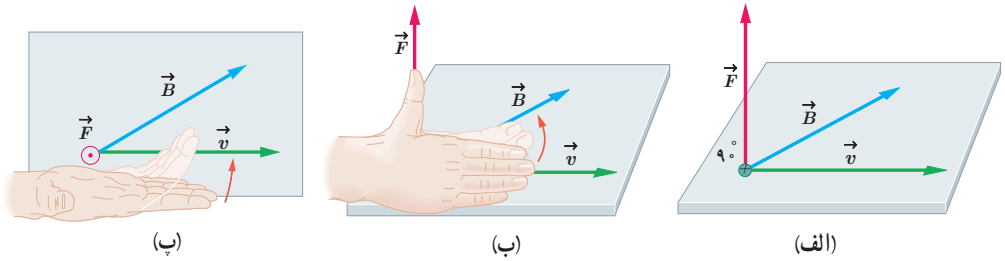
شکل ۳ــ۸ میدان مغناطیسی در فضای بین قطب‌های یک آهنربای C شکل با تقریب خوبی یکنواخت است.

۱ــ می‌توانید به سایت www.magnetic – declination.com بروید و درستی شیب مغناطیسی (magnetic inclination) به دست آمده در فعالیت ۳ــ۳ را بررسی کنید. یا با نصب برنامهٔ inclination meter روی گوشی تلفن همراه خود، شیب مغناطیسی را در محل زندگی خود اندازه بگیرید. شیب مغناطیسی در ایران از حدود 40° تا حدود 60° از مناطق جنوبی تا مناطق شمال غربی متغیر است.

۲ــ C ــ Shaped magnet

۳ــ۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذرّهٔ باردار متحرک در میدان مغناطیسی

آزمایش نشان می‌دهد که اگر ذرّهٔ 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 نیرویی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۳ــ۹ الف بر راستای سرعت و میدان مغناطیسی عمود است. این نیرو را نیروی مغناطیسی می‌نامند و جهت آن، مطابق شکل ۳ــ۹ ب و پ به کمک قاعدهٔ دست راست تعیین می‌شود. اگر دست راست خود را طوری نگه داریم که انگشتان باز شدهٔ ما در جهت $\vec{v}$ باشد ــ به گونه‌ای که وقتی آنها را روی زاویهٔ کوچک‌تری که $\vec{v}$ با $\vec{B}$ می‌سازد، و در جهت چرخش طبیعی انگشتان خم کنیم در جهت $\vec{B}$ قرار گیرد ــ انگشت شست ما در جهت نیروی وارد بر ذرّهٔ باردار مثبت خواهد بود. توجه کنید که نیروی وارد بر بار منفی، در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت است.



شکل ۳ــ۹ (الف) بر ذرّهٔ 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 قاعدهٔ دست راست تعیین می‌شود.

اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی در حال حرکت از رابطهٔ زیر به دست می‌آید :

$$F=|q|vB\sin\theta \qquad (۱ــ۳)$$

در این رابطه $|q|$، بزرگی بار الکتریکی، v تندی (اندازه سرعت) بار الکتریکی، B اندازهٔ میدان مغناطیسی و θ زاویهٔ بین جهت حرکت بار الکتریکی (بردار $\vec{v}$) با جهت میدان مغناطیسی (بردار $\vec{B}$) است (شکل ۳ــ۱۰).

رابطهٔ ۳ــ۱ نشان می‌دهد وقتی بار الکتریکی q عمود بر راستای میدان مغناطیسی حرکت کند ($\sin\theta=\sin 90^\circ=1$)، اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی، بیشینه می‌شود ($F=F_{max}$). بنا به رابطهٔ ۳ــ۱، یکای SI میدان مغناطیسی معادل است با :

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

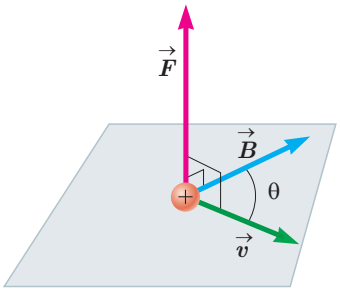
این یکا به احترام نیکُلا تسلا دانشمند و مخترع نامی، تسلا نامیده می‌شود و به اختصار با نماد T نشان داده می‌شود. به این ترتیب می‌توان نوشت :

$$1\text{T}=1\frac{\text{N}}{\text{C.m/s}}=1\frac{\text{N}}{\text{A.m}} \qquad (۲ــ۳)$$

نیکُلا تسلا (۱۹۴۳ــ۱۸۵۶)

تسلا در کرواسی به دنیا آمد. او بعدها به امریکا مهاجرت و مدتی با ادیسون همکاری کرد. ادیسون همواره با جریان مستقیم (dc) کار می‌کرد، با این وجود، وی کارکردن با جریان متناوب (ac) با ولتاژهای بسیار بالا را عملی ساخت. تسلا از اینکه جریان متناوب برای اوّلین 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 به‌طرف بیرون (برون‌سو)
⊗ نماد بردار عمود بر صفحه به‌طرف درون (درون‌سو)

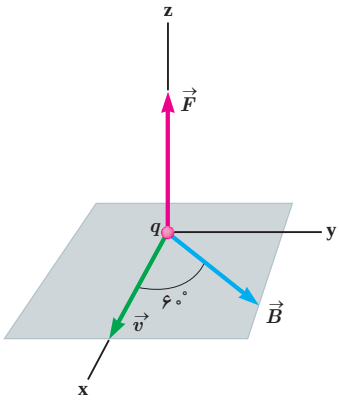


شکل ۳ــ۱۰ نیروی $\vec{F}$ بر هر دو بردار $\vec{v}$ و $\vec{B}$ عمود است. به عبارت دیگر، نیروی مغناطیسی بر صفحه‌ای که توسط سرعت و میدان مغناطیسی تشکیل می‌شود عمود است.

کارل فریدریش گاوس (۱۸۵۵ــ۱۷۷۷)
گاوس، ریاضی‌دان، فیزیک‌دان و ستاره‌شناس آلمانی است که مدتی مدیر رصدخانهٔ گوتینگن بوده است. گاوس یکی از ریاضی‌دان‌های بزرگ و برجسته‌ترین کارش در نظریهٔ اعداد است. او به انجام محاسبه‌های بی‌اندازه بغرنج علاقه‌مند بود. وی همچنین روش‌های تازه‌ای برای محاسبه در مکانیک سماوی به‌دست آورد. گاوس روی پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی نیز فعالیت زیادی کرد و قانونی به نام وی در مبحث الکتریسیته وجود دارد.

تسلا یکای بزرگی است و در برخی موارد از یکای قدیمی(غیر SI) و کوچک‌تری به نام گاوس (با نماد G) استفاده می‌کنند به طوری‌که داریم $1\,T=10^{4}\,G$. اندازهٔ میدان مغناطیسی زمین در نزدیکی سطح زمین در قطب‌ها بیشترین (۰/۶۵ G) و در استوا کمترین (۰/۲۵ G) است. بزرگی میدان مغناطیسی در نزدیکی آهنرباهای میله‌ای کوچک حدود ۰/۰۱ تا ۰/۱ تسلا است. همچنین بزرگ‌ترین میدان مغناطیسی مداوم[۱] که امروزه در آزمایشگاه تولید شده، حدود ۴۵ تسلا است.

مثال ۳ــ۱



ذرّه‌ای با بار $q=+4/0\,nC$ و با تندی $v=20\,m/s$ در جهتی حرکت می‌کند که با میدان مغناطیسی یکنواخت $B=120\,G$ زاویهٔ $\theta=60^{\circ}$ می‌سازد (شکل روبه‌رو). اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر این ذرّه را حساب کنید.

پاسخ : با توجه به فرض‌های مسئله داریم :

$$|q|=+4/0\times10^{-9}\,C\ ,\ v=20\,m/s\ ,$$
$$B=120\times10^{-4}\,T\ \text{و}\ \theta=60^{\circ}$$

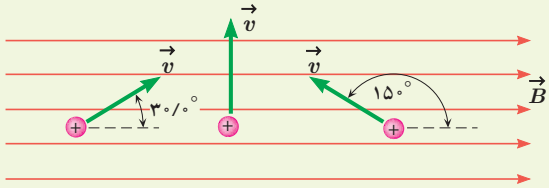
با قرار دادن داده‌های بالا در رابطهٔ ۳ــ۱ داریم :

$$F=|q|vB\sin\theta$$
$$=(4/0\times10^{-9}\,C)(20\,m/s)(120\times10^{-4}\,T)\sin60^{\circ}\approx8/3\times10^{-10}\,N$$

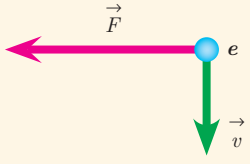
تمرین ۳ــ۱

۱ــ بر پروتونی که با زاویهٔ $\theta=30^{\circ}$ نسبت به میدان مغناطیسی یکنواختی به اندازهٔ $B=320\,G$ در حرکت است نیرویی به‌اندازهٔ $F=5/12\times10^{-14}\,N$ وارد می‌شود. تندی پروتون چند کیلومتر بر ثانیه است؟

۲ــ سه ذرّه، هر کدام با بار $q=6/15\,\mu C$ و تندی $v=46\,m/s$، در میدان مغناطیسی یکنواختی به‌اندازهٔ $B=0/165\,T$ در حرکت‌اند (شکل روبه‌رو). اندازهٔ نیروی وارد بر هر ذرّه را حساب کنید.



پرسش ۳ــ۴



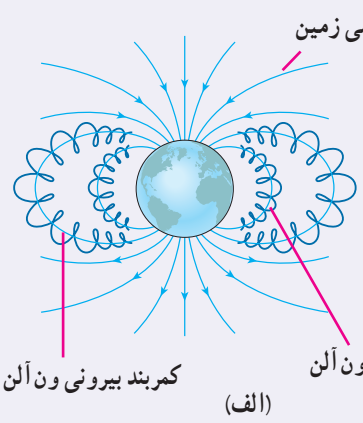
الکترونی عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. با توجه به شکل، جهت میدان $\vec{B}$ کدام است؟

□ بالا □ راست □ درون‌سو □ برون‌سو

۱ــ Strongest Continuous Magnetic Field

خوب است بدانید: کمربندهای تابشی وَن آلن

در بیرون از جوّ زمین، ذرّه‌های باردار بسیاری با تندی‌های بسیار زیادی در حرکت‌اند. این ذرّه‌های سریع را که معمولاً از جنس پروتون، هستهٔ اتم هلیم (ذرّهٔ آلفا) و الکترون هستند پرتوهای کیهانی می‌نامند. این پرتوها افزون‌بر فضانوردان، برای سامانه‌های الکترونیکی واقع در فضا نیز خطرناک‌اند. خوشبختانه بیشتر این پرتوهای باردار توسط میدان مغناطیسی زمین منحرف می‌شوند و مانع از آسیب‌رسانی به موجودات و سامانه‌های روی زمین می‌شود. ذرّات بارداری که در میدان مغناطیسی زمین به دام می‌افتند، کمربندهای تابشی ون آلن را تشکیل می‌دهند (شکل الف).



(الف)

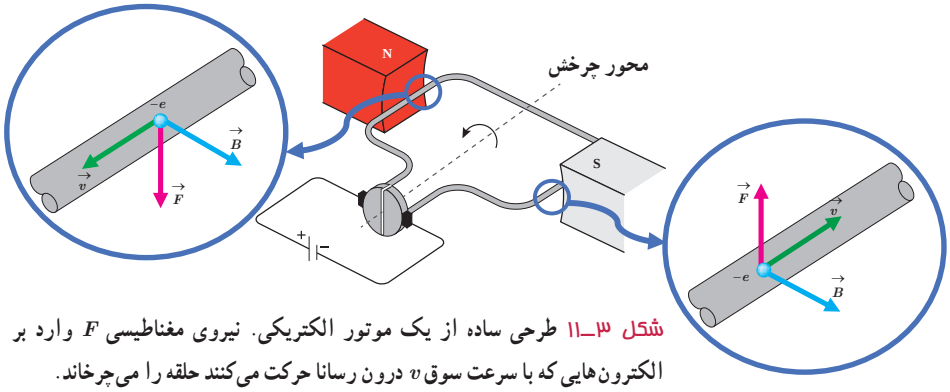
این کمربندها در سال ۱۹۵۸ میلادی و بر اساس داده‌های گردآوری شده توسط ماهوارهٔ اکسپلور I کشف شده و به نام جیمز وَن‌آلن (۲۰۰۶ ــ ۱۹۱۴) یکی از کاشفان آن، نام‌گذاری شدند. فضانوردان در فاصله‌های ایمن بسیار پایین‌تر از این کمربندهای تابشی دور زمین می‌گردند.

هرگاه توفان‌های خورشیدی، ذرّه‌های باردار را به صورت فوران‌های عظیمی پرتاب کنند، بسیاری از آنها از نزدیکی زمین می‌گذرند و در کمربند ون‌آلن به دام می‌افتند. شفق قطبی (نورهای شمالی) پدیدهٔ زیبایی است که براثر برخورد ذرّه‌های باردار موجود در کمربند ون‌آلن با مولکول‌های جوّ زمین به‌وجود می‌آید (شکل ب).

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

۳ــ۴ 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، متهٔ برقی، آسیاب برقی، ماشین لباسشویی، پنکه و... را تشکیل می‌دهند. شکل ۳ــ۱۱ طرحی ساده 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 ۳ــ۱۱ 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.

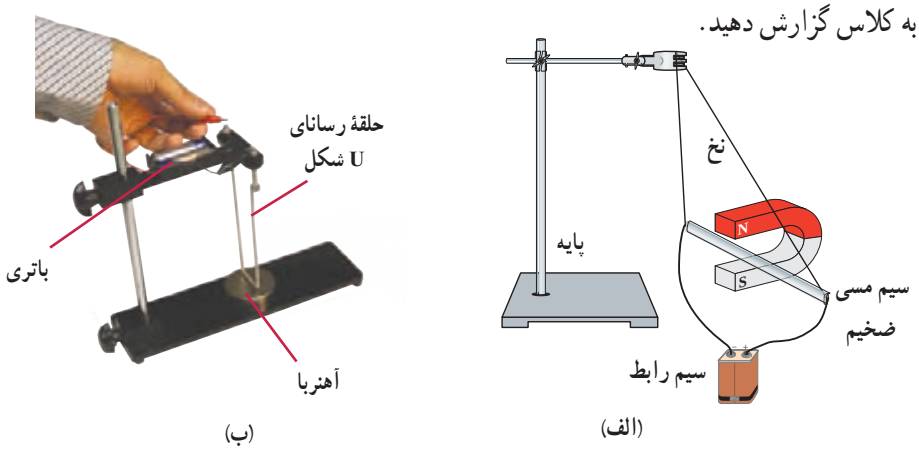
آزمایش ۳ـ۲

هدف: بررسی نیروی وارد بر سیم حامل جریان

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

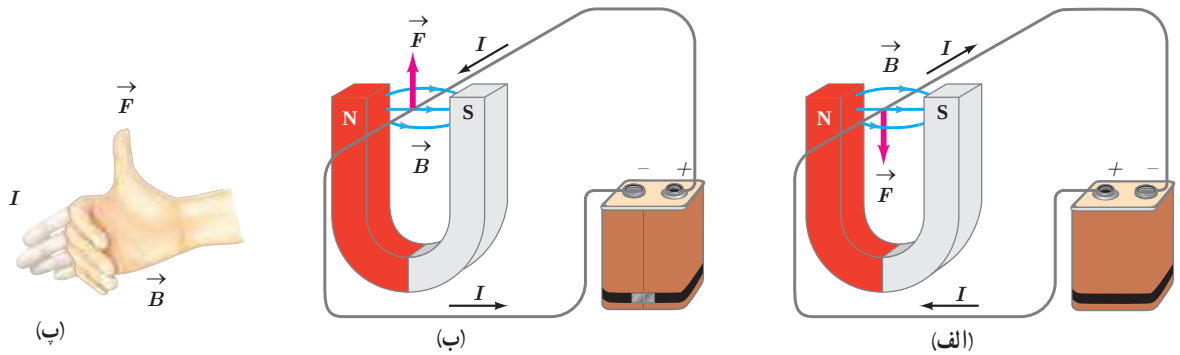
شرح آزمایش :

- مداری مطابق شکل الف 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.
- نتیجهٔ آزمایش را به کلاس گزارش دهید.



اورستد (فیزیک‌دان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی شبیه آزمایش ۳ـ۲ 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 قاعدهٔ دست راست تعیین کرد (شکل ۳ـ۱۲).



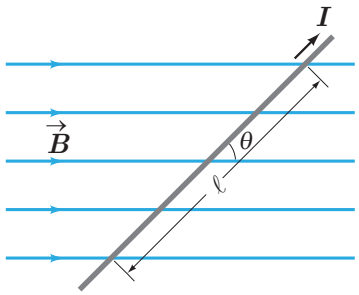
شکل ۳ـ۱۲ (الف) نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی؛ (ب) نیروی مغناطیسی وارد بر سیم در حالی که جهت جریان وارونه شده است. (پ) قاعدهٔ دست راست برای تعیین جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی شکل (ب).

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

آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۳ــ۲ 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 رابطهٔ زیر بیان شده‌اند :

$$F = I\ell B\sin\theta \qquad (۳ــ۳)$$

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 ۳ــ۱۳).



شکل ۳ــ۱۳ سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی. نیروی مغناطیسی وارد بر سیم درون‌سو (عمود بر صفحهٔ کتاب و به طرف داخل) است.

پرسش ۳ــ۵

اگر در شکل ۳ــ۱۳ 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 ۳ــ۲

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی $۴۰۰\,G$ در راستایی قرار دارد که با جهت میدان زاویهٔ ۳۰° می‌سازد. اگر جریان عبوری از سیم $۵/۰\,A$ باشد، بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر $۱/۰\,m$ از این سیم را حساب کنید.

پاسخ : با توجه به فرض‌های مسئله داریم :

$$\ell = ۱/۰\,m \quad \text{و} \quad I = ۵/۰\,A \quad ، \quad \theta = ۳۰^\circ \quad ، \quad B = ۴۰۰\times۱۰^{-۴}\,T$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطهٔ ۳ــ۳ داریم :

$$F = I\ell B\sin\theta = (۵/۰\,A)(۱/۰\,m)(۴۰۰\times۱۰^{-۴}\,T)\sin۳۰^\circ = ۰/۱۰\,N$$

تمرین ۳ــ۲

سیم مستقیمی به طول $۲/۴\,m$ حامل جریان $۲/۵\,A$ از شرق به غرب است. اندازهٔ میدان مغناطیسی زمین در محل این سیم $۰/۴۵\,G$ و جهت آن از جنوب به شمال است. اندازه و جهت نیروی مغناطیسی وارد بر این سیم را تعیین کنید.

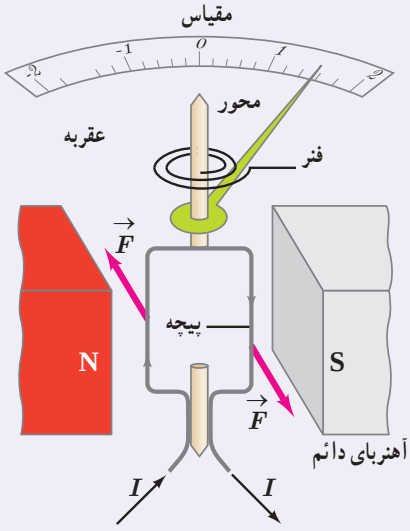
فعالیت ۳ــ۴

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 $۰/۰۱\,g$ استفاده کنید.

خوب است بدانید: طرز کار گالوانومتر

گالوانومتر وسیله‌ای است که با آن می‌توان جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک از مرتبهٔ میکروآمپر را اندازه گرفت. با استفاده از مطالبی که تاکنون فراگرفته‌ایم، می‌توان ساز وکار 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 عقربهٔ 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 اولیهٔ خود بر می‌گرداند. صفحهٔ گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می‌چرخد را برحسب یکای میکروآمپر مدرّج می‌کنند.



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

۳ــ۵ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

تا اینجا پی بردیم که در فضای اطراف آهنرباهای دائمی میدان مغناطیسی وجود دارد. در ادامهٔ 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 عقربهٔ مغناطیسی در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می‌شود (شکل ۳ــ۱۴). او با انجام دادن آزمایش‌های بیشتر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم رسانا، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به‌وجود می‌آورد. این کشف اورستد گام مهمی در راه درک رابطهٔ بین الکتریسیته و مغناطیس بود که به گسترش مبحث الکترومغناطیس انجامید. در این بخش، به بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم‌ها می‌پردازیم.

شکل ۳ــ۱۴ میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را می‌توان با قرار دادن تعدادی عقربهٔ مغناطیسی پیرامون آن نشان داد.

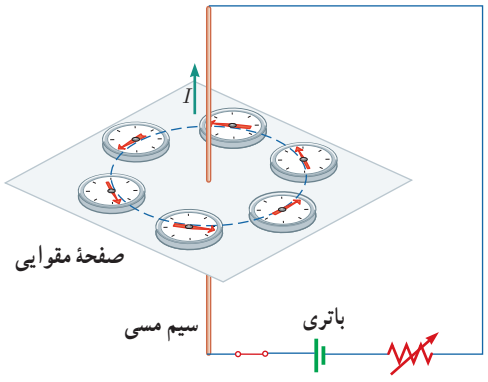
هانس کریستیان اورستد (۱۸۵۱–۱۷۷۷) فیزیک‌دان و شیمی‌دان مشهور دانمارکی است که تأثیر بسیار بزرگی در تاریخ فیزیک گذاشته است. کشفیات وی در زمینهٔ الکتریسیته و مغناطیس، اولین گام در شکل‌گیری نظریهٔ الکترومغناطیس بود. اورستد که معمولاً در کلاس‌هایش به انجام آزمایش هم می‌پرداخت، در یکی از روزهای سال ۱۸۲۰ میلادی، در حالی که مشغول آموزش الکتریسیته و تولید جریان با پیل الکتریکی بود، متوجه انحراف جهت عقربهٔ 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 حوزهٔ فلسفه هم مطالعاتی داشت و همچنین یکی از دوستان نزدیک داستان‌نویس مشهور کودکان، هانس کریستیان آندرسن بود.

آزمایش ۳ـ۳

هدف: بررسی آثار مغناطیسی جریان الکتریکی (آزمایش اورستد)

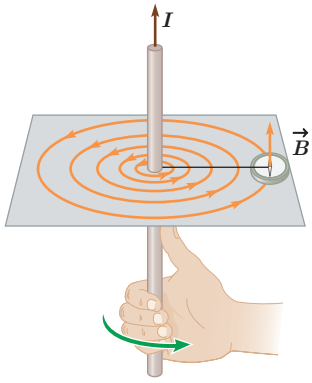
وسیله‌های مورد نیاز : باتری، سیم مسی نسبتاً ضخیم، صفحهٔ مقوایی، عقربهٔ مغناطیسی (قطب‌نما)، رئوستا و سیم رابط

شرح آزمایش :



- سیم مسی را از صفحهٔ مقوایی بگذرانید و با آن مداری مطابق شکل روبه‌رو تشکیل دهید.
- قبل از برقراری جریان الکتریکی، عقربهٔ مغناطیسی را درمجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرارگرفتن آن توجه کنید.
- با وصل کردن مدار، جریان الکتریکی را از سیم مسی عبور دهید و به جهت‌گیری عقربهٔ مغناطیسی توجه کنید.
- عقربهٔ مغناطیسی را در نقطه‌های مختلف روی مقوا قرار دهید و جهت آن را بررسی کنید.
- با توجه به جهت گیری عقربه در نقاط مختلف صفحهٔ مقوّایی، 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 رئوستا، تحقیق کنید که افزایش یا کاهش جریان چه تأثیری در نتیجهٔ آزمایش دارد؟
- نتیجهٔ این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.

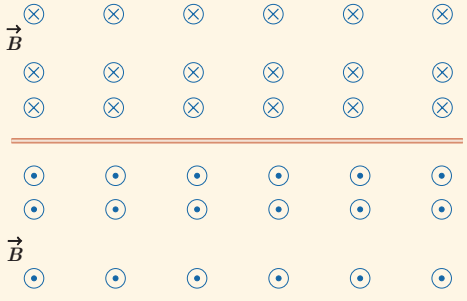
با انجام این آزمایش می‌بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان، مطابق شکل ۳ـ۱۵ به صورت دایره‌های هم‌مرکز در اطراف سیم حامل جریان هستند. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم مستقیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقربهٔ مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن، با استفاده از قاعدهٔ دست راست نیز می‌توان این جهت را تعیین کرد؛ مطابق این قاعده، اگر سیم را در دست راست خود بگیرید به‌گونه‌ای 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.



شکل ۳ـ۱۵ قاعدهٔ دست راست برای تعیین جهت $\vec{B}$ اطراف سیم بلند مستقیم حامل جریان.

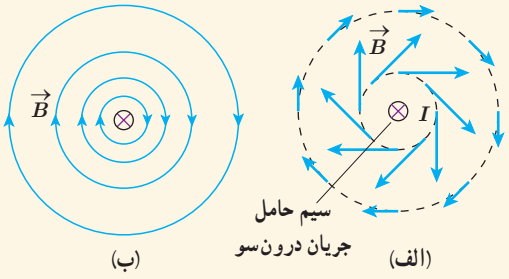
پرسش ۳ـ۶

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



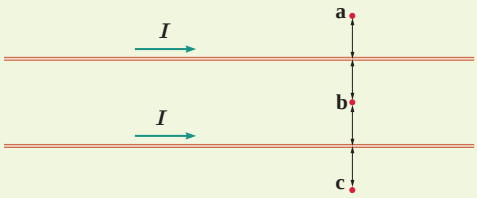
پرسش ۳ــ۷

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



تمرین ۳ــ۳

جهت میدان مغناطیسی برایند (خالص) را ناشی از سیم‌های موازی و بلند حامل جریان را در هر یک از نقطه‌های a، b و c پیدا کنید. نقطهٔ b در فاصلهٔ مساوی از دو سیم قرار دارد.

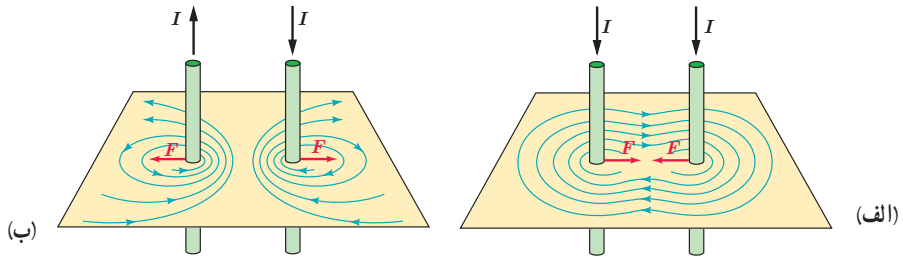


فنّاوری و کاربرد: میدان‌های مغناطیسی بدن

تمام یاخته‌های زندهٔ بدن انسان به‌طور الکتریکی فعال‌اند. جریان‌های الکتریکی ضعیف در بدن، میدان‌های مغناطیسی ضعیف ولی قابل اندازه‌گیری تولید می‌کنند. اندازهٔ 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 مغناطیس سنج‌هایی به نام اسکوییدها[1] ساخته شده‌اند. شکل روبه‌رو یک دستگاه اسکوییدها را نشان می‌دهد که در حال اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تولید شده در مغز است.

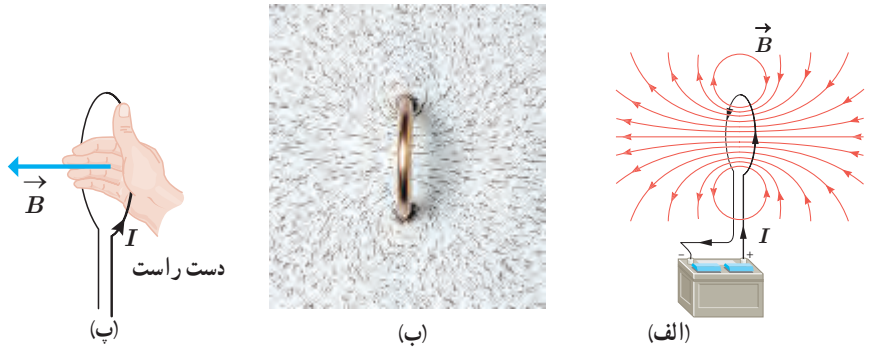
نیروی بین سیم های موازی حامل جریان : در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی وجود دارد. همچنین در بخش ۳ــ۴ با نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان آشنا شدیم. حال فرض کنید برای تولید میدان مغناطیسی به جای آهنربا، از یک سیم حامل جریان استفاده کنیم. اگر سیم حامل جریان 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 ربایشی است (شکل ۳ــ۱۶ الف). همچنین اگر جریان‌ها در دو جهت مخالف از دو سیم موازی بگذرند، نیروی بین آنها رانشی است (شکل ۳ــ۱۶ب).

۱ــ SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)



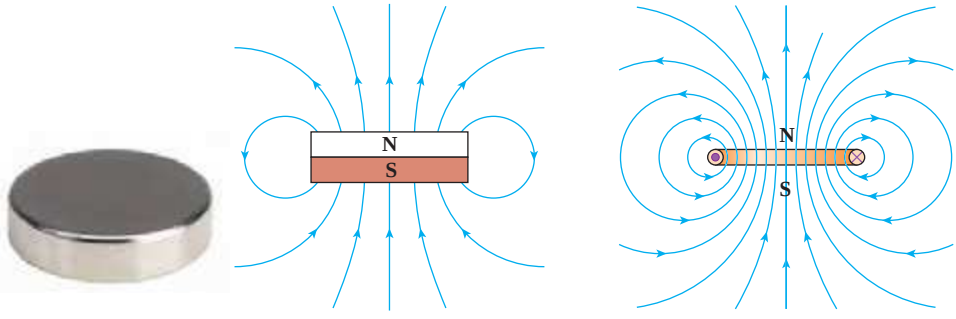
شکل ۳ــ ۱۶ برآیند میدان مغناطیسی حاصل از دو سیم حامل جریان و نیروی بین آنها.
الف) برای جریان‌های همسو، ربایشی است و (ب) برای جریان‌های ناهمسو، رانشی است.

میدان مغناطیسی ناشی از یک حلقهٔ دایره‌ای حامل جریان : شکل ۳ــ۱۷ الف خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف یک حلقهٔ رسانای دایره‌ای نشان می‌دهد که حامل جریان I است. همان‌طور که دیده می‌شود خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیهٔ داخل حلقه به یکدیگر نزدیک‌ترند؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است. افزون براین، در نقطه‌های روی محورحلقه، میدان موازی محور است. جهت خط‌های میدان مغناطیسی حلقه را می‌توان با قاعدهٔ دست راست به روش نشان داده شده در شکل ۳ــ۱۷ پ تعیین کرد.



شکل ۳ــ۱۷ (الف) خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک حلقهٔ حامل جریان. (ب) طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقهٔ حامل جریان با استفاده از برادهٔ آهن. (پ) استفاده از قاعدهٔ دست راست برای تعیین جهت $\vec{B}$ یک حلقهٔ حامل جریان.

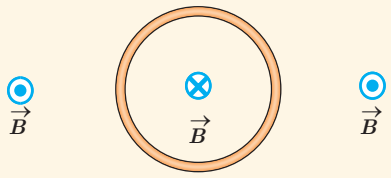
بررسی و مقایسهٔ میدان مغناطیسی یک حلقهٔ حامل جریان و یک آهنربای تخت دایره‌ای شکل، نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی آنها درست مانند یکدیگر است (شکل ۳ــ۱۸). به همین دلیل، هر حلقهٔ حامل جریان را به‌عنوان یک دو قطبی مغناطیسی در نظر می‌گیرند.



شکل ۳ــ۱۸ حلقهٔ حامل جریان دو قطب دارد و میدان مغناطیسی آن مانند یک آهنربای دائمِ تختِ دایره‌ای شکل است.

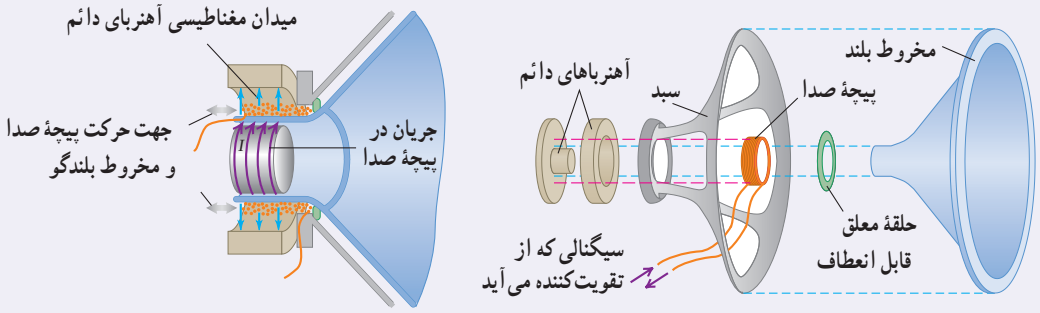
پرسش ۳ــ۸

شکل روبه‌رو، یک حلقهٔ 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 پیچهٔ 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 دامنهٔ جریان در پیچه، نوسان می‌کند. با افزایش جریان تقویت‌کننده، دامنه‌های نوسان و موج صوتی حاصل از حرکت مخروط افزایش می‌یابد.

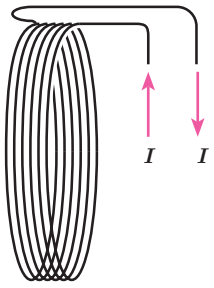


اجزای یک بلندگو. آهنربای دائمی میدان مغناطیسی‌ای تولید می‌کند که نیروهایی بر جریان‌هایی که از پیچهٔ صدا می‌گذرد وارد می‌کند؛ برای جریان I که در شکل نشان داده شده است نیرو به طرف راست است. اگر جریان الکتریکی در پیچهٔ صدا نوسان کند، مخروط بلندگو که متصل به پیچهٔ صداست با همان بسامد نوسان می‌کند.

استفاده از یک تک حلقه برای تولید میدانی با اندازهٔ مطلوب ممکن است نیازمند آن‌چنان جریان بزرگی باشد که از بیشینهٔ جریان مجاز سیمِ حلقه فراتر باشد. در چنین شرایطی به جای تک‌حلقه، از پیچه‌ها برای تولید میدان مغناطیسی استفاده می‌شود (شکل ۳ــ۱۹).

اندازهٔ میدان مغناطیسی در مرکز حلقه‌ای به شعاع R که حامل جریان است از رابطهٔ $B = \mu_0 I/2R$ به دست می‌آید. که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T.m/A}$ است. اگر به جای یک تک حلقه، پیچه‌ای شامل N حلقهٔ نزدیک به هم و با شعاع یکسان R داشته باشیم، آنگاه اندازهٔ میدان مغناطیسی در مرکز این پیچه، که معمولاً به آن پیچهٔ مسطح نیز گفته می‌شود، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

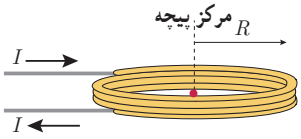
$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \qquad (۵ــ۳)$$



شکل ۳ــ۱۹ پیچه

دلیل آنکه برای تولید میدان‌های مغناطیسی قوی به‌جای تک حلقه از پیچه‌ای از حلقه‌ها استفاده می‌شود همین ضریب N در رابطهٔ ۳ــ۵ است.

مثال ۳ــ۳



از پیچهٔ مسطحی به شعاع ۶/۲۸ cm که از ۲۰۰۰ دور سیم نازک درست شده است، جریان ۲۰ mA می‌گذرد (شکل روبه‌رو). اندازهٔ میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه به دست آورید.

پاسخ : با توجه به داده‌های مسئله داریم :

$$R = ۶/۲۸\times۱۰^{-۲}\,\mathrm{m} \quad , \quad N = ۲۰۰۰ \quad , \quad I = ۲۰\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{A} \quad , \quad B = ?$$

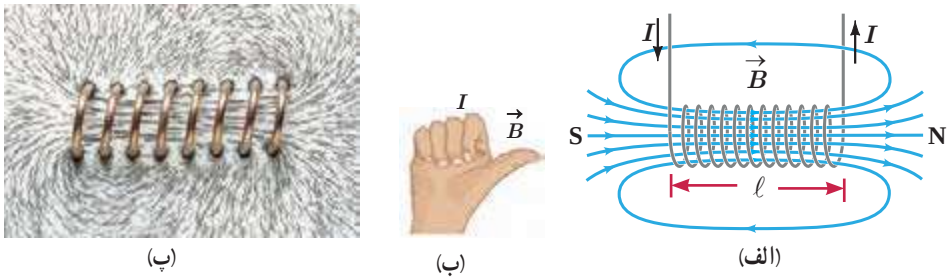
با جایگذاری این داده‌ها در رابطهٔ ۳ــ۵ داریم :

$$B = \frac{\mu_{\circ} NI}{۲R} = \frac{(۴\pi\times۱۰^{-۷}\,\mathrm{T.m/A})(۲۰۰۰)(۲۰\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{A})}{۲(۶/۲۸\times۱۰^{-۲}\,\mathrm{m})} = ۴/۰\times۱۰^{-۴}\,\mathrm{T} = ۴/۰\,\mathrm{G}$$

تمرین ۳ــ۴

اندازهٔ میدان مغناطیسی دور سر انسان حدود $۳\times۱۰^{-۸}\,\mathrm{G}$ اندازه‌گیری شده است. اگرچه جریان‌هایی که این میدان را به‌وجود می‌آورند بسیار پیچیده‌اند، ولی با در نظر گرفتن این جریان‌ها به‌صورت تک حلقه‌ای دایره‌ای به قطر ۱۶ 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 سیملولهٔ حامل جریان : سیملوله، سیم درازی است که به‌صورت مارپیچی بلند، پیچیده شده است. با عبور جریان الکتریکی از سیملوله، در فضای اطراف آن میدان مغناطیسی به‌وجود می‌آید. طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک سیملولهٔ حامل جریان الکتریکی در شکل ۳ــ۲۰ 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 قاعدهٔ دست راست که در شکل نشان داده شده است تعیین می‌شود (شکل ۳ــ۲۰ ب).



(پ) (ب) (الف)

شکل ۳ــ۲۰ (الف) میدان مغناطیسی یک سیملولهٔ حامل جریان. (ب) تعیین جهت میدان به کمک قاعدهٔ دست راست. (پ) طرح خط‌های میدان مغناطیسی سیملوله با استفاده از برادهٔ آهن.

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

$$B = \frac{\mu_{\circ} NI}{\ell} \qquad \text{(سیملولهٔ آرمانی)} \qquad (۳_۶)$$

در این رابطه، I جریان عبوری، ℓ طول سیملوله و N تعداد دورهای سیملوله است.

مثال ۳ــ۴

سیملوله‌ای آرمانی به طول ۱۵cm دارای ۶۰۰ حلقهٔ 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 :

$$\ell = ۱۵\text{cm} = ۰/۱۵\text{m}, \quad N = ۶۰۰, \quad I = ۸۰۰\text{mA} = ۸۰۰\times۱۰^{-۳}\text{A}, \quad B = ?$$

به این ترتیب داریم :

$$B = \frac{\mu_{\circ} NI}{\ell} = \frac{(۴\pi\times۱۰^{-۷}\text{T.m/A})(۶۰۰)(۸۰۰\times۱۰^{-۳}\text{A})}{۰/۱۵\text{m}} \approx ۴/۰\times۱۰^{-۳}\text{T} = ۴۰\text{G}$$

تمرین ۳ــ۵

سیملوله‌ای آرمانی به طول ۴۰/۰cm چنان طراحی شده است که جریان بیشینه‌ای به‌شدّت ۱/۲ A می‌تواند از آن بگذرد. با عبور این جریان از سیملوله، اندازهٔ میدان مغناطیسی درون آن و دور از لبه‌ها ۲۷۰ G می‌شود. تعداد دورهای سیملوله چقدر باید باشد؟

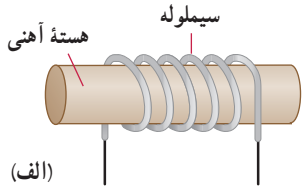
فعالیت ۳ــ۵

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

(الف)

(ب)

(پ)

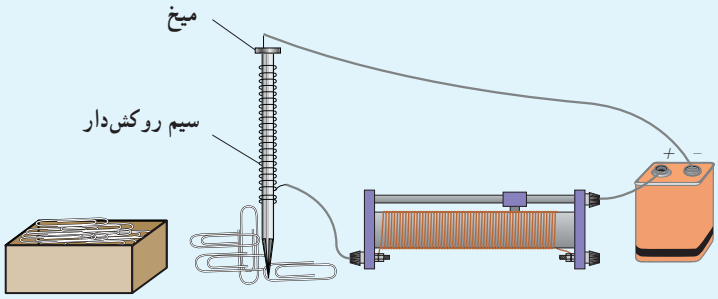


(ب)

شکل ۳ــ۲۱ (الف) سیملوله با هستهٔ آهنی.
(ب) آهنربای الکتریکی صنعتی

سیملوله با هستهٔ آهنی ــ آهنربای الکتریکی : شکل۳ــ۲۱ الف سیملوله‌ای با یک هستهٔ آهنی را نشان می‌دهد. وقتی جریانی در سیملوله برقرار می‌شود، میدان مغناطیسی سیملوله، در هستهٔ آهنی خاصیت مغناطیسی القا می‌کند و هستهٔ آهنی، آهنربا می‌شود. این آهنربا را آهنربای الکتریکی می‌نامند. آهنربای الکتریکی صنعتی (شکل ۳ــ۲۱ 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 قُراضه‌های آهن را بلند کند. هر چه تعداد دورهای سیملوله و جریانی که از آن می‌گذرد بیشتر باشد، آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود. وجود هستهٔ آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیملوله می‌شود. میدان مغناطیسی سیملولهٔ بدون هستهٔ آهنی به قدری ضعیف است که در عمل کاربردهای کمی‌دارد.

فعالیت ۳ــ۶



قسمتی از سیم نازک روکش‌داری را دور میخ آهنی نسبتاً بلندی بپیچید و مداری مطابق شکل تشکیل دهید. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان عبوری از مدار را تغییر دهید.

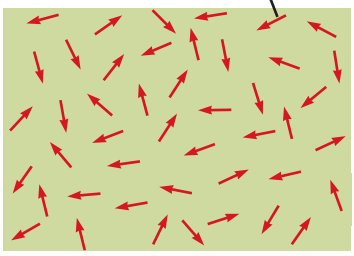
الف) بررسی کنید برای جریان‌های متفاوت، آهنربای الکتریکی چه تعداد گیره فلزی را می‌تواند بلند کند. ب) اگر تعداد دورهای سیم دو برابر شود، نتیجهٔ کار چه تفاوتی خواهد داشت؟

۳ــ۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

رفتار آهنرباهای دائمی، نوارهای مغناطیسیِ پشت کارت‌های بانکی و دیسک‌های رایانه‌ای به‌طور مستقیم به ویژگی‌های مغناطیسی مواد بستگی دارد. هنگامی که اطلاعاتی روی نوار مغناطیسیِ پشت کارت‌های بانکی یا یک دیسک رایانه‌ای ذخیره می‌شود آرایه‌ای از هزاران هزار آهنربای دائمی میکروسکوپی روی نوار مغناطیسیِ پشت کارت یا دیسک ایجاد می‌شود. در این بخش، برخی ویژگی‌های مغناطیسی مواد را بررسی می‌کنیم.

موادی را که اتم‌ها یا مولکول‌های سازندهٔ آنها خاصیت مغناطیسی داشته باشند، مواد مغناطیسی می‌نامند. در واقع می‌توان گفت کوچک‌ترین ذرّه‌های تشکیل‌دهندهٔ 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 مولکول‌اند. در ادامه به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می‌پردازیم.

هر ذرهٔ سازندهٔ مواد پارامغناطیسی یک آهنربای میکروسکوپی است.



شکل ۳ــ۲۲ سمت‌گیری کاتوره‌ای دوقطبی‌های مغناطیسی در یک مادهٔ پارامغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی

مواد پارامغناطیسی : اتم‌های مواد پارامغناطیسی، خاصیت مغناطیسی دارند اما دوقطبی‌های مغناطیسی وابستهٔ به آنها، به‌طور کاتوره‌ای سمت‌گیری کرده‌اند و میدان مغناطیسی خالصی ایجاد نمی‌کنند (شکل ۳ــ۲۲). با قرار دادن مواد پارامغناطیسی درون میدان مغناطیسی خارجی قوی (مثلاً نزدیک یک آهنربای قوی)، دو قطبی‌های مغناطیسی آنها، مانند عقربهٔ 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 ۳ــ۷

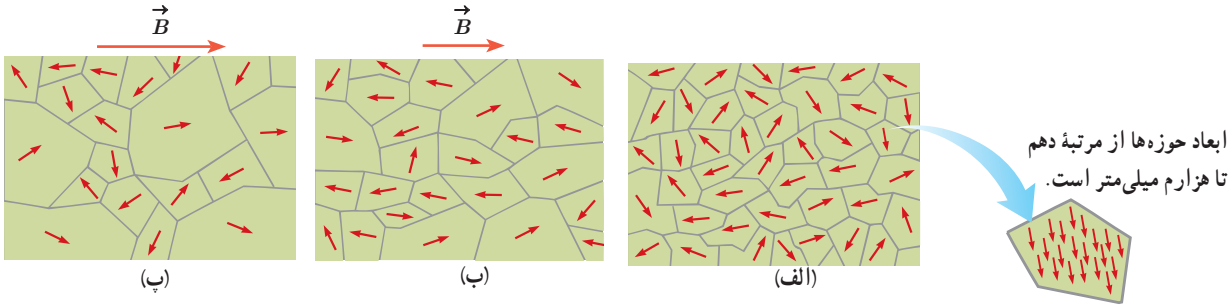
یک لولهٔ آزمایش را تا نزدیکی لبهٔ آن از الکل طبی (اتانول ۹۶ درجه) پر کنید. در لوله را ببندید و آن را به‌طور افقی قرار دهید. مطابق شکل، یک آهنربای نئودیمیم را بالای حباب هوای درون لوله بگیرید و به آرامی آهنربا را حرکت دهید. دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به گفت‌وگو بگذارید.

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 عنصرها فرومغناطیسی‌اند. برهم‌کنش‌های قوی بین دوقطبی‌های مغناطیسی در این مواد موجب می‌شود که این دوقطبی‌ها، حتی در نبود میدان خارجی، در ناحیه‌هایی که حوزه‌های مغناطیسی نامیده می‌شود، همسو شوند. نمونه‌ای از ساختار حوزه‌ها در مواد فرومغناطیسی در شکل ۳ــ۲۳ الف نشان داده شده است. درون هر حوزه تقریباً از مرتبه $۱۰^{۱۹}$ 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 تحت‌تأثیر 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 می‌شود. در این فرایند، مرز بین بیشتر حوزه‌ها جابه‌جا می‌شود، و ماده خاصیت آهنربایی پیدا می‌کند. شکل ۳ــ۲۳ ب یک مادهٔ فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی ضعیف و شکل ۳ــ۲۳ پ در یک میدان مغناطیسی خارجی قوی‌تر نشان می‌دهد.

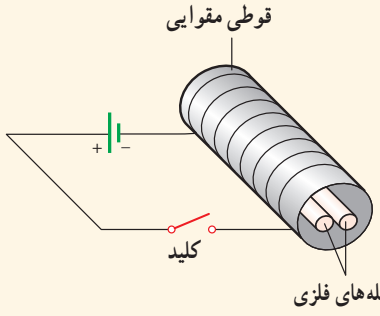


شکل ۳ــ۲۳ (الف) مادهٔ فرومغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی خارجی. (ب) مادهٔ فرومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی ضعیف. (پ) مادهٔ فرومغناطیس در حضور میدان مغناطیسی خارجی قوی.

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

برای خاصیت آهنربایی هر مادهٔ فرومغناطیسی، مقدار اشباع یا بیشینه‌ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی به‌وجود می‌آید که مادهٔ فرومغناطیسی در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد؛ به‌طوری‌که درصد بالایی از دوقطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها به موازات یکدیگر هم‌خط شوند. به عبارت دیگر، حجم حوزه‌هایی که با میدان مغناطیسی خارجی همسو هستند، به بیشترین مقدار خود برسد.

پرسش ۳ــ۹



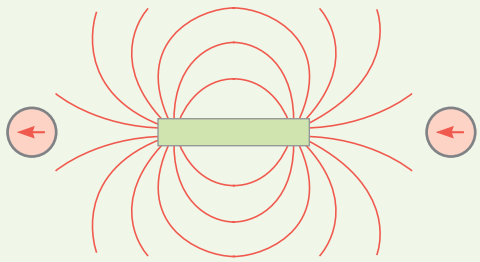
دو میلهٔ فلزی بلند مطابق شکل روبه‌رو درون سیملوله‌ای که دور یک قوطی مقوایی پیچیده شده است قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از این سیملوله، مشاهده می‌شود که دو میله از یکدیگر دور می‌شوند. وقتی کلید باز و جریان در مدار قطع می‌شود، میله‌ها به محل اولیه باز می‌گردند.

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

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

۳ـ۱ و ۲ـ۲ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی و میدان مغناطیسی

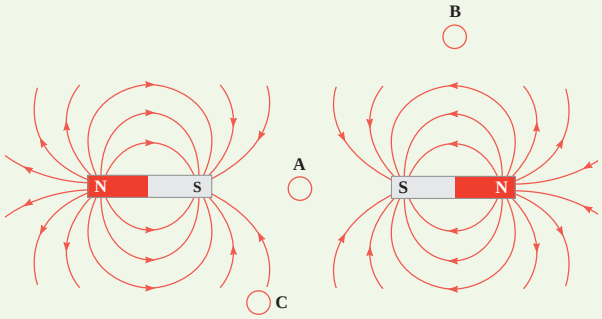
۱ با توجه به جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی در شکل زیر، قطب‌های آهنربای میله‌ای و جهت خط‌های میدان مغناطیسی را تعیین کنید.



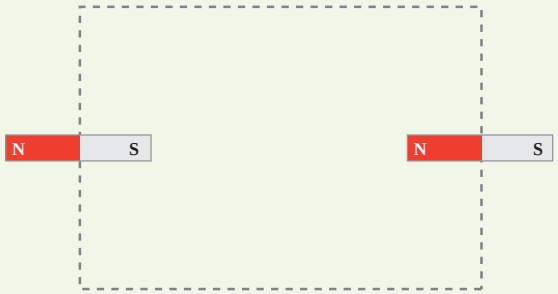
۲ شکل زیر، خط‌های میدان مغناطیسی را در نزدیکی دو آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد.

الف) دربارهٔ میدان مغناطیسی در نقطهٔ A چه می‌توان گفت؟

ب) با رسم شکل نشان دهید عقربهٔ قطب‌نما در نقطه‌های B و C به ترتیب در کدام جهت قرار می‌گیرد؟

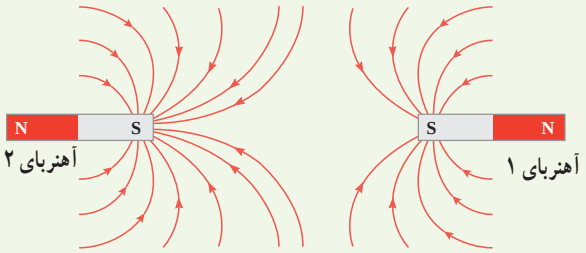


پ) اگر مانند شکل زیر یکی از آهنرباها را بچرخانیم تا جای قطب‌های آن عوض شود، خط‌های میدان مغناطیسی را در ناحیهٔ نقطه‌چین رسم کنید.



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. اندازهٔ میدان مغناطیسی را در نزدیکی قطب‌های آهنرباها با هم مقایسه کنید.



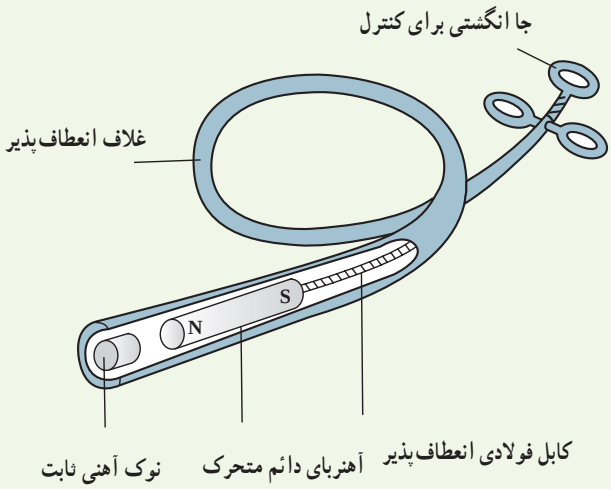
۴ کودکی یک قطعهٔ کوچک آهنی را بلعیده است. پزشک می‌خواهد آن را با دستگاه شکل زیر بیرون بیاورد.

الف) هنگامی‌که آهنربای دائمی به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟

ب) ساختن نوک ثابت آهن چه مزیتی دارد؟

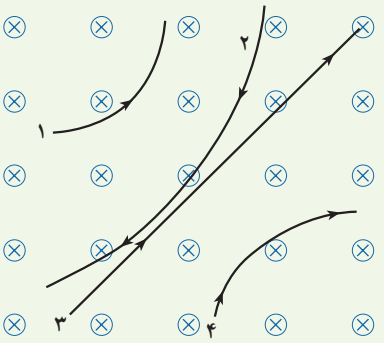
پ) این وسیله را باید به درون گلوی کودک وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد؛ چرا غلاف باید انعطاف‌پذیر باشد؟

ت) پزشک می‌خواهد یک گیرهٔ آهنی کاغذ و یک واشر آلومینیومی را از گلوی کودک بیرون بیاورد؛ کدام‌یک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟

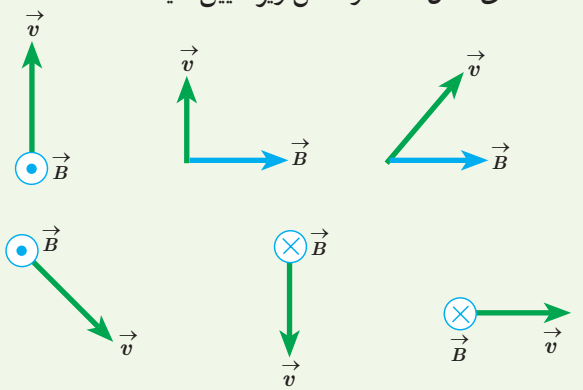


۳ـ۳ نیروی مغناطیسی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی

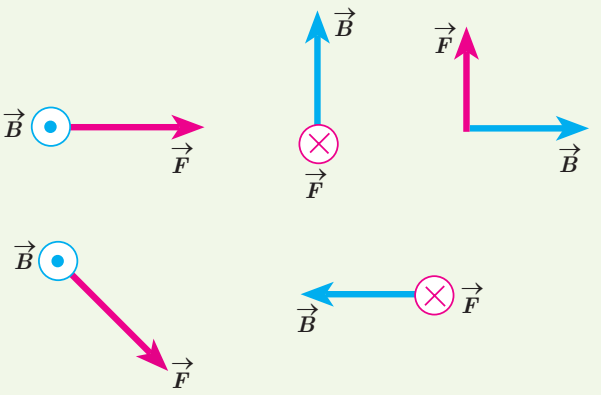
۵ چهار ذرّه هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون‌سو مسیرهایی مطابق شکل زیر می‌پیمایند. دربارهٔ نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟



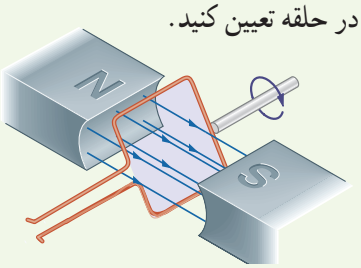
۶ جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هریک از حالت‌های نشان داده در شکل زیر تعیین کنید.



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 حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی که حامل جریان I است، مطابق شکل درون میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد. جهت جریان را در حلقه تعیین کنید.

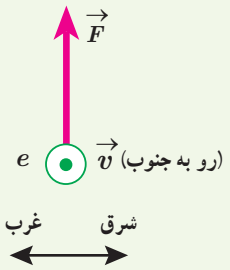


۹ پروتونی با تندی $۴/۴\times۱۰^{۶}\,m/s$ درون میدان مغناطیسی یکنواختی به‌اندازهٔ $۱۸mT$ در حرکت است. جهت حرکت پروتون با جهت $\vec{B}$، زاویهٔ ۶۰° می‌سازد.

الف) اندازهٔ 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 $۱/۶\times۱۰^{-۱۹}C$ و جرم آن را $۱/۷\times۱۰^{-۲۷}kg$ در نظر بگیرید).

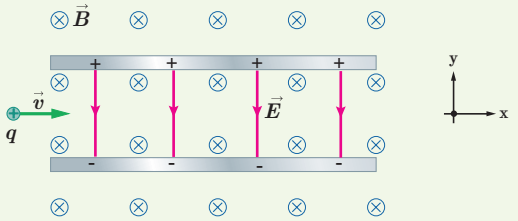
۱۰ الکترونی با تندی $۲/۴\times۱۰^{۵}\,m/s$ درون میدان مغناطیسی یکنواختی در حرکت است. اندازهٔ نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند.



الف) اگر جهت این نیروی بیشینه، رو به بالا و اندازهٔ آن برابر $۶/۸\times۱۰^{-۱۴}N$ باشد، اندازه و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

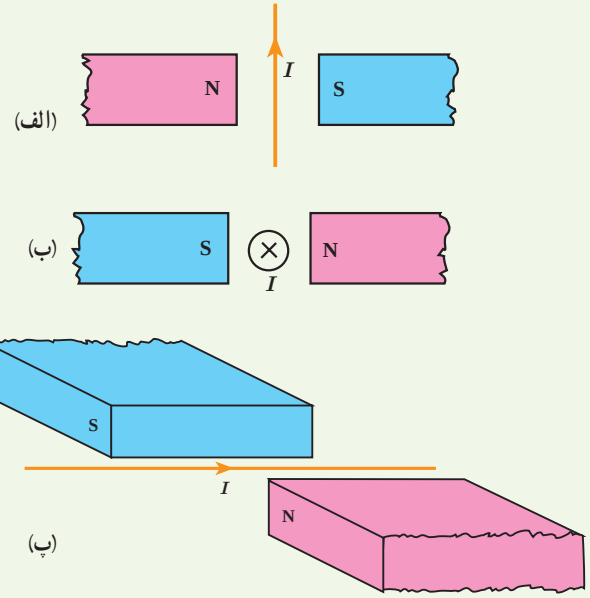
ب) اندازهٔ میدان الکتریکی چقدر باشد تا همین نیرو را ایجاد کند؟

۱۱ ذرهٔ باردار مثبتی با جرم ناچیز و با سرعت $\vec{v}$ در امتداد محور x وارد فضایی می‌شود که میدان‌های یکنواخت $\vec{E}$ و $\vec{B}$ وجود دارد (شکل زیر). اندازهٔ این میدان‌ها برابر $E=۴۵۰\,N/C$ و $B=۰/۱۸T$ است. تندی ذره چقدر باشد تا در همان امتداد محور x به حرکت خود ادامه دهد؟

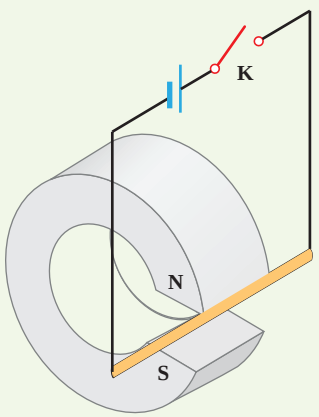


۳ـ۴ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان

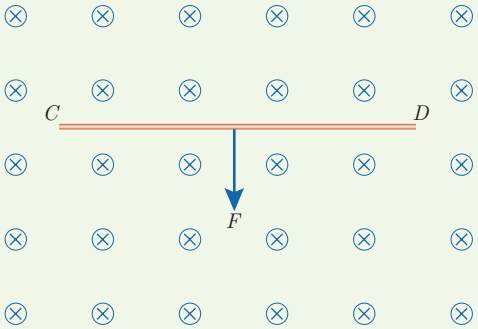
۱۲ جهت نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های الف، ب و پ با استفاده از قاعدهٔ دست راست بیابید.



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.



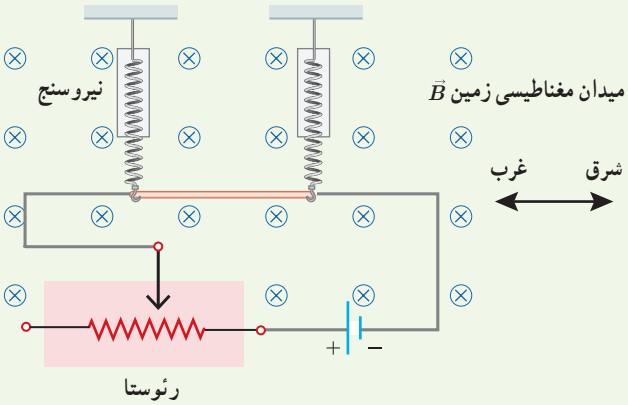
۱۴ سیم رسانای CD به طول ۲m مطابق شکل زیر عمود بر میدان مغناطیسی درون‌سو با اندازهٔ ۰/۵T قرار گرفته است؛ اگر اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم برابر ۱N باشد، جهت و مقدار جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.



۱۵ یک سیم حامل جریان ۱/۶ آمپر مطابق شکل زیر با دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به‌طور افقی و در راستای غرب ــ شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را یکنواخت، به‌طرف شمال و اندازهٔ ۰/۰۵mT بگیرید.

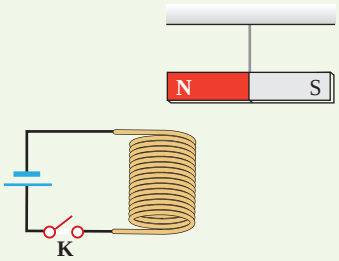
الف) اندازهٔ نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را پیدا کنید.

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 ۸ گرم است ($g = 9/8 N/kg$).

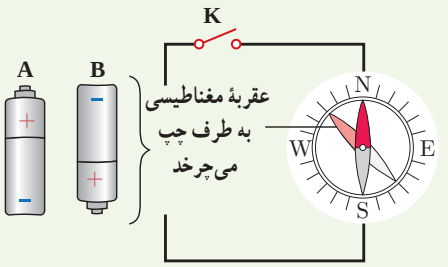


۳ـ۵ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

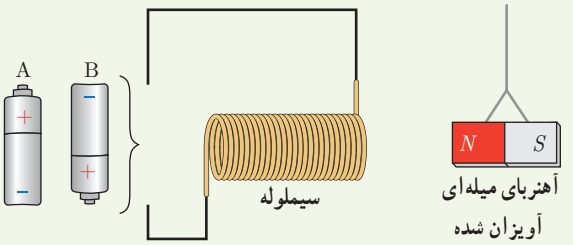
۱۶ یک آهنربای میله‌ای مطابق شکل زیر، بالای سیملوله‌ای آویزان شده است. توضیح دهید با بستن کلید K چه تغییری در وضعیت آهنربا رخ می‌دهد.



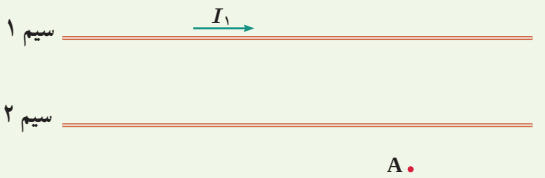
۱۷ کدام باتری را در مدار شکل زیر قرار دهیم تا پس از بستن کلید K، عقربه قطب‌نما که روی سیم قرار دارد، در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت شروع به چرخش کند؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.



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

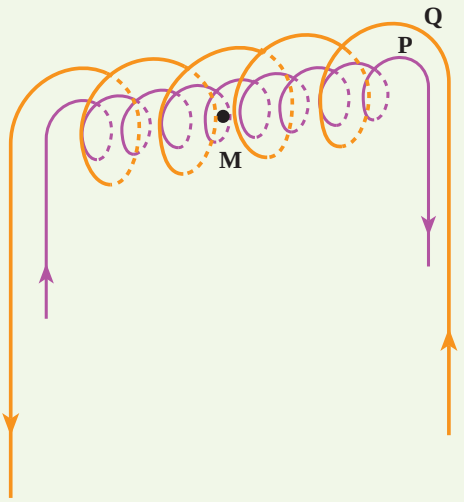


۱۹ شکل زیر، دو سیم موازی و بلند حامل جریان را نشان می‌دهد. اگر میدان مغناطیسی برایند حاصل از این سیم‌ها در نقطهٔ A صفر باشد، جهت جریان آن را در سیم ۲ پیدا کنید.



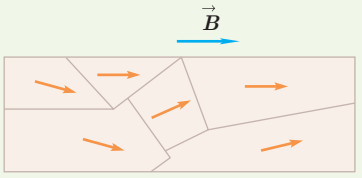
۲۰ سیملوله‌ای شامل ۲۵۰ حلقه است که دور یک لولهٔ پلاستیکی توخالی به طول ۰/۱۴ متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیملوله ۰/۸A باشد، اندازهٔ میدان مغناطیسی درون سیملوله را حساب کنید.

۲۱ در شکل زیر دو سیملولهٔ P و Q هم محورند و طول برابر دارند. تعداد دور سیملولهٔ P برابر ۲۰۰ و تعداد دور سیملولهٔ Q برابر ۳۰۰ است. اگر جریان ۱A از سیملولهٔ Q عبور کند، از سیملولهٔ P چه جریانی باید عبور کند تا برایند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیملوله در نقطهٔ M (روی محور دو سیملوله) صفر شود؟

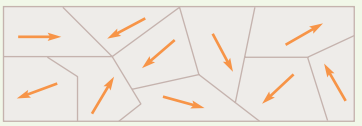


۳ـ۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

۲۲ شکل الف حوزه‌های مغناطیسی مادهٔ فرومغناطیسی را درون میدان خارجی $\vec{B}$ نشان می‌دهد. شکل ب همان ماده را پس از حذف میدان $\vec{B}$ نشان می‌دهد. نوع مادهٔ فرومغناطیسی را با ذکر دلیل تعیین کنید.

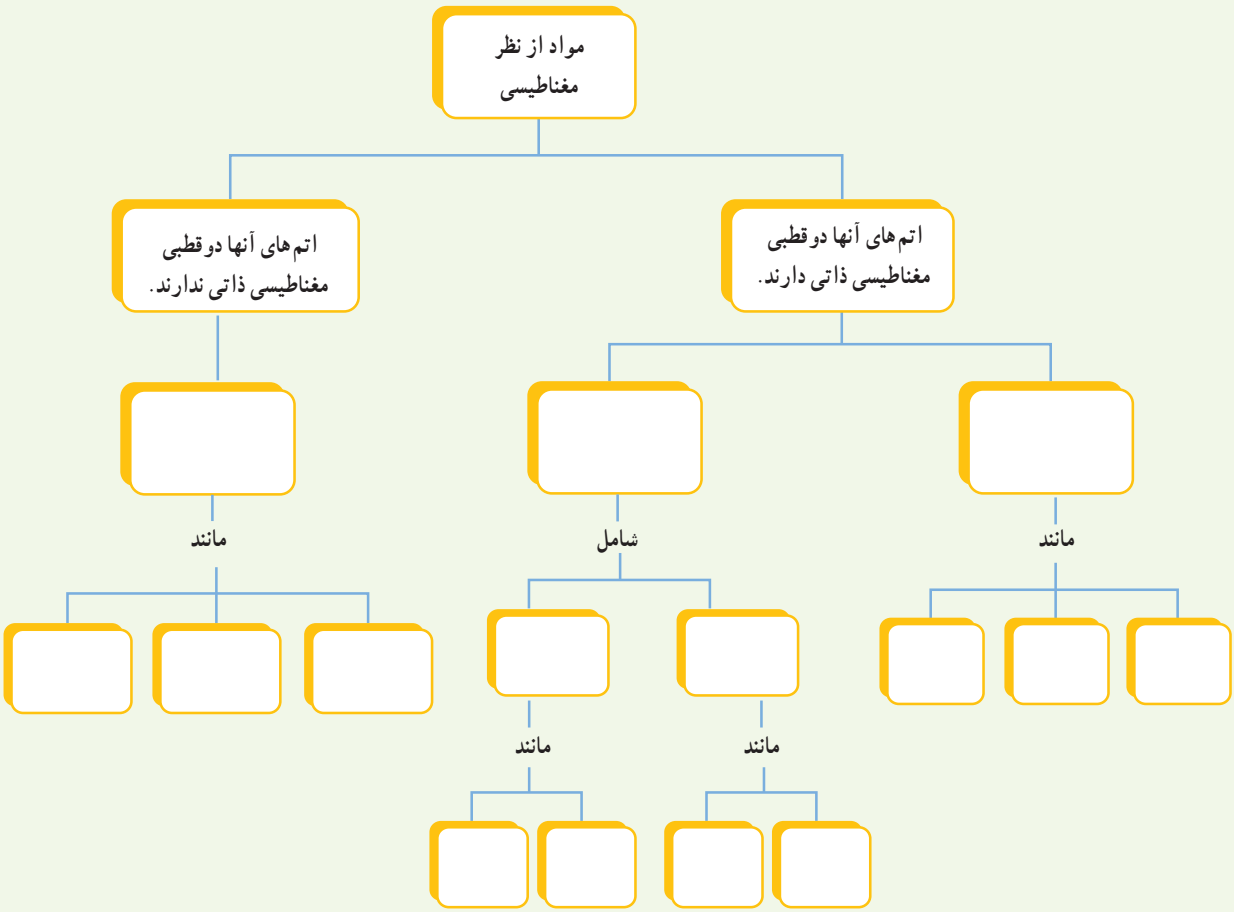


(الف)



(ب)

۲۳ با توجه به آنچه در بخش ویژگی‌های مغناطیسی مواد دیدید، نقشه مفهومی زیر را کامل کنید.



۴

القای الکترومغناطیسی و جریان متناوب

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

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.

۴ــ۱ پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی

در این بخش، به بررسی القای نیروی محرکهٔ الکتریکی در یک مدار بسته خواهیم پرداخت. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده بیشتر آشنا می‌شوید.

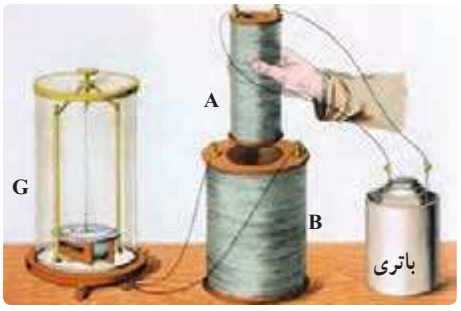
آزمایش ۴ــ۱

هدف: بررسی پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی

وسیله‌های مورد نیاز : گالوانومتر، آهنربای میله‌ای، سیملوله یا پیچه و سیم رابط

شرح آزمایش :

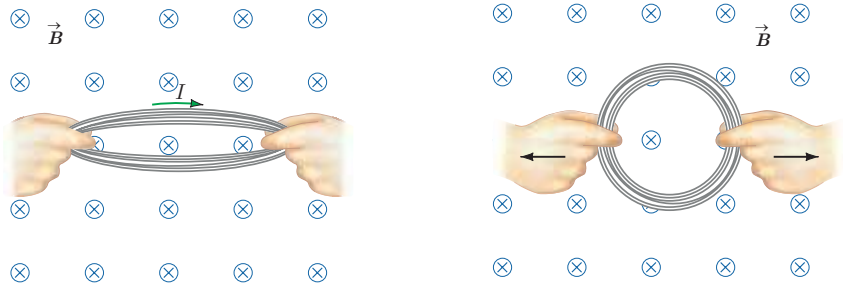
- دو سر سیملوله را به گالوانومتر ببندید.
- یکی از قطب‌های آهنربا را وارد سیملوله کنید (شکل روبه‌رو). مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، یادداشت کنید.
- اکنون آهنربا را از سیملوله خارج کنید. مشاهدات خود را هنگام انجام این کار، دوباره یادداشت کنید.
- مراحل بالا را برای قطب دیگر آهنربا تکرار کنید.
- آزمایش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



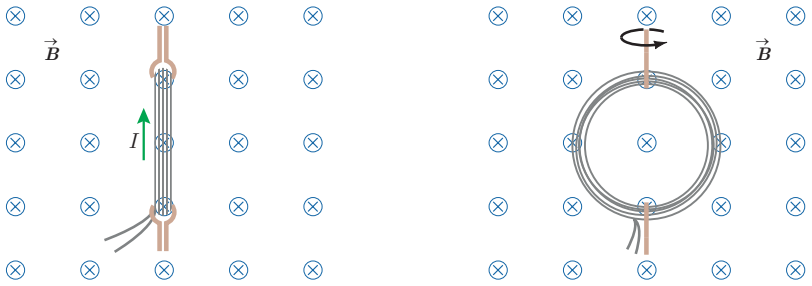
شکل ۴ــ۱ فاراده برای پی بردن به پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی، به جای آهنربای دائمی، از آهنربای الکتریکی (سیملولهٔ A که به باتری وصل شده است) استفاده کرد. فاراده مشاهده کرد که با عبور آهنربا از درون سیملولهٔ B و تغییر میدان مغناطیسی در محل این سیملوله، عقربهٔ گالوانومتر منحرف می‌شود.

در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فاراده دانشمند انگلیسی و تقریباً هم‌زمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۴ــ۱ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربهٔ گالوانومتر منحرف می‌شود و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ درست مانند وقتی که در مدار، باتری وجود دارد (شکل ۴ــ۱). این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند.

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 ۴ــ۲) یا پیچه‌ای را درون میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ بچرخانیم (شکل ۴ــ۳)، مشاهده می‌شود که در هنگام انجام این کارها، جریانی در پیچه القا می‌شود.



شکل ۴ــ۲ تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی $\vec{B}$، جریانی در پیچه القا می‌کند.



شکل ۴ــ۳ با چرخاندن پیچه درون میدان مغناطیسی $\vec{B}$، زاویهٔ بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. این تغییر زاویه سبب القای جریان در پیچه می‌شود.

مایکل فاراده (۱۸۶۷ــ۱۷۹۱)

مایکل فاراده، پسر یک آهنگر انگلیسی بود. به گفتهٔ خود او: «تحصیلات من بسیار معمولی بود. خواندن را کمی بیشتر از حد مقدماتی و نوشتن و ریاضیات را در حد شاگرد یک مدرسهٔ روزانه می‌دانستم. ساعت‌های خارج از مدرسهٔ 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 جلسهٔ سخنرانی سِرهمفری دیوی، شیمی‌دان مشهور (۱۸۲۹ــ۱۷۷۸)، که در مؤسسهٔ سلطنتی لندن برگزار می‌شد، حضور یابد. مؤسسهٔ سلطنتی یک مرکز مهم پژوهش و آموزش علوم بود. فاراده به شدت علاقه‌مند علوم شد و پیش خود به تحصیل علم شیمی پرداخت.

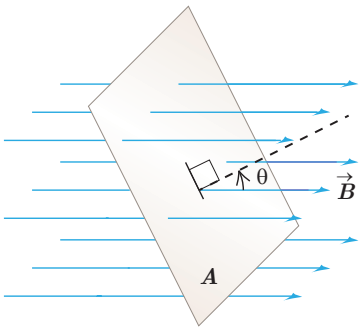
در سال ۱۸۱۳ تقاضای شغلی در مؤسسهٔ سلطنتی کرد و دیوی او را به عنوان یک همکار در امور پژوهشی استخدام کرد. فاراده به زودی نبوغ خود را به عنوان یک آزمایشگر نشان داد. وی مقاله‌های مهمی در شیمی، خواص مغناطیسی، الکتریسیته و نور نوشت و سرانجام به عنوان رئیس مؤسسهٔ سلطنتی برگزیده شد. فاراده را به سبب کشف‌های بسیارش یکی از بزرگ‌ترین دانشمندان تجربی عصر خود می‌دانند.

۴ــ۲ 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 همهٔ این آزمایش‌ها، **تغییر شار مغناطیسی** عبوری از پیچه است.

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

$$\Phi = BA\cos\theta \qquad (۱ــ۴)$$



شکل ۴ــ۴ نیم خط عمود بر سطح، با میدان یکنواخت $\vec{B}$ زاویهٔ θ می‌سازد.

همان‌طور که در شکل ۴ــ۴ دیده می‌شود: θ زاویهٔ 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 ۴ــ۱ داریم: $1\,Wb = 1\,T \times 1\,m^2$

توجه : همواره دو جهت برای رسم نیم‌خط 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 ۴ــ۴، نیم‌خط عمود را در طرفی از سطح رسم کرده‌ایم که زاویهٔ بین آن و جهت میدان $\vec{B}$ کمتر از 90° است و در نتیجه شار عبوری از سطح مثبت می‌شود. اگر نیم‌خط عمود را در طرف دیگر سطح انتخاب کنیم، در این صورت، زاویهٔ آن با جهت میدان $\vec{B}$ بیشتر از 90° خواهد شد و شار عبوری از سطح منفی می‌شود. هر دو انتخاب به یک اندازه مفیدند، ولی در حلّ یک مسئله، همواره باید یکی را انتخاب کنیم و تا پایان آن را تغییر ندهیم. ■

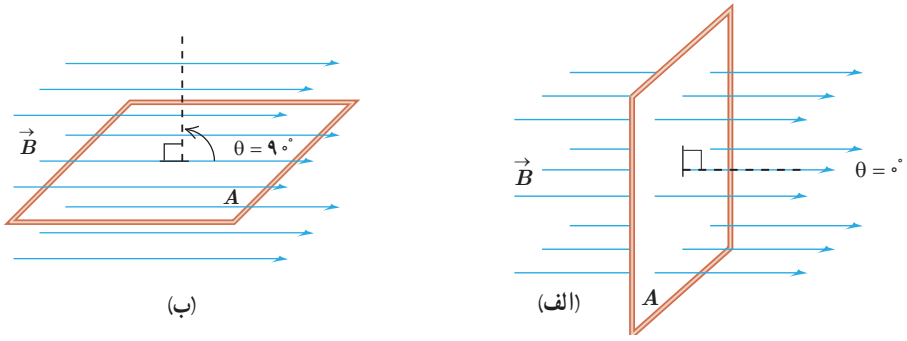
مثال ۴ــ۱

الف) مطابق شکل الف، سطح حلقهٔ رسانایی، به شکل مربع با ضلع ۲۰cm، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی ۲۵۰G قرار دارد. شار عبوری از این حلقه را به‌دست آورید.

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

پ) تغییر شار مغناطیسی عبوری از حلقه را وقتی از موقعیت شکل الف به موقعیت شکل ب می‌چرخد به‌دست آورید.

ت) اگر این تغییر شار مغناطیسی در بازهٔ زمانی $\Delta t = 0/01\,s$ رخ داده باشد آهنگ تغییر شار $(\Delta\Phi/\Delta t)$ را پیدا کنید.



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

$$A = 0/2\,m \times 0/2\,m = 0/04\,m^2 \quad , \quad B = 250\,G = 2/50 \times 10^{-2}\,T \quad , \quad \theta = 0^\circ$$

$$\Phi = BA\cos\theta = (2/50 \times 10^{-2}\,T)(0/04\,m^2)(\cos 0^\circ) = 1 \times 10^{-3}\,Wb = 1\,mWb$$

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

پ) همان‌طور که دیدید شار عبوری از سطح حلقه در وضعیت شکل الف و وضعیت شکل ب، به‌ترتیب، برابر $\Phi_1 = 1\,mWb$ و $\Phi_2 = 0$ است. به این ترتیب، تغییر شار عبوری از سطح حلقه برابر $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -1\,mWb$ می‌شود. علامت منفی نشان می‌دهد در حین چرخش حلقه از وضعیت شکل الف به وضعیت شکل ب، شار مغناطیسی عبوری از سطح آن کاهش یافته است.

ت) با توجه به نتیجهٔ قسمت پ، آهنگ تغییر شار $(\Delta\Phi/\Delta t)$ برابر است با :

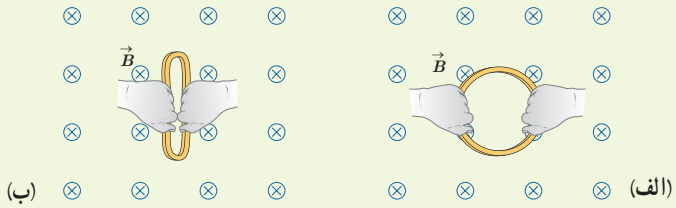
$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{-1 \times 10^{-3}\,Wb}{0/01\,s} = -0/1\,Wb/s$$

تمرین ۴ــ۱

الف) حلقه‌ای به مساحت $25cm^2$ درون میدان مغناطیسی یکنواخت درون سویی به اندازهٔ $0/03T$ 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 $10cm^2$ برسانیم، شار مغناطیسی عبوری از حلقه را در این وضعیت به دست آورید.

پ) اگر این تغییر شار در بازهٔ زمانی $\Delta t = 0/2s$ رخ داده باشد، آهنگ تغییر شار $(\Delta\Phi/\Delta t)$ را پیدا کنید.



پرسش ۴ــ۱

کدام یک از یکاهای زیر معادل یکای وبر بر ثانیه (Wb/s) است؟

☐ V/A ☐ V ☐ A ☐ Ω

اکنون که با تعریف و مفهوم شار مغناطیسی آشنا شدید دوباره نگاهی می‌کنیم به پدیدهٔ 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 محرکهٔ القایی و در نتیجه جریان القایی تولید شده در مدار بیشتر خواهد بود. مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۴ــ۱، ۴ــ۲ و ۴ــ۳ هرچه حرکتی که سبب تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربهٔ گالوانومتر بیشتر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان القایی بزرگ‌تری به‌وجود آمده است.

قانون فاراده برای پیچه یا سیملوله‌ای که از N دور مشابه تشکیل شده باشد با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

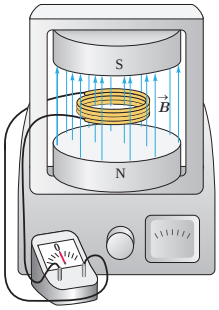
$$\mathscr{E}_{av} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (۴ــ۲)$$

در این رابطه $\mathscr{E}_{av}$ نیروی محرکهٔ القایی متوسط برحسب ولت و $\Delta\Phi/\Delta t$ آهنگ تغییر شار مغناطیسی برحسب وبر بر ثانیه (Wb/s) است. اگر مقاومت پیچه یا سیملوله برابر R باشد، جریان القایی متوسط در آن از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

$$I_{av} = \frac{\mathscr{E}_{av}}{R} \qquad (۴ــ۳)$$

همان‌طور که از رابطهٔ ۴ــ۳ دیده می‌شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار مغناطیسی تغییر می‌کند، بیشتر باشد، جریان کوچک‌تری در آن القا می‌شود.

مثال ۴ــ۲



پیچه‌ای شامل ۲۰۰ دور که مساحت هر حلقهٔ آن $25cm^2$ است، مطابق شکل روبه‌رو بین قطب‌های یک آهنربای الکتریکی قرار گرفته است که میدان مغناطیسی یکنواخت تولید می‌کند. خط‌های میدان بر سطح پیچه عمودند. اگر اندازهٔ میدان در بازهٔ زمانی $2/0ms$ از $0/18T$ به $0/22T$ افزایش یابد،

الف) نیروی محرکهٔ القایی متوسط ایجاد شده در پیچه چقدر است؟

ب) اگر مقاومت پیچه 10Ω باشد، جریان القایی متوسط که از پیچه می‌گذرد چقدر است؟

پاسخ : الف) نیم‌خط عمود بر سطح حلقه‌های پیچه را همسو با $\vec{B}$ می‌گیریم. با توجه به داده‌های مسئله داریم :

$$N=200 \text{ دور} \quad A=25cm^2 \quad \theta=0 \quad \Delta t=2/0ms$$

$$B_1=0/18T \quad B_2=0/22T \quad \mathscr{E}_{av}=?$$

$$\Phi_1=B_1A\cos\theta=(0/18T)(2/5\times10^{-3}m^2)(\cos0^\circ)=4/5\times10^{-4}Wb$$

$$\Phi_2=B_2A\cos\theta=(0/22T)(2/5\times10^{-3}m^2)(\cos0^\circ)=5/5\times10^{-4}Wb$$

به این ترتیب، تغییر شار مغناطیسی برابر است با :

$$\Delta\Phi=\Phi_2-\Phi_1=(5/5\times10^{-4}Wb)-(4/5\times10^{-4}Wb)=1/0\times10^{-4}Wb$$

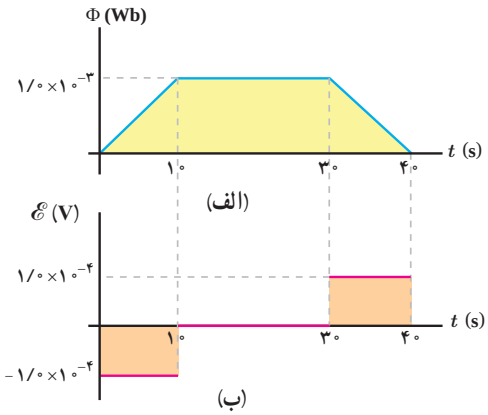
با قرار دادن این مقدار و داده‌های بالا در رابطهٔ ۴ــ۲ داریم :

$$\mathscr{E}_{av}=-N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=-(200)\frac{1/0\times10^{-4}Wb}{2/0\times10^{-3}s}=-10V$$

ب) با توجه به رابطهٔ ۴ــ۳، جریان القایی متوسط در پیچه برابر است با :

$$I_{av}=\frac{\mathscr{E}_{av}}{R}=\frac{-10V}{10\Omega}=-1/0A$$

مثال ۴ــ۳



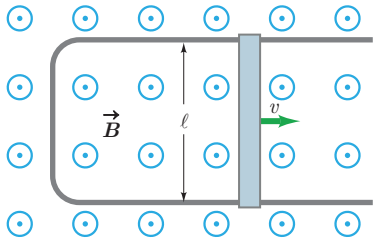
تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در نمودار شکل الف نشان داده شده است. نمودار نیروی محرکهٔ القایی در حلقه را برحسب زمان در هریک از بازه‌های زمانی $(0,10s)$، $(10s,30s)$ و $(30s,40s)$ رسم کنید.

پاسخ : همان‌طور که در نمودار شار مغناطیسی برحسب زمان دیده می‌شود در بازهٔ زمانی صفر تا $10s$ 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 بازهٔ زمانی، نیروی محرکهٔ القایی با نیروی محرکهٔ القایی متوسط برابر است :

$$\mathscr{E}_{av}=-N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=-(1)\frac{(1/0\times10^{-3}Wb-0)}{10s}=-1/0\times10^{-4}V$$

در بازه زمانی $10s$ تا $30s$ شار ثابت مانده است. در نتیجه نیروی محرکهٔ القایی در تمامی لحظات این بازهٔ زمانی برابر صفر است. در بازهٔ زمانی $30s$ تا $40s$ شار به صورت خطی کاهش یافته و سرانجام صفر شده است. بنابراین شبیه آنچه در مورد بازهٔ زمانی صفر تا $10s$ گفتیم، نیروی محرکهٔ القایی در تمام لحظات این بازه با مقدار متوسط نیروی محرکه در این بازهٔ زمانی برابر و مساوی $1/0\times10^{-4}V$است. نمودار نیروی محرکهٔ القایی برحسب زمان در شکل ب رسم شده است.

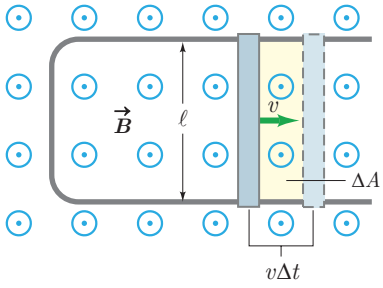
مثال ۴ـ۴



شکل روبه‌رو، رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ به اندازهٔ ۰/۱۸T نشان می‌دهد. میدان $\vec{B}$ عمود بر صفحهٔ شکل و رو به بیرون است. میله‌ای فلزی (سیم لغزنده) به طول $\ell = ۲۰\,cm$ بین دو بازوی رسانا قرار دارد و مداری را تشکیل می‌دهد. میله را با تندی ثابت $v = ۲۰\,m/s$ به‌طرف راست حرکت می‌دهیم. بزرگی نیروی محرکهٔ القایی متوسط را پیدا کنید.

پاسخ : با حرکت میلهٔ فلزی و به‌دلیل افزایش سطح حلقه، شار مغناطیسی تغییر می‌کند. میدان مغناطیسی در سطح حلقه یکنواخت است، پس شار مغناطیسی را از رابطهٔ $\Phi = BA\cos\theta$ محاسبه می‌کنیم. نیم‌خط عمود بر سطح حلقه را همسو با $\vec{B}$ می‌گیریم. بنابراین زاویهٔ نیم‌خط عمود با میدان $\vec{B}$ صفر است ($\theta = ۰$) و در نتیجه $\Phi = BA$. از قانون القای فارادی داریم :

$$\mathscr{E}_{av} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = -B\frac{\Delta A}{\Delta t}$$



برای محاسبهٔ $\Delta A/\Delta t$، توجه کنید که میلهٔ 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 محرکهٔ القا شده برابر است با :

$$\mathscr{E}_{av} = -B\frac{\ell v\Delta t}{\Delta t} = -B\ell v$$

با قرار دادن مقادیر داده شده، در رابطهٔ بالا، داریم :

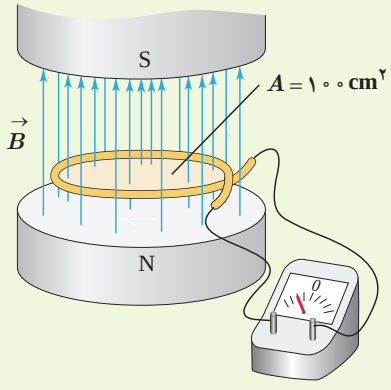
$$\mathscr{E}_{av} = -(۰/۱۸T)(۲۰\times۱۰^{-۲}m)(۲۰\,m/s) = -۰/۷۲V$$

و بزرگی آن برابر است با :

$$|\mathscr{E}_{av}| = ۰/۷۲V$$

توجه کنید که به علت ثابت بودن تندی میلهٔ لغزنده، نیروی محرکهٔ القایی ثابت است. در این حالت، رسانای U شکل با سیم لغزنده یک مولد جریان مستقیم است.

تمرین ۴ـ۲



میدان مغناطیسی بین قطب‌های آهنربای الکتریکی شکل روبه‌رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می‌کند و در مدت ۰/۴۵s از ۰/۲۸T، رو به بالا، به ۰/۱۷T، رو به پایین می‌رسد. در این مدت،

الف) نیروی محرکهٔ القایی متوسط در حلقه را به‌دست آورید.

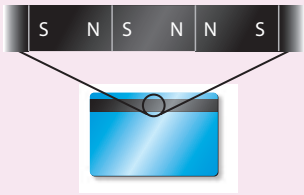
ب) اگر مقاومت حلقه ۱۰Ω باشد، جریان القایی متوسط در حلقه را پیدا کنید.

پرسش ۴ـ۲

تندی‌سنج 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 تندی‌سنج (که در واقع نوعی رایانهٔ کوچک است) وصل شده است. به نظر شما تندی‌سنج 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 کارت‌خوان

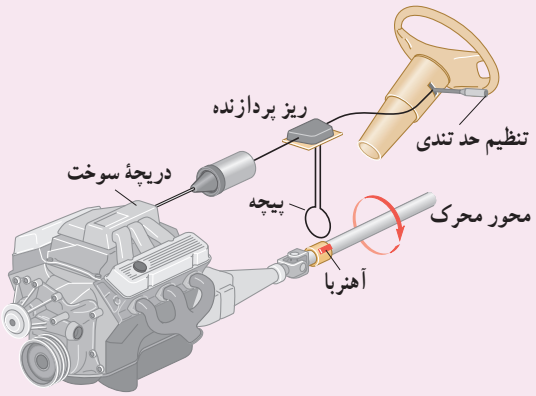


(الف) داده‌ها را به‌صورت صفر و یک در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می‌کنند.

(ب) کشیدن کارت، جریان اندکی در پیچهٔ دستگاه کارت‌خوان القا می‌کند.

نوار مغناطیسی پشت کارت‌های اعتباری حاوی تعداد بسیار زیادی ذرهٔ فرومغناطیسی است که نوعی چسب خاص آنها را به هم متصل می‌کند. داده‌ها را که به‌صورت دودویی، یا صفر و یک به رمز درآورده‌اند، در نوار مغناطیسی پشت کارت ذخیره می‌کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری درون دستگاه کارت‌خوان کشیده می‌شود، میدان مغناطیسی ناشی از نوار مغناطیسی، روی پیچهٔ قرار داده شده در دستگاه کارت‌خوان 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.

سامانهٔ تنظیم حد تندی خودرو[1]



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[2] را در هر ثانیه می‌شمارد و به این روش، تندی خودرو را اندازه می‌گیرد. سپس با مقایسهٔ 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.

۱ـ Cruise Control Speed Limit System

۲ـ Current pulses

خوب است بدانید: معاینهٔ مغز با نیروهای محرکهٔ القایی

برانگیزش (تحریک) مغناطیسی فرا جمجمه‌ای (TMS)[1] 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 محرکهٔ القایی و جریان القایی در ناحیه‌ای از مغز می‌شود که در زیر پیچه قرار دارد. پزشک با مشاهدهٔ واکنش مغز (مثلاً اینکه کدام عضله‌ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می‌کنند) می‌تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بیازماید.

۴ــ۳ قانون لنز

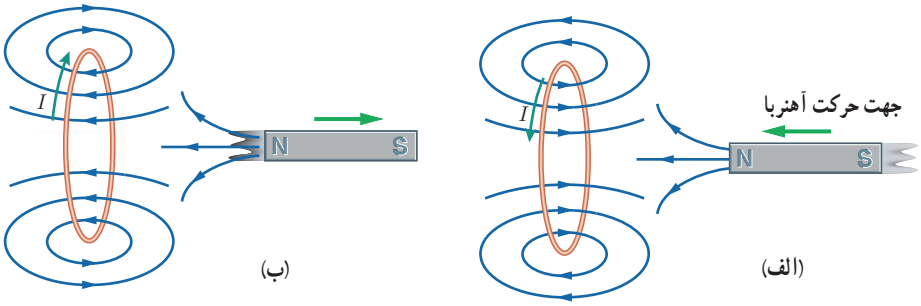
مدت کوتاهی پس از آنکه فاراده قانون القای الکترومغناطیسی را ارائه کرد، هاینریش لِنز، دانشمند روس تبار، در سال ۱۸۳۴ میلادی روشی را برای تعیین جهت جریان القایی در یک پیچه یا در هر مدار بستهٔ دیگری پیشنهاد کرد. این روش که بعدها به قانون لنز شهرت یافت، حاکی از آن است که :

جریان حاصل از نیروی محرکهٔ القایی در یک مدار یا پیچه در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن، با عامل به وجود آورندهٔ جریان القایی، یعنی تغییر شار مغناطیسی، مخالفت می‌کند.

علامت منفی در رابطهٔ ۴ــ۲ نشان دهندهٔ 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 ۴ــ۵ الف، آهنربایی را نشان می‌دهد که قطب N آن در حال نزدیک شدن به یک حلقهٔ رساناست. در این وضعیت اندازهٔ $\vec{B}$ در محل حلقه افزایش می‌یابد و در نتیجه شار گذرنده از حلقه زیاد می‌شود. بنا به قانون لنز، جهت جریان القایی ایجاد شده در حلقه چنان است که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مخالفت کند. بنابراین، میدان مغناطیسی حلقه در خلاف سوی میدان مغناطیسی آهنربا می‌شود. با توجه به قاعدهٔ دست راست و از روی جهت میدان مغناطیسی حلقه، جهت جریان در حلقه تعیین می‌شود. همچنین اگر مطابق شکل ۴ــ۵ ب، قطب N آهنربا را از حلقهٔ رسانا دور کنیم، جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، همسو با میدان آهنربا می‌شود و به‌این ترتیب با کاهش شار عبوری از حلقه، مخالفت می‌کند.

هاینریش فردریش امیل لِنز (۱۸۶۵-۱۸۰۴) از فیزیک‌دانان مشهور آلمانی و دارای تبار روس بود. وی در استونی که در آن دوران تحت امپراتوری روسیه بود به دنیا آمد. پس از اتمام دوره دبیرستان در ۱۸۲۰ وارد دانشگاه دُرپَت شد و به تحصیل در زمینهٔ فیزیک و شیمی پرداخت. لنز طی سال‌های ۱۸۲۳ تا ۱۸۲۶، در ضمن یک سفر دریایی به دور دنیا، به مطالعهٔ شرایط آب و هوایی و همچنین ویژگی‌های فیزیک دریا پرداخت و نتایج آن را در سال ۱۸۳۱ منتشر کرد. پس از این سفر، در دانشگاه سن پترزبورگ آغاز به کار نمود. لنز مطالعهٔ الکترومغناطیس را در سال ۱۸۳۱ شروع کرد و بیشتر شهرتش برای فرمول‌بندی قانون لنز در الکترومغناطیس در سال ۱۸۳۴ است.



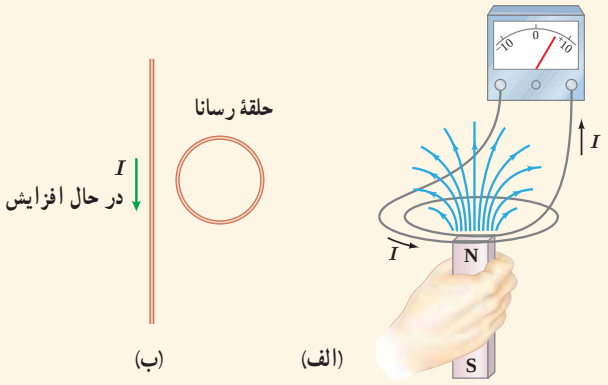
شکل ۴ــ۵ الف) وقتی آهنربا به حلقهٔ رسانا نزدیک می‌شود جریان در جهتی در حلقه القا می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با افزایش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند. ب) با دور شدن آهنربا از حلقهٔ رسانا، جریان در جهتی در حلقه القا می‌شود که میدان مغناطیسی ناشی از آن با کاهش شار مغناطیسی حلقه مخالفت کند.

۱ــ Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)

پرسش ۴ـ۳

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 حلقهٔ رسانای مجاور سیم تعیین کنید.



خوب است بدانید: اثر دیامغناطیس

چرخش هر الکترون به دور هستهٔ اتم را می‌توان به صورت یک حلقهٔ 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 همهٔ 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.

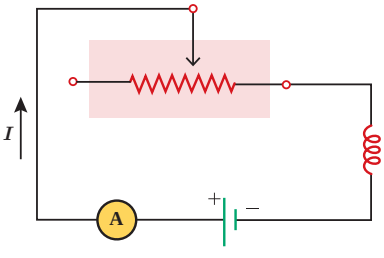
۴ـ۴ القاگرها

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 (سیم‌پیچ) برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیرهٔ انرژی در این میدان استفاده کرد. القاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای الکترونیکی است.

شکل ۴ـ۶ تصویر چند القاگر را در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت نشان می‌دهد. نماد مداری القاگر، —ooo— است.

شکل ۴ـ۶ تصویری از چند القاگر در اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت

خود ــ القاوری : مداری را مطابق شکل ۴ـ۷ درنظر بگیرید. این مدار شامل منبع نیروی محرکه، رئوستا، آمپرسنج و القاگری است که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان در مدار تغییر می‌کند. تغییر جریان در مدار، سبب تغییر میدان مغناطیسی القاگر می‌شود و درنتیجه 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 ــ القاوری نامیده می‌شود.



شکل ۴ـ۷ مداری ساده شامل رئوستا، القاگر، باتری و آمپرسنج

آزمایش ۴ــ۲

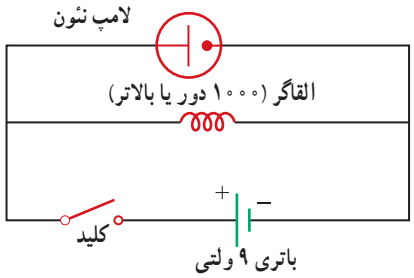
هدف: بررسی اثر خود ــ القاوری

وسیله‌های مورد نیاز : لامپ نئون (لامپ فازمتری)، القاگر(۱۰۰۰ دور یا بالاتر)، باتری قلمی (۲ عدد) یا باتری ۹ ولتی، سیم رابط، کلید

شرح آزمایش :

- مداری مطابق شکل الف ببندید.
- کلید را وصل کنید. آیا لامپ روشن است؟ اینک کلید را قطع کنید. در لحظهٔ 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.



(الف)

(ب)

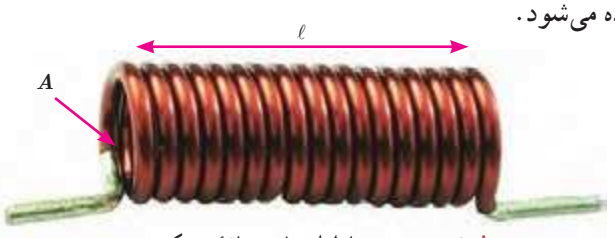
خوب است بدانید: کاربرد القاگرها در سامانه‌های انتقال برق

برخورد آذرخش به بخشی از یک سامانهٔ انتقال توان الکتریکی موجب افزایش ناگهانی ولتاژ می‌شود که می‌تواند به اجزای سامانه و هر چیز دیگری که به آن وصل باشد (برای مثال، وسیله‌های برقی خانگی) آسیب برساند. برای کمینه کردن این آثار، القاگرهای بزرگی را در مسیر سامانهٔ انتقال قرار می‌دهند. این کار باعث می‌شود که القاگر با هر تغییر سریع در جریان مخالفت کند و آن را فرو نشاند!

ضریب القاوری : ویژگی‌های فیزیکی هر القاگر، توسط ضریب القاوری آن تعیین می‌شود. ضریب القاوری که با نماد L نمایش داده می‌شود به عواملی همچون تعداد دور، طول و سطح مقطع القاگر و جنس هسته‌ای که داخل آن قرار می‌گیرد بستگی دارد. برای مثال، ضریب القاوری سیملوله‌ای آرمانی و بدون هسته، که دارای طول ℓ، سطح مقطع A و N حلقهٔ نزدیک به هم است (شکل ۴ــ ۸)، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$L = \mu_0 \frac{AN^2}{\ell} \qquad (۴ــ۴)$$

یکای SI ضریب القاوری، اهم.ثانیه (Ω.s) است که به احترام جوزف هانری، هانری نامیده و با نماد H نشان داده می‌شود.



شکل ۴ــ ۸ سیملوله‌ای با N حلقهٔ نزدیک به هم

جوزف هانری (۱۸۷۸ــ۱۷۹۷) : 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. هانری در سال ۱۸۳۱، هم‌زمان و مستقل از فاراده، موفق به کشف پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی شد. وی همچنین توانست نوعی موتور الکترومغناطیسی و یک تلگراف جدید و کارآمد اختراع کند. یکای SI ضریب القاوری به احترام یک عمر فعالیت های علمی وی، هانری (H) انتخاب شده است.

مثال ۴ــ۵

ضریب القاوری سیملولهٔ آرمانی بدون هسته‌ای به طول ۶۲/۸cm و سطح مقطع ۱۰cm^۲ را پیدا کنید که شامل ۲۰۰۰ حلقهٔ نزدیک به هم است.

پاسخ : با توجه به داده‌های مسئله داریم :

$A=۱۰\text{cm}^۲ \qquad \ell = ۶۲/۸\text{cm} \qquad N= ۲۰۰۰ \text{ دور} \qquad L = ?$

با قراردادن مقادیر بالا در رابطهٔ ۴ــ۴ داریم :

$$L = \mu_۰\frac{AN^۲}{\ell} = (۴\pi\times ۱۰^{-۷}\text{T.m/A})\frac{(۱۰\times ۱۰^{-۴}m^۲)(۲۰۰۰)^۲}{۰/۶۲۸\text{m}} = ۸/۰\times ۱۰^{-۳}\text{H} = ۸/۰\text{mH}$$

تمرین ۴ــ۳

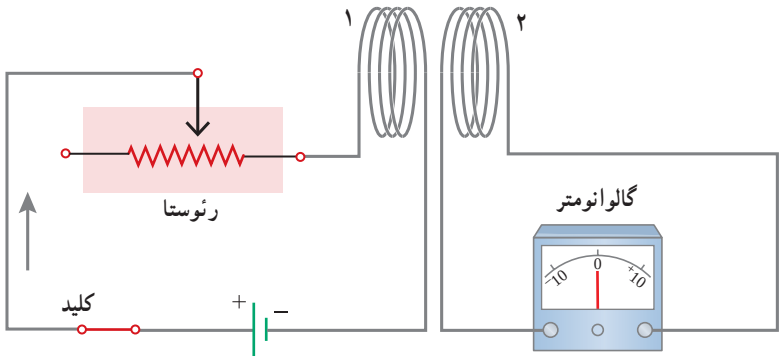
۱ــ تعداد حلقه‌های سیملوله‌ای بدون هسته، به طول ۲/۸cm و سطح ۱۰cm^۲ چه تعداد باشد تا ضریب القاوری آن ۱H شود؟

۲ــ دو سیملولهٔ بدون هسته با سطح مقطع و تعداد دور یکسان را در نظر بگیرید. اگر طول یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، ضریب القاوری‌اش چند برابر دیگری است؟

خوب است بدانید: کاربرد القاگرها در لامپ‌های فلوئورسان

همان‌طور که در ابتدای این بخش دیدیم القاگرها با تغییرات سریع جریان در مدار مخالفت می‌کنند، به همین دلیل نقش مهمی در لامپ‌های فلوئورسان (مهتابی) دارند. در این لامپ‌ها، جریان الکتریکی از گاز رقیقی که فضای درون لامپ را پر کرده است می‌گذرد و گاز را یونیده و به پلاسما تبدیل می‌کند. پلاسما یک رسانای غیراهمی است و هرچه بیشتر یونیده شود مقاومت آن کمتر می‌شود. اگر ولتاژ به حدّ کافی بالایی به گاز اعمال شود، جریان می‌تواند بسیار زیاد شود و به مدار بیرونی لامپ فلوئورسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر را به طور متوالی با لامپ فلوئورسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل کننده همچنین باعث می‌شود تا لامپ فلوئورسان بتواند با ولتاژ متناوب کار کند.

القای متقابل : شکل ۴ــ۹ اسباب آزمایش ساده‌ای را برای بررسی اثر القای متقابل نشان می‌دهد. جریان عبوری از پیچهٔ ۱، میدان مغناطیسی $\vec{B}$ را به وجود می‌آورد. این میدان $\vec{B}$، شار مغناطیسی‌ای را از پیچهٔ ۲ می‌گذراند که در مجاورت آن قرار دارد. با تغییر دادن مقاومت رئوستا و تغییر جریان در پیچهٔ ۱، میدان مغناطیسی پیچهٔ ۱ و در نتیجه شار عبوری از پیچهٔ ۲ نیز تغییر می‌کند؛ بنابر قانون فاراده،



شکل ۴ــ۹ با تغییر مقاومت رئوستا و تغییر جریان عبوری از پیچهٔ ۱ شار عبوری از پیچهٔ ۲ نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار، سبب ایجاد نیروی محرکهٔ القایی در پیچهٔ ۲ می‌شود. هم‌زمان تغییر جریان در پیچهٔ ۲، سبب ایجاد نیروی محرکهٔ القایی در پیچهٔ ۱ می‌گردد.

این تغییر شار، نیروی محرکه‌ای را در پیچهٔ ۲ القا می‌کند که به ایجاد جریان القایی در این پیچه می‌انجامد. همچنین تغییر جریان در پیچهٔ ۲، سبب ایجاد نیروی محرکهٔ القایی در پیچهٔ ۱ می‌شود. این فرایند، **القای متقابل** نامیده می‌شود و به کمک آن می‌توان انرژی را از یک پیچه، به پیچهٔ دیگر منتقل کرد.

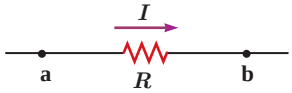
شکل ۴ــ ۱۰ برای به حداقل رساندن اثر القای متقابل در برخی از مدارهای الکتریکی، القاگرهای مجاور را به گونه‌ای قرار می‌دهند که سطح حلقه‌های آنها بر یکدیگر عمود باشد.

در برخی از مدارهایی که از چندین القاگر به وجود آمده است، تغییرات جریان در یک القاگر می‌تواند نیروهای محرکهٔ 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 ۴ــ۱۰). در این صورت، اثر القای متقابل تا حد امکان کوچک می‌شود. القای متقابل کاربردهای مفید بسیاری نیز دارد. مثلاً در مبدّل‌ها که در پایان همین فصل با آنها آشنا خواهید شد، القای متقابل، نقش مهمی در مقدار ولتاژ خروجی مبدل ایفا می‌کند.

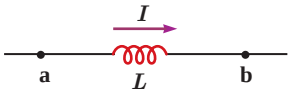
انرژی ذخیره شده در القاگر : وقتی توسط باتری جریانی در القاگر برقرار شود، مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی در مقاومت الکتریکی سیم‌های القاگر به صورت گرما تلف و بقیهٔ آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در میدان القاگر با ضریب القاوری L، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$U=\frac{1}{2}LI^2 \qquad (۴ــ۵)$$

مقاومت با جریان I : انرژی تلف شده است.



القاگر با جریان I : انرژی ذخیره شده است.



شکل ۴ــ۱۱ 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.

لازم است رفتار مقاومت و القاگر را به لحاظ انرژی اشتباه نگیرید (شکل ۴ــ۱۱). 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؛ درحالی 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 ۴ــ۶

متخصصان صنعت برق، علاقه‌مندند راه‌های مؤثری را برای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی در ساعت‌های کم‌مصرف (کم‌باری) بیابند تا با استفاده از آن، نیاز مشترکان را در ساعت‌های پرمصرف (اوج بار) تأمین کنند. یک ایدهٔ فرضی، استفاده از یک القاگر بزرگ است. ضریب القاوری این القاگر چقدر باشد تا بتواند ۱/۰kWh انرژی الکتریکی را در پیچهٔ حامل جریان ۲۰۰A ذخیره کند؟

پاسخ : مقدار انرژی ذخیره شدهٔ مورد نیاز $U=$ ۱/۰kWh و جریان $I=$۲۰۰A داده شده است. از معادلهٔ ۴ــ ۵ ضریب القاوری را به‌دست می‌آوریم :

$$U=۱/۰\ \text{kWh}=(۱/۰\times۱۰^۳\text{W})(۳۶۰۰\text{s})=۳/۶\times۱۰^۶\text{J}$$

$$U=\frac{1}{2}LI^2\Rightarrow L=\frac{2U}{I^2}=\frac{2(۳/۶\times۱۰^۶\text{J})}{(۲۰۰\text{A})^2}=۱/۸\times۱۰^۲\text{H}$$

همان‌طور که نتیجهٔ صفحهٔ قبل نشان می‌دهد ضریب القاوری لازم، بسیار بیشتر از ضریب القاوری یک القاگر معمولی (در حد میلی‌هانری) است که در آزمایشگاه از آن استفاده می‌کنیم. افزون بر این همان‌طور که در فصل ۲ دیدیم سیم‌های معمولی که بتوانند جریان ۲۰۰A را از خود عبور دهند باید قطر بسیار بزرگی داشته باشند. درنتیجه اندازهٔ یک القاگر ۱۸۰H که از سیم‌های معمولی ساخته شده باشد و بتواند چنین جریانی را تحمل کند باید خیلی بزرگ (به اندازهٔ یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فنّاوری‌های موجود این ایده، غیرعملی است و توجیه اقتصادی ندارد.

تمرین ۴ــ۴

سیملولهٔ آرمانی بدون هسته‌ای به طول ۲۲cm و با حلقه‌هایی به مساحت ۰/۴۴cm^2 ، شامل $N=2000$ حلقهٔ نزدیک به هم است و جریان ۱/۷A از آن می‌گذرد. ضریب القاوری و انرژی ذخیره شده در سیملوله را حساب کنید.

فنّاوری و کاربرد: انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو

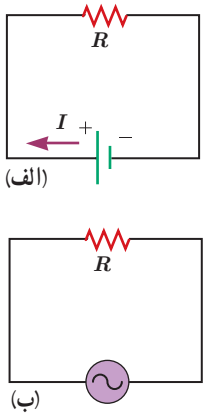
انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه‌های احتراق خودروهای با موتور بنزینی دارد. پیچهٔ اولیه با حدود ۲۵۰ دور به باتری خودرو بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی‌ای تولید می‌کند. این پیچه، درون یک پیچهٔ ثانویه با ۲۵۰۰ دور سیم خیلی نازک قرار گرفته است. برای جرقه زدن شمع، جریان در پیچهٔ اولیه قطع می‌شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر می‌رسد و نیروی محرکهٔ الکتریکی ده‌ها هزار ولتی در پیچهٔ ثانویه القا می‌کند. درنتیجه انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی همراه با جریانی لحظه‌ای از پیچهٔ ثانویه به طرف شمع می‌رود و جرقه‌ای تولید می‌کند که سبب احتراق مخلوط سوخت و هوا در سیلندرهای موتور می‌شود (شکل روبه‌رو).

انرژی لازم برای جرقه زدن شمع خودرو، از انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی پیچهٔ احتراق تأمین می‌شود.

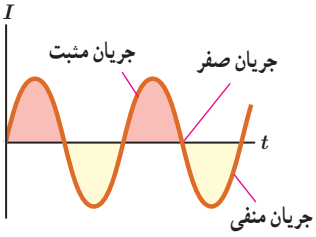
۴ــ۵ جریان متناوب

در اواخر قرن نوزدهم، بحث‌های داغی بین توماس ادیسون و جورج وستینگهاوس دربارهٔ بهترین روش انتقال انرژی الکتریکی از محل تولید تا محل مصرف صورت گرفت. ادیسون موافق جریان مستقیم (dc) بود، در حالی که وستینگهاوس از جریان متناوب (ac) حمایت می‌کرد. سرانجام، وستینگهاوس پیروز شد و پس از آن سامانه‌های انتقال و توزیع برق و بیشتر وسایل خانگی با جریان متناوب به کار افتادند.

شکل ۴ــ۱۲ دو مدار سادهٔ جریان مستقیم و جریان متناوب را نشان می‌دهد. همان‌طورکه می‌بینید جهت جریان در مدار جریان مستقیم معیّن است، درحالی که در مدار جریان متناوب، به دلیل تغییر جهت جریان با گذشت زمان، نمی‌توان جهت معینی را برای جریان در نظر گرفت. تمامی نیروگاه‌های تولید برق در دنیا و از جمله ایران، جریان متناوب تولید می‌کنند که تابعی سینوسی از زمان است و به همین دلیل، جریان متناوب سینوسی نامیده می‌شود (شکل ۴ــ۱۳).



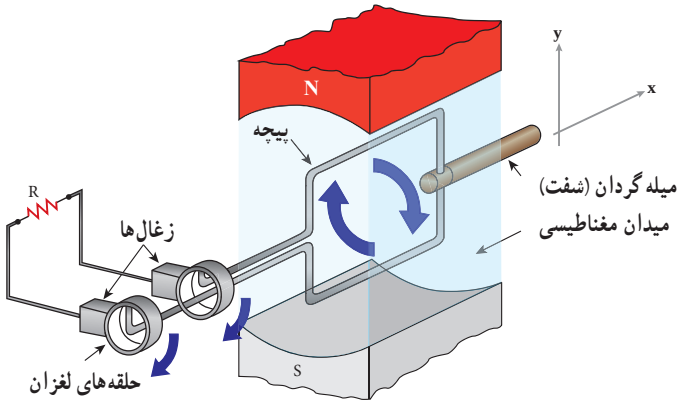
شکل ۴ــ۱۲ الف) مدار سادهٔ جریان مستقیم، که در آن جریان با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. ب) مدار سادهٔ جریان متناوب، که در آن ولتاژ و جریان با گذشت زمان به طور سینوسی تغییر می‌کنند.



شکل ۴ـ۱۳ 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 محرکهٔ القایی باید شار عبوری از پیچه تغییر کند. همچنین دیدیم که در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت، شاری که از پیچه می‌گذرد از رابطهٔ $\Phi = BA\cos\theta$ محاسبه می‌شود که در آن θ زاویهٔ بین نیم‌خط عمود بر سطح حلقه‌های پیچه و میدان مغناطیسی است.

رایج‌ترین روش برای تغییر شار و در نتیجه تولید جریان القایی، تغییر زاویهٔ θ است. شکل ۴ـ۱۴ پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت دور محور x بچرخد.



شکل ۴ـ۱۴ اجزای یک مولّد (ژنراتور) جریان متناوب. حرکت مکانیکی از طریق میله گردان، سبب چرخیدن پیچه در میدان مغناطیسی می‌شود و جریان متناوبی را در مدار به وجود می‌آورد.

هر دور چرخش پیچه، معادل 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. درنتیجه 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 لحظهٔ t از پیچه می‌گذرد برابر است با

$$\Phi = BA\cos\frac{2\pi}{T}t$$

به کمک قانون فاراده می‌توان نشان داد نیروی محرکهٔ القایی در پیچه در لحظهٔ t از رابطه زیر به‌دست می‌آید[1] :

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_m \sin\frac{2\pi}{T}t \qquad (۶ـ۴)$$

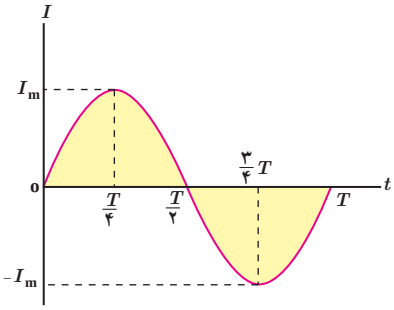
که در آن $\mathscr{E}_m$ بیشینهٔ مقدار نیروی محرکهٔ القایی در پیچه است. این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکهٔ القا شده به‌طور دوره‌ای نسبت به زمان تغییر می‌کند.

۱ـ اثبات این رابطه، خارج از اهداف برنامه درسی این کتاب است.

اگر مقاومت کل مدار پیچه برابر R باشد، با توجه به رابطه $I=\mathscr{E}/R$، جریانی که در پیچه القا می‌شود برابر است با :

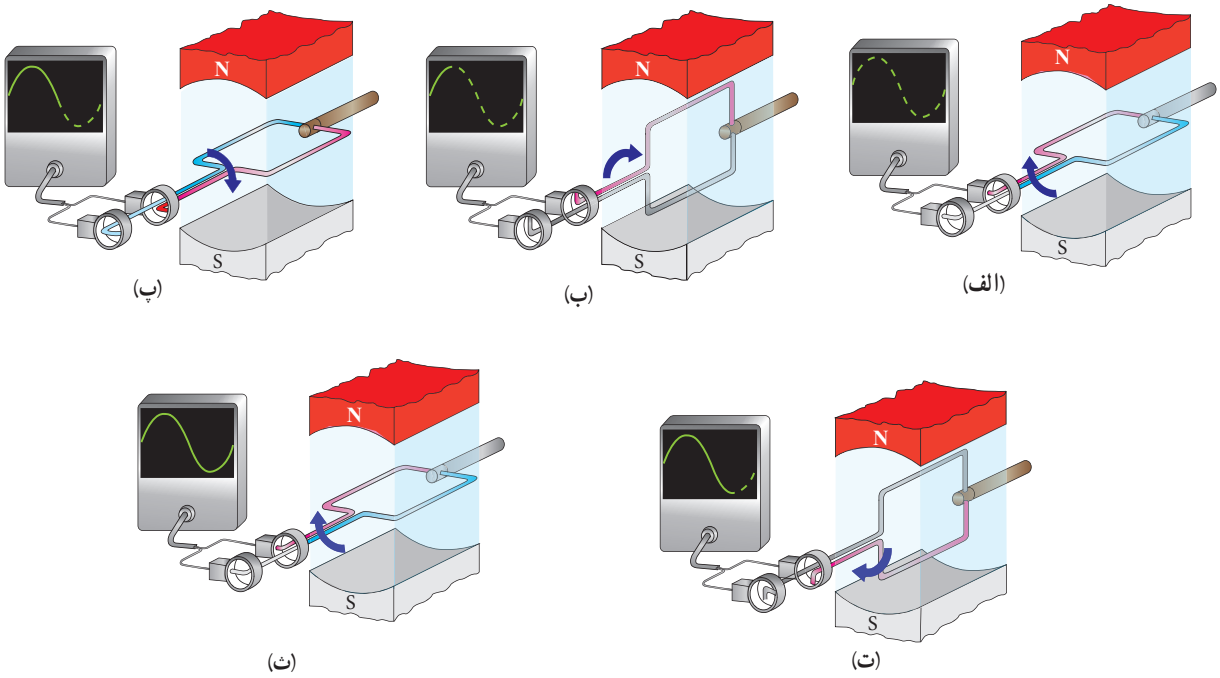
$$I = I_m \sin\frac{2\pi}{T}t \qquad (۴ـ۷)$$

در این رابطه I_m بیشینهٔ جریان القا شده در پیچه و برابر $I_m=\mathscr{E}_m/R$ است. رابطهٔ ۴ـ۷ همچنین نشان می‌دهد که جریان القایی در پیچه، به‌طور سینوسی تغییر می‌کند، به‌همین سبب به آن **جریان متناوب** می‌گویند. نمودار این جریان برحسب زمان، در یک دوره در شکل ۴ـ۱۵ رسم شده است.



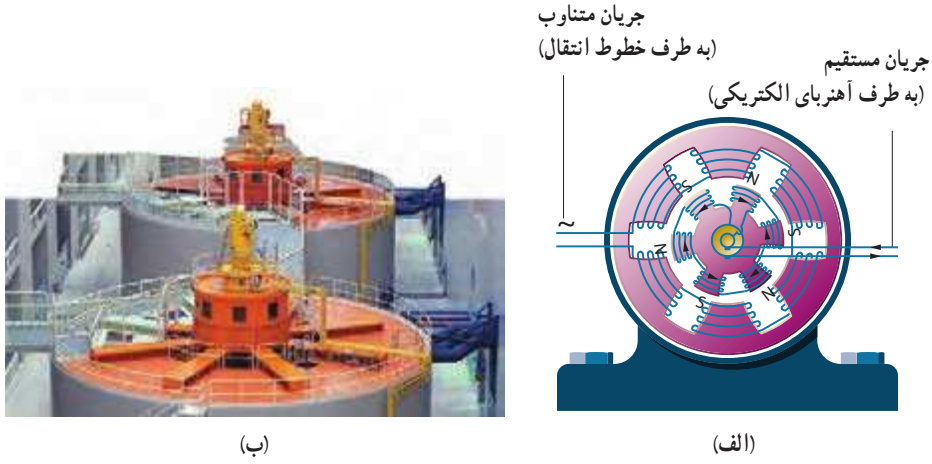
شکل ۴ـ ۱۵ نمودار جریان متناوب سینوسی در یک دوره

شکل ۴ـ۱۶ تولید جریان متناوب سینوسی در مدت یک دوره را نشان می‌دهد. در $t=0$ سطح پیچه بر خطوط میدان مغناطیسی عمود است و جریانی در مدار وجود ندارد (شکل ۴ـ۱۶الف). پیچه یک چهارم دور می‌چرخد تا در وضعیت شکل ۴ـ۱۶ ب قرار گیرد. در حین این چرخش، شار عبوری از پیچه تغییر می‌کند و جریان از صفر به مقدار بیشینه مثبت می‌رسد (ربع اوّل چرخش). پیچه به چرخیدن ادامه می‌دهد تا در وضعیت شکل ۴ـ۱۶ پ قرار گیرد. درنتیجه جریان از مقدار بیشینه مثبت به صفر می‌رسد (ربع دوم چرخش). پس از آن پیچه از وضعیت شکل ۴ـ۱۶ پ به وضعیت شکل ۴ـ۱۶ ت می‌رسد. در حین این چرخش، جریان از صفر به مقدار بیشینه منفی می‌رسد (ربع سوم چرخش). سرانجام پیچه یک ربع دور دیگر می‌چرخد و به این ترتیب یک چرخهٔ کامل را طی می‌کند و به وضعیت شکل ۴ـ۱۶ ث می‌رسد و درنتیجه جریان از مقدار بیشینه منفی به صفر می‌رسد. این حرکت به‌طور متناوب (پی‌درپی) توسط پیچه ادامه می‌یابد و جریان متناوب تولید می‌شود.



شکل ۴ـ۱۶ تولید جریان متناوب سینوسی در یک چرخش کامل

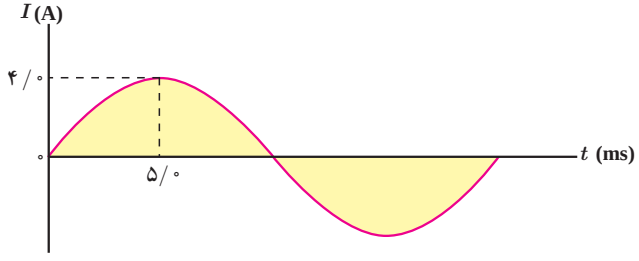
در نیروگاه‌های تولید برق، برای تولید جریان متناوب از مولدهای خاصی استفاده می‌شود که به آنها مولدهای صنعتی جریان متناوب می‌گویند. در مولدهای صنعتی پیچه‌ها ساکن‌اند و آهنربای الکتریکی در آنها می‌چرخد (شکل ۴ــ۱۷). در نیروگاه‌های تولید برق در ایران، آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، ۵۰ دور درون پیچه می‌چرخد. این کمیت را بسامد برق تولید شده می‌نامند و به‌صورت ۵۰Hz بیان می‌کنند. یکای SI بسامد s^{-1} یا Hz (هرتز) است.



شکل ۴ــ۱۷ الف) در مولدهای صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچه‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود. ب) نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق.

مثال ۴ــ۷

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 ۵/۰ ms طی شده است، دوره تناوب برابر $T = ۲۰ ms$ است. همچنین با توجه به نمودار، بیشینهٔ جریان $I_m = ۴/۰ A$ است. در نتیجه از رابطهٔ ۴ــ۷ داریم :

$$I = I_m \sin \frac{۲\pi}{T} t = (۴/۰ A) \sin \left(\frac{۲\pi}{۲۰ \times ۱۰^{-۳} s}\right) t = ۴/۰ \sin ۱۰۰ \pi t$$

نتیجهٔ نهایی برحسب یکاهای SI نوشته شده است.

تمرین ۴ــ۵

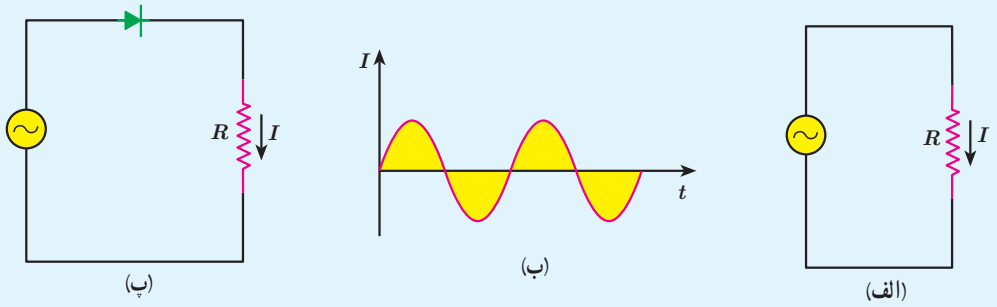
معادلهٔ جریان ــ زمان یک مولد جریان متناوب برحسب یکاهای SI به‌صورت $I = (۴/۰ \times ۱۰^{-۳}) \sin ۲۵۰ \pi t$ است.

الف) جریان در دو لحظهٔ $t_۱ = ۲/۰ ms$ و $t_۲ = ۸/۰ ms$ چقدر است؟

ب) دورهٔ تناوب جریان را به‌دست آورید و نمودار جریان ــ زمان را در یک دورهٔ کامل رسم کنید.

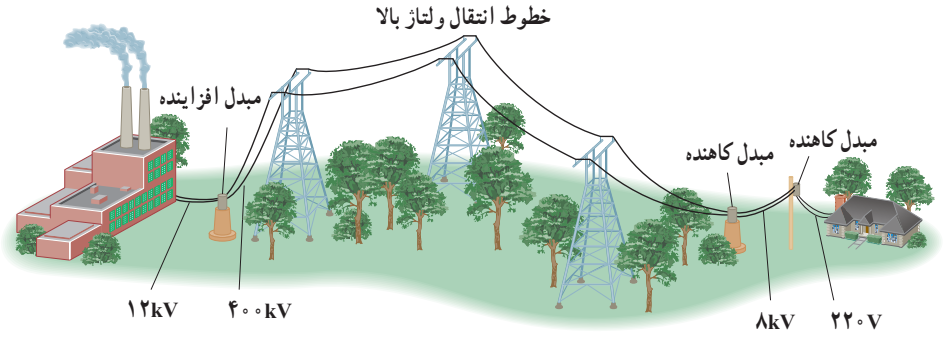
فعالیت ۴ـ۱

در فصل ۲ دیدیم که دیود جریان را در یک جهت از خود عبور می‌دهد و در جهت دیگر مانع عبور جریان می‌شود. به‌همین دلیل آن را یکسوکنندهٔ 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.

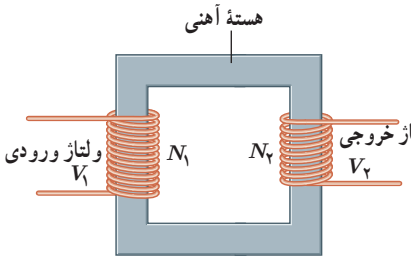


مبدل‌ها : یکی از مزیت‌های مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان‌تر از dc است. برای انتقال توان الکتریکی در فاصله‌های دور، تا جایی که امکان دارد باید از ولتاژهای بالا و جریان‌های کم استفاده کنیم. این کار اتلاف توان را در خط‌های انتقال کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به کاهش جریان می‌توان از سیم‌های نازک‌تری استفاده و در مصرف مواد اوّلیهٔ ساخت سیم صرفه‌جویی کرد.

خط‌های انتقال توان الکتریکی به طور معمول از ولتاژهایی در حدود ۴۰۰ kV استفاده می‌کنند (شکل ۴ـ۱۸). 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 ۲۲۰ V است. تبدیل ولتاژ مورد نیاز با استفاده از مبدل‌ها صورت می‌گیرد.



شکل ۴ـ۱۸ قبل از انتقال توان الکتریکی از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزاینده، ولتاژ را تا حدود ۴۰۰ kV افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا توان الکتریکی با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.

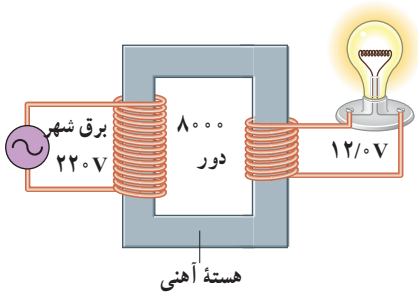


شکل ۴ـ۱۹ یک مبدل آرمانی شامل دو پیچه که روی یک هستهٔ آهنی پیچیده شده‌اند.

شکل ۴ـ۱۹ مبدلی شامل دو پیچه با تعداد دورهای متفاوت را نشان می‌دهد که دور یک هستهٔ 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[1]. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچه‌های آن ناچیز است، رابطهٔ زیر برقرار است :

$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{N_2}{N_1} \qquad (۸ـ۴)$$

مثال ۴ـ۸



شکل روبه‌رو یک مبدل ۲۲۰ V به ۱۲/۰ V را نشان می‌دهد. پیچه اولیه ۸۰۰۰ دور دارد. با فرض آرمانی بودن مبدل، تعداد دورهای پیچهٔ ثانویه را پیدا کنید.

پاسخ : با توجه به داده‌ها داریم :

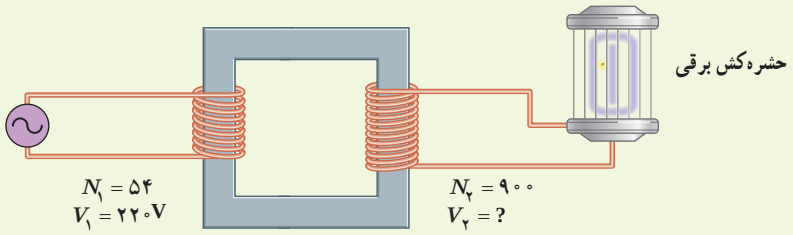
$$V_1=۲۲۰\,V \quad , \quad V_2=۱۲/۰\,V \quad N_1=۸۰۰۰ \text{ دور} \quad , \quad N_2=?$$

با جای‌گذاری این مقادیر در رابطهٔ ۴ـ۸ داریم :

$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{۱۲/۰\,V}{۲۲۰\,V}=\frac{N_2}{۸۰۰۰} \Rightarrow N_2=۴۳۶ \text{ دور}$$

تمرین ۴ـ۶

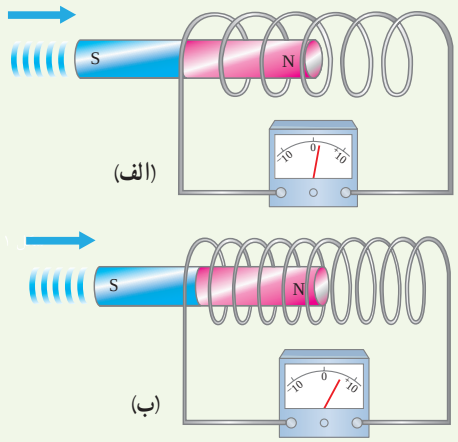
برخی از وسیله‌های برقی، مانند حشره‌کش برقی، برای کار کردن نیاز به ولتاژهای بالا از مرتبهٔ چند هزار ولت دارند. شکل زیر مبدلی را نشان می‌دهد که ولتاژ لازم را برای کار یک دستگاه حشره‌کش برقی فراهم می‌کند. اگر تعداد دور اولیهٔ مبدل $N_1=۵۴$ و تعداد دور ثانویه $N_2=۹۰۰$ باشد، مبدل چه ولتاژی را برای کار کردن دستگاه حشره‌کش تأمین می‌کند؟



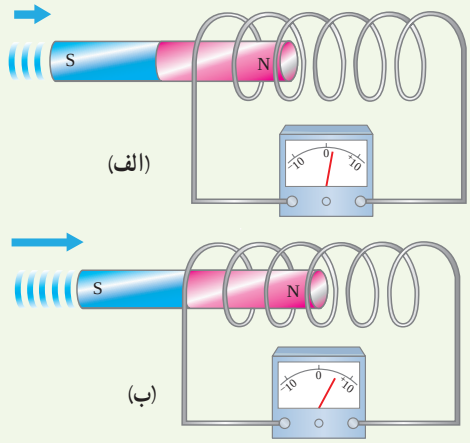
۱ـ لازم است توجه شود که ولتاژهای V_1 و V_2 تقریباً ۰/۷ برابر ولتاژ بیشینهٔ ورودی و خروجی مبدل هستند. بررسی دلایل این موضوع خارج از اهداف این کتاب است.

۴ـ۱ و ۴ـ۲ پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی و قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

۱ دو سیملوله با حلقه‌های با مساحت یکسان ولی با تعداد دور متفاوت را مطابق شکل‌های زیر به ولت‌سنج حساسی وصل کرده‌ایم. دریافت خود را از این شکل‌ها بنویسید. (آهنرباها مشابه‌اند و با تندی یکسانی به‌طرف سیملوله‌ها حرکت می‌کنند.)



۲ دو سیملولهٔ مشابه را مطابق شکل‌های زیر به ولت‌سنج حساسی وصل کرده‌ایم. دریافت خود را از شکل‌های زیر بنویسید. (آهنرباها مشابه‌اند ولی با تندی متفاوتی به‌طرف سیملوله حرکت می‌کنند.)

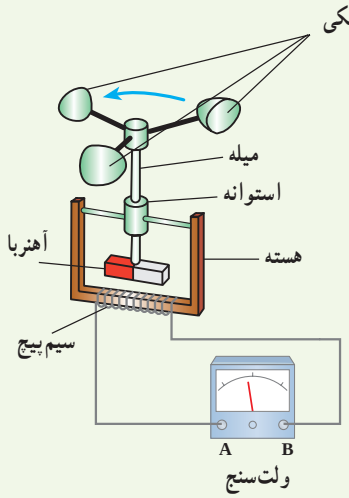


۳ شکل داده شده ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میلهٔ آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربهٔ ولت‌سنج می‌شود؟

ب) آیا با افزایش تندی باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.

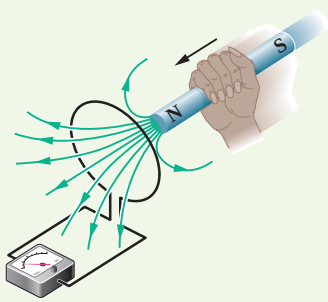


۴ سطح حلقه‌های پیچه‌ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازهٔ آن ۰/۰۴۰T و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت ۰/۰۱۰s تغییر می‌کند و به ۰/۰۴۰T در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقهٔ پیچه $50\,cm^2$ باشد، اندازهٔ نیروی محرکهٔ القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.

۵ مساحت هر حلقهٔ پیچه‌ای $30\,cm^2$ و پیچه متشکل از ۱۰۰۰ حلقه است. در ابتدا سطح پیچه‌ها بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت ۰/۰۲۰s پیچه بچرخد و سطح حلقه‌ها موازی میدان مغناطیسی زمین شود، نیروی محرکهٔ متوسط القایی در آن چقدر است؟ اندازهٔ میدان زمین را ۰/۵۰G درنظر بگیرید.

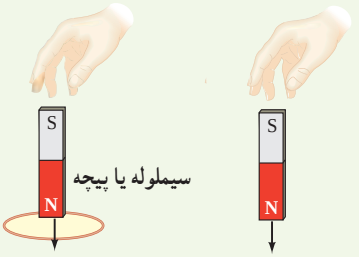
۴ـ۳ قانون لنز

۶ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل روبه‌رو به یک حلقهٔ رسانا نزدیک می‌کنیم. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.

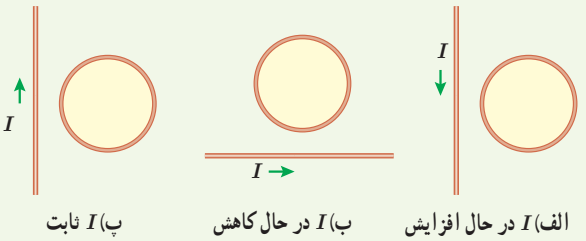


۷ دو آهنربای میله‌ای مشابه را مطابق شکل، به‌طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می‌کنیم به‌طوری‌که یکی از آنها از حلقهٔ رسانایی عبور می‌کند. اگر سطح زمین در محل

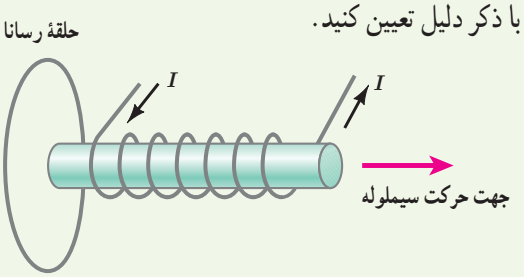
برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرورفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.)



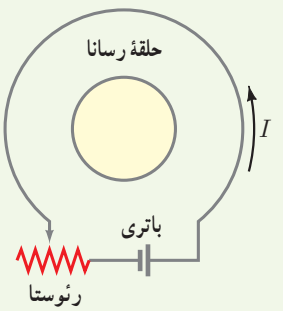
۸ جهت جریان القایی را در هریک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل‌های زیر تعیین کنید.



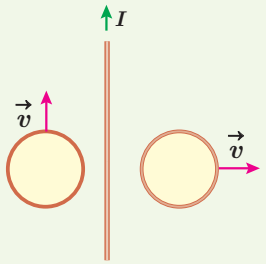
۹ شکل زیر سیملولهٔ حامل جریانی را نشان می‌دهد که در حال دور شدن از یک حلقهٔ رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



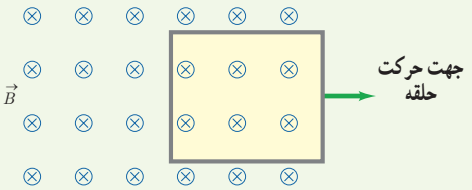
۱۰ اگر در مدار شکل زیر مقاومت رئوستا افزایش یابد، جریان القایی در حلقهٔ رسانای داخلی در چه جهتی ایجاد می شود؟



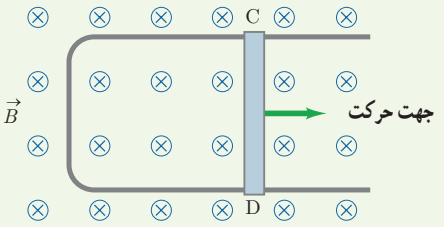
۱۱ دو حلقهٔ رسانا در نزدیکی یک سیم دراز حامل جریان ثابت I قرار دارند؛ این دو حلقه با تندی یکسان، ولی در جهت‌های متفاوت مطابق شکل زیر حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



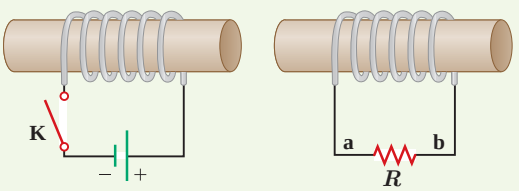
۱۲ حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل زیر به‌طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی درون‌سویی خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



۱۳ شکل زیر رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ که عمود بر 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؟



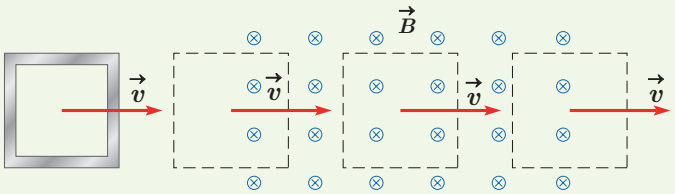
۱۴ در مدار نشان داده شده در شکل زیر، جهت جریان القایی را در مقاومت R در هریک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید : الف) در لحظهٔ بستن کلید K، ب) در لحظهٔ باز کردن کلید K.



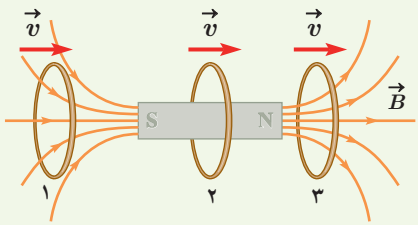
۱۵ حلقهٔ رسانای مربعی شکل، به طول ضلع ۱۰cm وارد میدان مغناطیسی درون‌سویی به اندازهٔ ۲۰mT و سپس از آن خارج می‌شود.

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.

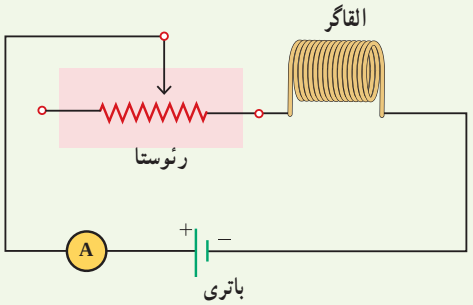


۱۶ حلقهٔ رسانایی به‌طرف یک آهنربای میله‌ای حرکت می‌کند. شکل زیر، حلقه را در سه وضعیت نسبت به آهنربا نشان می‌دهد. جهت جریان القایی را در حلقه برای هر وضعیت به‌طور جداگانه تعیین کنید.



۴ـ۴ القاگرها

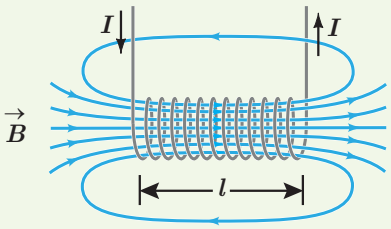
۱۷ شکل زیر مداری را نشان می‌دهد؛ شامل یک القاگر (سیملوله)، باتری، رئوستا و آمپرسنج که به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ باتری، انرژی ذخیره شده در القاگر را زیاد کنیم چه راهی پیشنهاد می‌کنید؟



۱۸ مساحت هر حلقه و طول سیملولهٔ شکل زیر به ترتیب $20\,cm^2$ و $80\,cm$ است. اگر این سیملوله از ۱۰۰۰ حلقهٔ نزدیک به هم تشکیل شده باشد،

الف) ضریب القاوری آن را پیدا کنید.

ب) چه جریانی از سیملوله بگذرد تا در میدان مغناطیسی آن $0/40\,mJ$ انرژی ذخیره شود؟



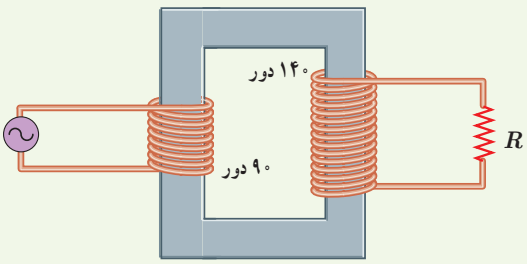
۴ـ۵ جریان متناوب

۱۹ جریان متناوبی که بیشینهٔ آن $2/0\,A$ و دورهٔ آن $0/020\,s$ است، از یک رسانای ۵ اهمی می‌گذرد.

الف) اولین لحظه‌ای که در آن جریان بیشینه است چه لحظه‌ای است؟ در این لحظه نیروی محرکهٔ القایی چقدر است؟

ب) در لحظهٔ $t = \frac{1}{400}\,s$، جریان چقدر است؟

۲۰ در مبدل آرمانی شکل زیر، اگر بیشینه ولتاژ دوسر مقاومت R برابر $7/0\,V$ باشد، بیشینه ولتاژ مولد چقدر است؟



پیوست

واژه‌نامهٔ فارسی ــ انگلیسی

آزمایش قطره ــ روغن میلیکان	Millikan's oil– drop experiment
آهنربای دائمی	Permanent magnet
آهنربای موقّت	Temporary magnet
آهنربای میله‌ای	Bar magnet
آهنربای نعلی‌شکل	Horseshoe magnet
ابررسانایی	Supercunductivity
اختلاف پتانسیل	Potential difference
افت پتانسیل	Voltage drop
القاگر	Inductor
القای الکترومغناطیسی	Electromagnetic induction
القای الکتریکی	Electric induction
القای مغناطیسی	Magnetic induction
انرژی پتانسیل الکتریکی	Electric potential energy
انرژی مغناطیسی	Magnetic energy
بار خالص	Net charge
بار قطبیده	Polarized charge
برق گیر	Lightning rod
بسامد زاویه‌ای	Angular frequency
بطری لیدن	Leyden jar
پارامغناطیس	Paramagnetism
پایستگی بار	Conservation of charge
پتانسیومتر	Potentiometer
پر کردن ــ شارژ (خازن)	Charging
پرتو کیهانی	Cosmic ray
پیچه	Coil
تخلیهٔ هاله‌ای	Corona discharge

تراوایی مغناطیسی	Magnetic permeability
ترمیستور	Thermistor
ثابت دی الکتریک	Dielectric constant
جریان القایی	Induced current
جریان الکتریکی	Electric Current
جریان متناوب	Alternating Current (AC)
جریان مستقیم	Direct Current (DC)
چگالی سطحی بار	Surface charge density
حلقه	Loop
حوزهٔ مغناطیسی	Magnetic domain
خازن	Capacitor
خازن تخت	Parallel ــ plate capacitor
خالی کردن (خازن)	Discharging
خط‌های میدان الکتریکی	Electric field lines
خط‌های میدان مغناطیسی	Magnetic field lines
خود ــ القاوری (خودالقایی)	Self ــ inductance
دوقطبی الکتریکی	Electric dipole
دوقطبی مغناطیسی	Magnetic dipole
دیامغناطیس	Diamagnetism
دیود نورگسیل	Light Emitting Diode (LED)
رسوب‌دهنده الکتروستاتیکی	Electrostatic precipitator
رئوستا	Rheostat
زاویهٔ شیب	Inclination angle
سرعت سوق	Drift velocity
سری الکتریسیتهٔ مالشی(تریبوالکتریک)	Triboelectric series
سیملوله	Solenoid

شارمغناطیسی	Magnetic flux
ضریب القاوری (ضریب خودالقایی)	Inductance
ضریب دمایی مقاومت ویژه	Coefficient of resistivity
ضریب گذردهی	Permitivity
ظرفیت	Capacitance
عایق	Insulator
فرّومغناطیس	Ferromagnetism
فروریزش الکتریکی	Electric breakdown
قاعدهٔ انشعاب	Junction rule
قانون القای الکترومغناطیسی فاراده	Faraday's law of electromagnetic induction
قانون کولن	Coulomb's law
قانون لنز	Lenz's law
قانون‌های کیرشهف	Kirchhoff's laws
قائده دست راست	Right hand rule
قطب جنوب	Magnetic inductionSouth pole
قطب شمال	North pole
قطبش	Polarization
قفس فاراده	Faraday cage
کوارک	Quark
کوانتیده	Quantized
محور مغناطیسی	Magnetic axis

مدارهای متوالی	Series circuits
مدارهای موازی	Parallel circuits
مقاومت	Resistor
مقاومت الکتریکی	Electric resistance
مقاومت پیچه‌ای	Wire_wound resistor
مقاومت ترکیبی	Composition resistor
مقاومت درونی	Internal resistance
مقاومت متغیر	Variable resistor
مقاومت معادل	Equivalent resistance
مقاومت نوری	Light Dependent Resistor (LDR)
مقاومت ویژه	Resistivity
موتور الکتریکی	Electric motor
مولّد وان دو گراف	Van de Graaff generator
میدان الکتریکی	Electric field
میدان مغناطیسی	Magnetic field
میل مغناطیسی	Magnetic declination
نقش‌های لیچنبرگ	Lichenberg patterns
نیروی الکتریکی	Electric force
نیروی محرکهٔ الکتریکی	Electro Motive Force (E.M.F.)
هستهٔ آهنی	Iron core
یون رانی	Iontophoresis

منابع

منابع انگلیسی

1. McGraw – Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms, Sybil p. Parker, 4th edition, 1989, Mc Graw – 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, Mc Graw 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

۱ــ فیزیک دانشگاهی (جلد دوم)، ویراست سیزدهم، سیرز، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح‌اله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۹۱ ، مؤسسهٔ نشر علوم نوین.

۲ــ مبانی فیزیک (جلد دوم) الکتریسیته و مغناطیس، ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش‌نظر، چاپ اول ۱۳۹۳، انتشارات نیاز دانش.

۳ــ مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی ، ۱۳۸۷-۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.

۴ــ فیزیک مفهومی، ویراست دهم، پل جی هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اوّل، ۱۳۸۸ ، انتشارات فاطمی.

۵ــ نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول۱۳۹۱، انتشارات آراکس.

۶ــ اصول فیزیک (جلد دوم)، هانس اوهانیان، ترجمه بهرام معلمی و جهانشاه میرزابیگی، چاپ اول، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.

۷ــ فیزیک (جلد دوم)، مارچلو آلونسو و ادوارد جی. فین. ترجمهٔ لطیف کاشیگر، چاپ اوّل، ۱۳۶۷، نشر روز.

۸ــ باتری اشکانی، ناصر کنعانی، ترجمهٔ 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 دربارهٔ 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 دبیرخانهٔ 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 ارائهٔ نظرات خود سازمان را در بهبود محتوای این کتاب یاری کرده‌اند به شرح زیر اعلام می‌شود.

کتاب فیزیک ۲ ـ 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 وبختیاری	۲۷	نجمه رضوان نژاد	کرمان
۳	هایده فرهی	سمنان	۲۸	فرشته شاهوردی	چهارمحال وبختیاری
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 دیوکلائی	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 تفنگ ساز رحیمی	قزوین	۳۹	حمید رضا نوری	خراسان جنوبی
۱۵	صدیقه سیروسی	خراسان جنوبی	۴۰	سیده زهره دودمانی	گیلان
۱۶	بهاره فخرائی	کردستان	۴۱	اسماعیل مطیع	قم
۱۷	لیلا روحی	شهرستان‌های تهران	۴۲	مجید سعدآبادی	خراسان رضوی
۱۸	عبدالواحد خالدی	کردستان	۴۳	طیبه شفیعی	بوشهر
۱۹	مهسا جلیلی	شهرتهران	۴۴	غیاض سلیمانی	خوزستان
۲۰	محمد رضا شفیعی	کرمان	۴۵	علی حسن بهامین پیلی	کهگیلویه وبویراحمد
۲۱	مهسا حبیب الهی	شهرتهران	۴۶	مجید راسخ	گیلان
۲۲	محمد شفیع مرادی	همدان	۴۷	زریر زمانی	کهگیلویه وبویراحمد
۲۳	سعیده طاهری فر	ایلام	۴۸	محمد رضا عباسی	کرمانشاه
۲۴	الهام حیدری	خوزستان	۴۹	شیرین تلمه	کرمانشاه
۲۵	خشایار بازیاری	بوشهر			