

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

فیزیک (۳) و آزمایشگاه

سال سوم آموزش متوسطه

رشته علوم تجربی

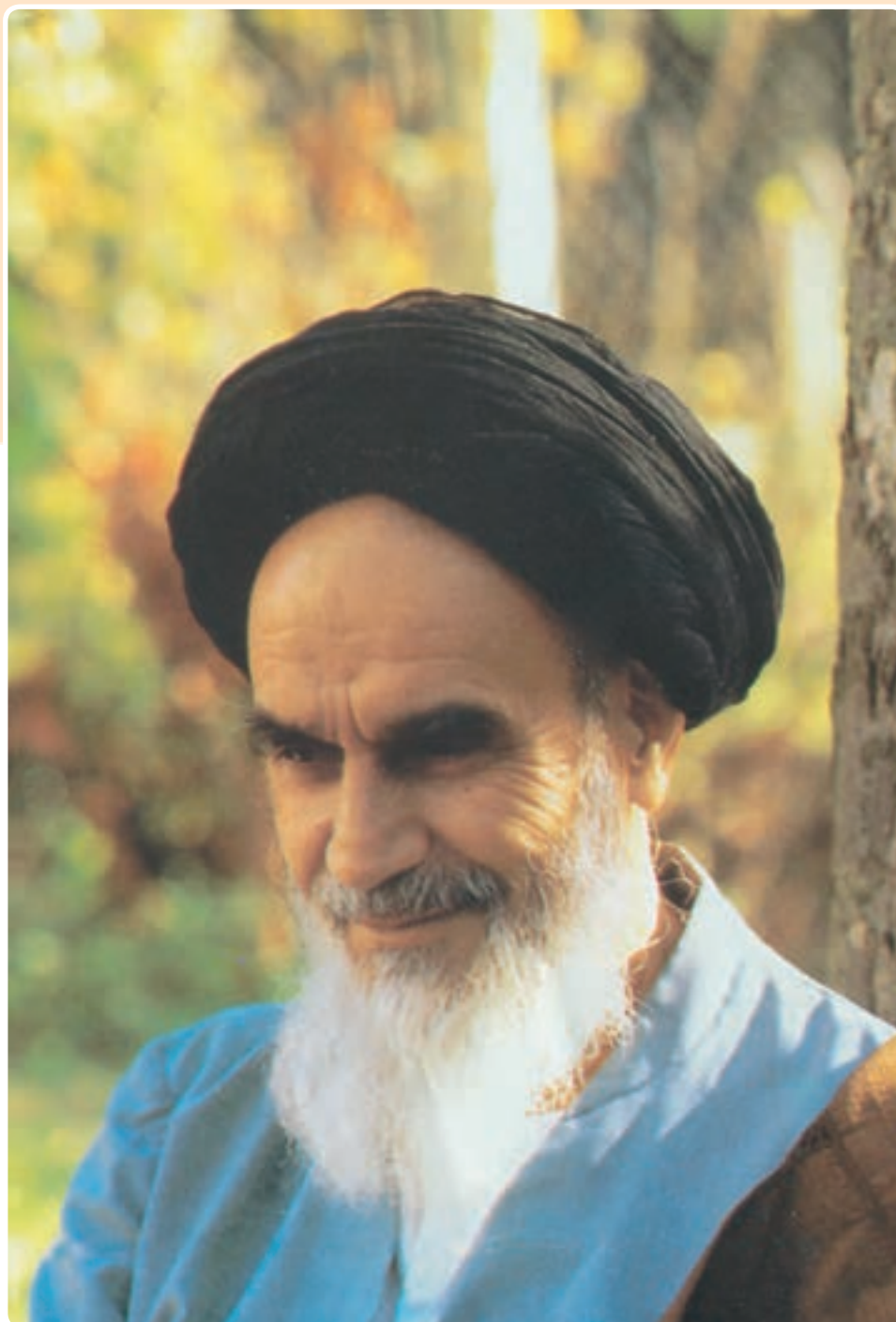


وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

| | |
|------------------------------------|---|
| نام کتاب : | فیزیک (۳) و آزمایشگاه - ۲۵۶/۳ |
| پدیدآورنده : | سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی |
| مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف : | دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری |
| شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف : | احمد احمدی، سیامک خادمی، روح‌الله خلیلی بروجنی، منیژه رهبر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، مهرناز طلوع شمس، مجید فلاح، حمید فدایی‌فرد و اسفندیار معتمدی (اعضای شورای برنامه‌ریزی) - احمد احمدی، روح‌الله خلیلی بروجنی، سید مهدی شیوایی، حسن عزیزی و غلامعلی محمودزاده (اعضای گروه تألیف) - احمد احمدی، محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی و حمید فدایی‌فرد (بازنگری و اصلاح فصل‌های ۱ و ۲)، روح‌الله خلیلی بروجنی (فصل‌های ۳ و ۴) - محمدکاظم بهنیا (ویراستار) |
| مدیریت آماده‌سازی هنری : | اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی |
| شناسه افزوده آماده‌سازی : | لیدا نیک‌روش (مدیر امور فنی و چاپ) - جواد صفری (طراح جلد) - راحله زادفتح‌اله، سمیه قنبری (صفحه‌آرا) - مریم دهقان‌زاده (رسام) - سیده فاطمه محسنی، زهرا ایمانی‌نصر، سیف‌الله بیگ محمد دلیوند، حسین چراغی، زینت بهشتی شیرازی، فاطمه رئیسیان فیروزآباد، ناهید خیام‌باشی (امور آماده‌سازی) |
| نشانی سازمان : | تهران : خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی) تلفن : ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار : ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹ وبگاه : www.irtextbook.ir و www.chap.sch.ir |
| ناشر : | شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران - تهران : کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش) تلفن : ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار : ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی : ۳۷۵۱۵-۱۳۹ |
| چاپخانه : | شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص» |
| سال انتشار و نوبت چاپ : | چاپ شانزدهم ۱۳۹۵ |

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

شابک ۳-۲۳۵۱-۰۵-۹۶۴-۹۷۸ ISBN 978-964-05-2351-3



شما متوقع نباشید که همین امروز بتوانید طیاره درست کنید، میگ درست کنید. البته الان نمی‌شود؛ اما مایوس نباشید از اینکه نمی‌توانیم درست کنیم. باید بیدار شوید، بروید دنبال اینکه آن صنایع پیشرفته را خودتان درست کنید. وقتی این فکر در یک ملتی پیدا شد و این اراده در یک ملتی پیدا شد کوشش می‌کند و دنبال کوشش، این مطلب حاصل می‌شود. امام خمینی (رحمة الله عليه)

فهرست

فصل ۱: الکتريسيته ساكن ۱

- ۱-۱- قانون كولن ۲
- ۲-۱- ميدان الكتريكي ۱۰
- ۳-۱- ميدان الكتريكي حاصل از يك ذره باردار ۱۱
- ۴-۱- خطوط ميدان الكتريكي ۱۵
- ۵-۱- نيروي وارد بر بار الكتريكي در ميدان الكتريكي ۱۷
- ۶-۱- انرژی پتانسیل الكتريكي ۱۹
- ۷-۱- پتانسیل الكتريكي ۲۱
- ۸-۱- توزيع و القای بار در رساناها ۲۴
- ۹-۱- خازن ۲۸
- ۱۰-۱- ظرفیت خازن ۳۰
- ۱۱-۱- خازن با دی الكتريك ۳۰
- ۱۲-۱- انرژی خازن ۳۷
- ۱۳-۱- به هم بستن خازن ها در مدار ۳۹
- پرسش ها ۴۴
- مسئله ها ۴۵

فصل ۲: جريان الكتريكي و مدارهاي جريان مستقيم ۴۸

- ۱-۲- جريان الكتريكي ۴۹
- ۲-۲- مقاومت رساناهاي اهمي و عوامل مؤثر بر آنها ۵۱
- ۳-۲- برخی از استانداردهای مهندسی سیم ها ۵۵
- ۴-۲- نيروي محرکه الكتريكي و مدارها ۵۹
- ۵-۲- توان در مدارهاي الكتريكي ۶۴
- ۶-۲- به هم بستن متوالي مقاومت ها ۶۷
- ۷-۲- مدارهاي چندحلقه اي و به هم بستن موازي مقاومت ها ۶۸
- پرسش ها ۷۵
- مسئله ها ۷۶

فصل ۳: میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی..... ۷۹

- ۱-۳ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی ۸۰
- ۲-۳ میدان مغناطیسی ۸۲
- ۳-۳ نیروی مغناطیسی وارد بر رسانای حامل جریان ۸۵
- ۴-۳ نیروی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی ۹۰
- ۵-۳ آثار مغناطیسی جریان الکتریکی ۹۲
- ۶-۳ نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان ۹۸
- ۷-۳ خواص مغناطیسی مواد ۱۰۰
- پرسش‌ها ۱۰۳
- مسئله‌ها ۱۰۶

فصل ۴: القای الکترومغناطیسی..... ۱۰۷

- ۱-۴ پدیده القای الکترومغناطیسی ۱۰۸
- ۲-۴ شار مغناطیسی ۱۱۱
- ۳-۴ قانون القای الکترومغناطیسی فارادی ۱۱۲
- ۴-۴ قانون لنز ۱۱۷
- ۵-۴ القاگرها و اثر خودالقایی ۱۱۸
- ۶-۴ انرژی ذخیره شده در القاگر ۱۲۳
- ۷-۴ جریان متناوب ۱۲۵
- پرسش‌ها ۱۳۰
- مسئله‌ها ۱۳۲

پیوست ۱۳۴

واژه‌نامه فارسی - انگلیسی ۱۳۷

فهرست منابع ۱۳۸

سخنی با دانش آموزان و همکاران محترم

فیزیک، علمی تجربی و حاصل تلاش انسان برای درک دنیای اطراف است. این علم دانشی آزمودنی است که می تواند با مشاهده پدیده های جدید دستخوش تغییر شود. به عبارت دیگر در فیزیک هیچ نظریه ای به عنوان حقیقت پایانی و غایی وجود ندارد.

پرورش علمی دانش آموزان و برخوردار شدن آنان از سواد علمی فناورانه از لازمه های زندگی سالم و موفقیت آمیز در جهان امروز است. به دنبال تحولات سریع در علم و فناوری، شیوه های زندگی نیز دچار تغییر زیادی شده است. این امر سبب می شود تا نیازهای فردای دانش آموزان در زمینه علم و فناوری برای برنامه ریزان آموزشی، به طور کامل آشکار نباشد. به همین دلیل شیوه های آموزش فیزیک نیز به تبع نیازهای جدید، تغییرات چشمگیری داشته است.

در شیوه های نوین آموزش، تلاش زیادی می شود تا دانش آموز، چگونگی آموختن را بیاموزد و مهارت برخورد با یک پدیده و پیمودن مراحل را که منجر به شناسایی آن پدیده می شود، فراگیرد. در کتاب های درسی فیزیک تلاش شده است، دانش آموز در تولید مفاهیم درسی نقش فعالی داشته باشد. قسمتی از نقش دبیران محترم، طرح مناسب موضوع های درسی و سپس راهنمایی دانش آموزان برای باز کشف مفاهیم مربوط به موضوع های مطرح شده است. با توجه به اینکه یکی از موضوعات مورد تأکید در این کتاب، فعال بودن دانش آموزان و نقش داشتن آنها در تولید مفاهیم است، لازم است که همکاران محترم از افزودن مطالب اضافی به مباحث کتاب که به شکل مبسوط در سال های آتی به آنها پرداخته خواهد شد، جداً بپرهیزند تا نقش فعالی که دانش آموزان در تولید مفاهیم می توانند داشته باشند، سبب رشد عقلی و مهارتی آنها شود این موضوع خود یکی از اهداف اصلی آموزش در دوره های عمومی و متوسطه است.

مناسب است همکاران محترم، موضوعات درسی را به گونه ای طرح کنند که اکثر دانش آموزان در فرایند آموزش و یادگیری درگیر شوند و مهارت های علمی و عملی آنها رشد یابد.

انتظار می رود همکاران گرامی هر جا که لازم می دانند با تکیه بر تجربه خود و دیگر همکاران، فعالیت و یا آزمایشی را که به یادگیری بهتر دانش آموزان کمک می کند، طراحی کنند و آنها را به طور گروهی برانجام آزمایش ها ترغیب کنند و از آنان بخواهند که گزارش کار، پیشنهادها و نتایجی را که از فعالیت می گیرند، در دفتر خود ثبت و به کلاس ارائه کنند. چگونگی ارائه این گزارش می تواند به عنوان یکی از ملاک های ارزشیابی مورد توجه قرار گیرد. لازم به یادآوری است استفاده از ماشین حساب های ساده در امتحانات فیزیک مانعی ندارد و در آزمون ها دادن ثابت های فیزیکی الزامی است.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب های درسی ابتدایی و متوسطه نظری همواره از دریافت نظرهای ارزشمند دبیران محترم، صاحب نظران و دانش آموزان جهت رفع نارسایی ها و لغزش های احتمالی به گرمی استقبال می کنند. نظرهای اصلاحی خود را به نشانی تهران - صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۸۷۴ - گروه فیزیک و یا نشانی الکترونیک physics-dept@talif.sch.ir ارسال نمایید.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب های درسی ابتدایی و متوسطه نظری

<http://physics-dept.talif.sch.ir>

دانش آموزان عزیز، صفحه ویژه ای برای پشتیبانی این کتاب به آدرس

<http://physics-dept.talif.sch.ir/cd3/physics.htm> طراحی شده و در دسترس

شماست. در این صفحه مجموعه ای از فیلم های کوتاه آموزشی، آزمایشگاه مجازی،

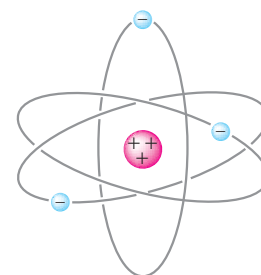
شبیه سازی، بیشتر بدانید و آزمون به تفکیک هر فصل وجود دارد که در طول سال

تحصیلی می توانید از آنها استفاده کنید.

الکتریسته ساکن



تولید مثل برخی از گل‌ها به زنبورهای عسل وابسته است. گرده‌ها به واسطه نیروی الکتروستاتیکی از یک گل به زنبور عسل می‌چسبند و در طی پرواز زنبور به آن چسبیده می‌مانند و سپس به واسطه همین نیرو به سوی گل دوم می‌جهند.



شکل ۱-۱ مدل ساده‌ای از اتم؛ بار الکترون‌ها منفی و بار پروتون‌ها مثبت است.

در کتاب‌های علوم دوره راهنمایی و نیز کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، با بارالکتریکی و روش ایجاد بار در اجسام آشنا شدیم و آموختیم که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد که مثبت و منفی نام‌گذاری شده‌اند. بر این اساس، بار الکترون منفی و بار پروتون مثبت است (شکل ۱-۱). علاوه بر این، در آزمایش‌های مختلف دیده‌ایم که بار الکتریکی به وجود نمی‌آید و از بین نمی‌رود و فقط از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این اصل، **بایستگی بار الکتریکی** گفته می‌شود. همچنین آموختیم اجسام باردار بر هم نیرو وارد می‌کنند. این نیروها ممکن است ربایشی (جاذبه) یا رانشی (دافعه) باشند. بیشتر نیروهایی که با آنها آشنا هستیم منشأ الکتریکی دارند. به کمک این نیروها می‌توان ساختار اجسام، پیوند بین ذره‌ها و بسیاری از پدیده‌هایی را که در طبیعت رخ می‌دهند، توصیف کرد. دامنه کاربرد الکتروسیسته در فناوری و صنعت به قدری گسترده است که نیازی به بیان ندارد.

در این فصل، ضمن یادآوری مطالبی که قبلاً آموخته‌ایم، به شرح و توصیف دقیق‌تر کمیت‌های الکتریکی و رابطه بین آنها می‌پردازیم.

۱-۱- قانون کولن

همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندید، دو جسم باردار بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. نیرویی که دو جسم باردار بر هم وارد می‌کنند، **نیروی الکتریکی** نام دارد. نیروهای الکتریکی ممکن است ربایشی یا رانشی باشند. دیدیم که اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، یعنی هر دو مثبت یا هر دو منفی باشند، این نیرو، رانشی است. در حالی که اگر بار الکتریکی یک جسم مثبت و بار الکتریکی دیگری منفی باشد، این نیرو، ربایشی خواهد بود.



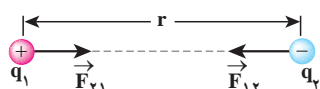
شکل ۱-۲ ترازوی پیچشی کولن. در دو سر یک میله سبک افقی یک کره کوچک و یک قرص قرار دارد. یک کره مشابه از حفره‌ای به داخل برده می‌شود. نیروی مؤثر بین بارها از اندازه‌گیری زاویه چرخش ترازوی پیچشی تارسیدن به تعادل به دست می‌آید. (تصویر از کتاب مرجع سال ۱۷۸۵ م.)

نیروی الکتریکی بین دو جسم، به چه عامل‌هایی بستگی دارد و اندازه این نیروها را از چه رابطه‌ای می‌توان محاسبه کرد؟

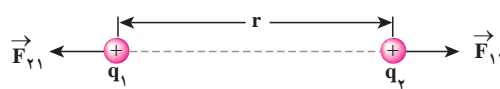
شارل کولن، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای (شکل ۱-۲) توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آنها بستگی دارند، شناسایی کند و نتیجه آزمایش‌های خود را، که امروزه به نام **قانون کولن** شناخته شده است، به صورت زیر بیان کرد:

بزرگی نیروی الکتریکی ربایشی یا رانشی بین دو ذره با بارهای q_1 و q_2 که در فاصله r از یکدیگر قرار دارند، با حاصل ضرب اندازه بار دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصله دو ذره از هم، نسبت وارون دارد. بنابراین:

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



ب) نیروی الکتریکی بین دو بار الکتریکی غیرهمنام، ربایشی است.



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

ثابت کولن (k) را می‌توان برحسب یک ضریب ثابت دیگر به نام ضریب گذردهی الکتریکی خلا (ε۰) نیز نوشت:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

که در آن

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$$



شارل آگوستین کولن

شارل آگوستین کولن فرانسوی در ۱۴ ژوئن سال ۱۷۳۶ میلادی (۱۱۱۵ هجری شمسی) به دنیا آمد. او در دانشگاه مباحث متنوعی از قبیل فلسفه، ریاضیات، نجوم و شیمی را آموخت و در سال ۱۷۶۱ از کالج مازارین در پاریس فارغ‌التحصیل شد. او در طی دوازده سال پس از فارغ‌التحصیلی شغل‌های متنوعی در شاخه‌های مختلف مهندسی داشت و مدتی را نیز در 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 دزدهای به‌طور معکوسی با فاصله بین آنها تغییر می‌کند، به چاپ رساند. نتیجه این آزمایش که به قانون کولن معروف شده است از هر آزمون تجربی‌ای 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 هیچ وقت نتوانست به چنین رابطه‌ای برسد. کولن سرانجام در ۲۳ آگوست سال ۱۸۰۶ میلادی (۱۱۸۵ هجری شمسی) در هفتاد سالگی در پاریس درگذشت. نام کولن یکی از ۷۲ نفری است که روی برج ایفل ثبت شده است.

که در آن q_1 و q_2 بارهای الکتریکی دو ذره برحسب کولن (C)، r فاصله بین دو ذره برحسب متر (m)، F بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره برحسب نیوتون (N) است. در این رابطه k ثابت کولن نام دارد و برابر است با:

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2 \quad (2-1)$$

در شکل ۳-۱، \vec{F}_{12} به معنای نیرویی است که ذره اول به ذره دوم وارد می‌کند و \vec{F}_{21} نیرویی است که ذره دوم به ذره اول وارد می‌کند.

نیروهای الکتریکی که دو ذره باردار به یکدیگر وارد می‌کنند، هم اندازه، در یک راستا و در جهت‌های مخالف یکدیگرند (قانون سوم نیوتون) و داریم:

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

به کمک قانون کولن (رابطه ۱-۱) می‌توان اندازه نیروی الکتریکی‌ای را که دو ذره باردار به یکدیگر وارد می‌کنند، محاسبه کرد. ربایشی یا رانشی بودن نیروها را به کمک نوع بارها مشخص می‌کنیم.

مثال ۱-۱

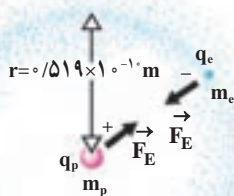
دو ذره با بارهای الکتریکی $q_1 = +2 \mu\text{C}$ و $q_2 = -5 \mu\text{C}$ در فاصله 3 m از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی نیرویی که دو ذره به یکدیگر وارد می‌کنند و نوع آن را مشخص کنید. پاسخ: با استفاده از رابطه ۱-۱ داریم:

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

چون بارهای الکتریکی دو ذره ناهمنام هستند، نیرویی که دو ذره به هم وارد می‌کنند، ربایشی است.

۱- در بسیاری از مثال‌ها می‌توان برای سادگی محاسبه، مقدار k را $9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ در نظر گرفت.

مثال ۲-۱



اتم هیدروژن شامل یک الکترون به جرم تقریبی $9/11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ است که به دور پروتونی به جرم تقریبی $1/67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ در فاصله متوسط $0/529 \times 10^{-10} \text{ m}$ از آن می چرخد. (الف) بزرگی نیروی الکتریکی بین این دو ذره را محاسبه کنید. (ب) بزرگی نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه و آن را با نیروی الکتریکی مقایسه کنید. ($G=6/67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$)

پاسخ:

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

$$F_E = k \frac{|q_p| |q_e|}{r^2} = (8/99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})(1/60 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0/529 \times 10^{-10} \text{ m})^2}$$

$$= 8/19 \times 10^{-8} \text{ N}$$

(ب) بزرگی نیروی گرانشی از قانون گرانش عمومی به دست می آید که در سال پیش آموختیم:

$$F_G = G \frac{m_p m_e}{r^2} = (6/67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(1/67 \times 10^{-27} \text{ kg})(9/11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(0/529 \times 10^{-10} \text{ m})^2}$$

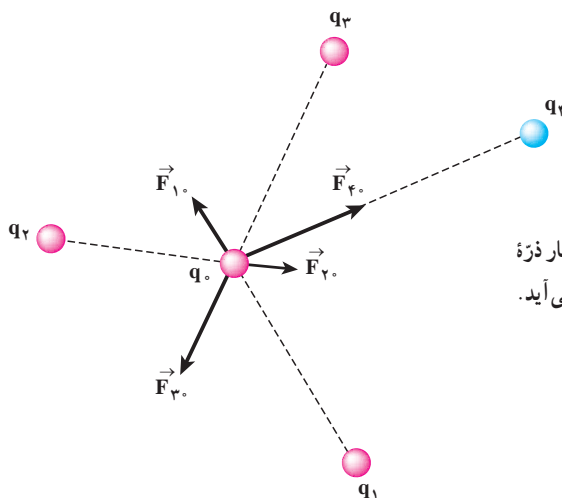
$$= 3/61 \times 10^{-47} \text{ N}$$

در نتیجه نسبت بزرگی این نیروها چنین می شود:

$$\frac{F_E}{F_G} = \frac{8/19 \times 10^{-8} \text{ N}}{3/61 \times 10^{-47} \text{ N}} = 2/27 \times 10^{39}$$

این نتیجه نشان دهنده آن است که نیروی گرانشی بسیار ضعیف تر از نیروهای الکتریکی است.

تجربه نشان می دهد اگر تعدادی ذره باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برآیند نیروهایی است که هر یک از ذره های دیگر در غیاب سایر ذره ها، بر آن ذره وارد می کند. برای مثال، شکل ۱-۴ نیروهای وارد بر بار q_0 از سوی چهار بار دیگر را نشان می دهد. این موضوع که از آزمایش نتیجه شده است را اصل برهم نهی نیروهای کولنی می گویند.

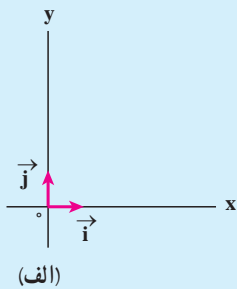


شکل ۱-۴ نیروی وارد بر بار q_0 ، از جمع برداری نیروهایی که چهار ذره باردار دیگر در غیاب بقیه بارها به این ذره وارد می کنند، به دست می آید.

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

یادداشت ریاضی

نمایش یک بردار بر حسب بردارهای یکه و مؤلفه‌های یک بردار روی محور مختصات

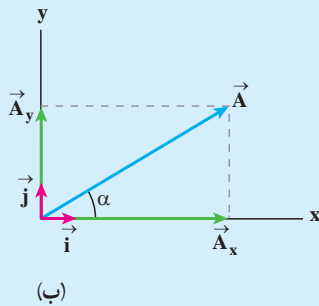


در درس ریاضی خود خوانده‌اید که با انتخاب بردارهای یکه \vec{i} و \vec{j} به ترتیب روی محورهای x و y (شکل الف) می‌توان یک بردار را بر حسب بردارهای یکه نمایش داد. بردار یکه در راستای هر محور، برداری است به طول واحد و در جهت همان محور.

$$|\vec{i}| = |\vec{j}| = 1 \text{ واحد}$$

اگر اندازه جبری مؤلفه‌های بردار \vec{A} روی محور x و y به ترتیب برابر A_x و A_y باشد، این بردار به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\vec{A} = A_x \vec{i} + A_y \vec{j}$$



بنابراین، برای تعیین مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور x و y به روش زیر عمل می‌کنیم. مطابق شکل ب از انتهای بردار \vec{A} خط‌هایی موازی هر یک از دو محور x و y رسم می‌کنیم تا محورها را قطع کنند. به این ترتیب بردارهای \vec{A}_x و \vec{A}_y به دست می‌آیند که همان مؤلفه‌های بردار \vec{A} در راستای دو محور است.

با توجه به اینکه زاویه \vec{A} با محور x برابر α است، اندازه جبری مؤلفه‌های \vec{A} روی دو محور با توجه به رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$\cos \alpha = \frac{A_x}{A} \quad \text{و} \quad \sin \alpha = \frac{A_y}{A}$$

بنابراین

$$A_x = A \cos \alpha \quad \text{و} \quad A_y = A \sin \alpha$$

بزرگی بردار \vec{A} را می‌توان با استفاده از مثلث قائم‌الزاویه شکل ب به دست آورد:

$$A^2 = A_x^2 + A_y^2$$

و در نتیجه:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

جهت بردار \vec{A} را با تعیین زاویه این بردار با سوی مثبت محور x به دست می‌آوریم. اگر در شکل ب تنازات زاویه α

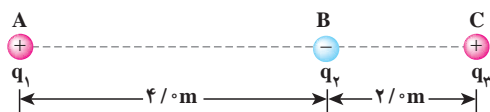
را حساب کنیم، نتیجه می‌شود:

$$\tan \alpha = \frac{A_y}{A_x}$$

توجه کنید این رابطه، دو پاسخ برای α به دست می‌دهد. پاسخ درست را باید با توجه به علامت اندازه جبری مؤلفه‌های \vec{A} در راستای دو محور تعیین کرد.

مثال ۱-۳

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



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

فاصله بین بارهای q_1 و q_3 را با r_{13} و فاصله بین بارهای q_2 و q_3 را با r_{23} نشان می‌دهیم. با استفاده از رابطه ۱-۱ داریم:

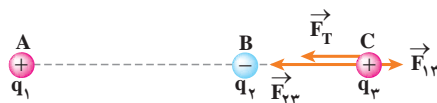
$$F_{13} = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_{13}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/5 \times 10^{-6} \text{ C})(4/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(6/0 \text{ m})^2}$$

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

$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})(4/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2/0 \text{ m})^2}$$

$$= 9/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

نیرویی که بار q_1 بر بار q_2 وارد می‌کند، رانشی و نیرویی که بار q_3 بر بار q_2 وارد می‌کند رپایشی است.



مطابق شکل، نیروهای F_{13} و F_{23} در جهت‌های مخالف یکدیگرند و برآیند آنها برابر است با

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

بنابراین بزرگی \vec{F}_T برابر تفاضل بزرگی آنهاست:

$$F_T = F_{23} - F_{13} = 6/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

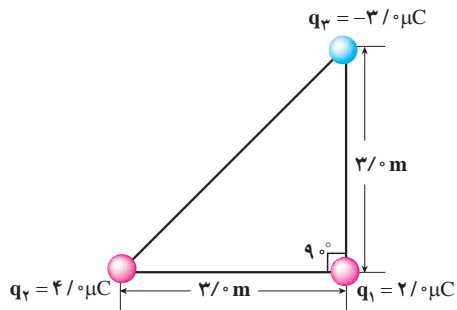
و جهت آن در جهت نیروی بزرگ‌تر (\vec{F}_{23}) است. اگر محور x را روی خط واصل سه بار و جهت مثبت آن را به

سمت راست در نظر بگیریم و بردار یکه محور x را، \vec{i} بنامیم، داریم:

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

تمرین ۱-۱

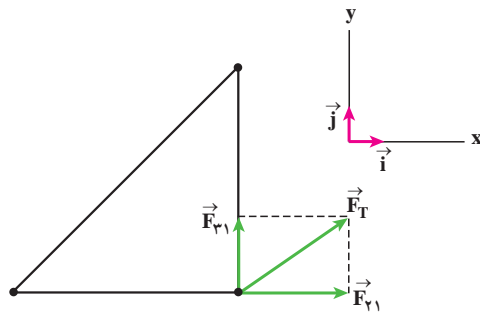
در مثال ۱-۳، نیروی وارد بر بار q_2 را به دست آورید.



سه ذره باردار مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث قائم‌الزاویه‌ای ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی وارد بر ذره واقع در رأس قائمه را محاسبه کنید.

پاسخ: نیروی بین بارهای q_2 و q_1 رانشی و نیروی بین بارهای q_1 و q_3 راباشی است. با استفاده از رابطه ۱-۱ داریم:

$$F_{r1} = k \frac{|q_2| |q_1|}{r_{r1}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 8 \times 10^{-3} \text{ N}$$



با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده، \vec{F}_{r1} در جهت مثبت محور x است و بنابراین:

$$\vec{F}_{r1} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$

به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای q_2 و q_3 داریم:

$$F_{r3} = k \frac{|q_3| |q_1|}{r_{r3}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(3 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده \vec{F}_{r3} در جهت مثبت محور y است و بنابراین،

$$\vec{F}_{r3} = (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

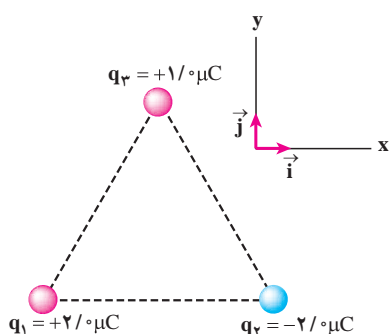
برایند نیروهای الکتریکی وارد بر بار q_1 برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{r1} + \vec{F}_{r3} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

و بزرگی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_T = \sqrt{(8 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (6 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 1 \times 10^{-2} \text{ N}$$

مثال ۱-۵



سه ذره باردار، مطابق شکل در سه رأس مثلث متساوی الاضلاعی به ضلع $1/5\text{m}$ ثابت شده‌اند.

الف) نیرویی که بار q_1 بر بار q_3 وارد می‌کند (\vec{F}_{13}) را بر حسب بردارهای یکه \vec{i} و \vec{j} دستگاه مختصات نشان داده شده در شکل بنویسید.

ب) نیروی \vec{F}_{23} را نیز بر حسب بردارهای یکه بنویسید.

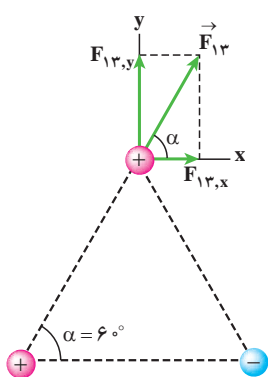
پ) برآیند نیروهای وارد بر بار q_3 را به دست آورید.

پاسخ:

الف) بزرگی نیرویی که بار q_1 بر بار q_3 وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به دست می‌آوریم:

$$F_{13} = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_{13}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})(1 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2}$$

$$= 18 \times 10^{-3} \text{ N}$$



همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی \vec{F}_{13} دارای مؤلفه‌های x و y است،

به طوری که:

$$F_{13,x} = F_{13} \cos \alpha = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{13,y} = F_{13} \sin \alpha = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = 15.6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

بنابراین، نیروی \vec{F}_{13} بر حسب بردارهای یکه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F}_{13} = (9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (15.6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم:

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

$$= 18 \times 10^{-3} \text{ N}$$

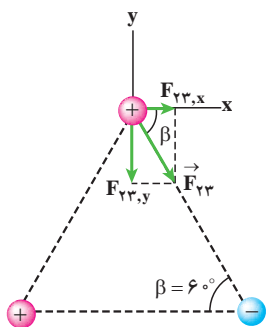
$$F_{23,x} = F_{23} \cos \beta = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

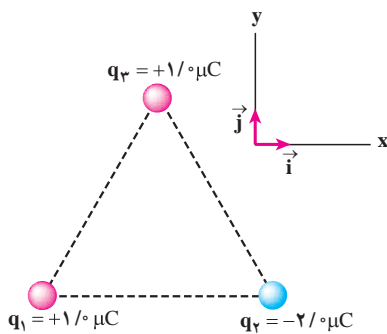
$$F_{23,y} = -F_{23} \sin \beta = -(18 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = -15.6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$\vec{F}_{23} = (9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (15.6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

پ) برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر بار q_3 برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23} = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$





سه ذره باردار، مطابق شکل روبه‌رو در سه رأس مثلث متساوی‌الاضلاعی به ضلع $1/5\text{m}$ ثابت شده‌اند.

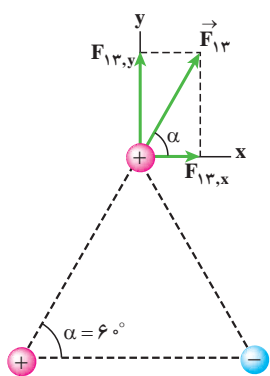
- الف) نیروی که بار q_1 بر بار q_3 وارد می‌کند (\vec{F}_{13}) را برحسب بردارهای یکه \vec{i} و \vec{j} دستگاه مختصات نشان داده شده در شکل بنویسید.
- ب) نیروی \vec{F}_{23} را نیز برحسب بردارهای یکه بنویسید.
- پ) برآیند نیروهای وارد بر بار q_3 را به دست آورید.
- ت) بزرگی بردار برآیند نیروهای وارد بر بار q_3 چقدر است؟

پاسخ:

الف) بزرگی نیروی که بار q_1 بر بار q_3 وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به دست می‌آوریم:

$$F_{13} = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_{13}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2}$$

$$= 4/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$



همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی \vec{F}_{13} دارای مؤلفه‌های x و y است،

به طوری که:

$$F_{13,x} = F_{13} \cos \alpha = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 2/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{13,y} = F_{13} \sin \alpha = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = 3/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

بنابراین، نیروی \vec{F}_{13} برحسب بردارهای یکه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F}_{13} = (2/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (3/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم:

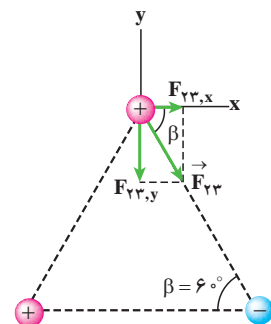
$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/0 \times 10^{-6} \text{ C})(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2}$$

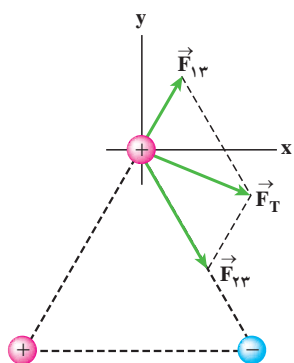
$$= 8/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{23,x} = F_{23} \cos \beta = (8/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 4/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{23,y} = -F_{23} \sin \beta = -(8/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = -6/9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$\vec{F}_{23} = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (6/9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$





پ) برابند نیروهای وارد بر بار q_2 برابر است با

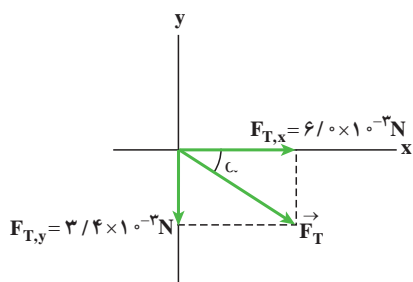
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{1r} + \vec{F}_{2r} = [(2/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (3/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}] + [(4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (6/9 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}] = (6/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} - (3/4 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

بردار نیروی برابند \vec{F}_T با استفاده از روش متوازی الاضلاع که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه آموختید در شکل روبه‌رو رسم شده است.

ت) بردار نیروی برابند \vec{F}_T که در شکل قبل دیدیم را جداگانه همراه با محورهای x

و y در شکل روبه‌رو به مقیاس رسم می‌کنیم. با استفاده از قضیه فیثاغورس

بزرگی \vec{F}_T را به دست می‌آوریم:



$$F_T = \sqrt{F_{T,x}^2 + F_{T,y}^2} = \sqrt{(6/0 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (-3/4 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = 6/9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

تمرین ۲-۱

برابند نیروهای وارد بر بار q_1 در مثال ۱-۶ را برحسب بردارهای یک‌گانه محاسبه کنید.

توجه کنید که رابطه ۱-۱ برای محاسبه نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار به کار می‌رود. محاسبه نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار که نتوان آنها را ذره فرض کرد (مانند دو کره باردار بزرگ که در فاصله کمی از هم قرار دارند) به چگونگی آرایش (یا توزیع) بار در دو جسم بستگی دارد و محاسبه آن نیازمند ریاضیات پیشرفته‌تری است. اگر فاصله جسم باردار از ذره باردار (یا جسم باردار دیگر) آن قدر زیاد باشد که ابعاد جسم در مقایسه با فاصله بین آنها قابل چشم‌پوشی باشد، می‌توان جسم را مانند یک ذره باردار در نظر گرفت و از رابطه ۱-۱ برای محاسبه نیروی الکتریکی استفاده کرد.

۲-۱- میدان الکتریکی

در بخش ۱-۱ دیدیم که دوبار الکتریکی q_1 و q_2 که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار دارند، بر هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. ولی این پرسش مطرح می‌شود که بار q_2 چطور حضور بار q_1 را حس می‌کند. به عبارت دیگر این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می‌توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ چطور ممکن است چنین کنش از راه دوری وجود داشته باشد، بی‌آنکه بارها هیچ تماسی با یکدیگر داشته باشند؟ به این پرسش این‌طور می‌توان پاسخ گفت که بار q_1 خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می‌کند که به آن اصطلاحاً **میدان الکتریکی** بار q_1 گفته می‌شود. در واقع اگر بار q_2 را در

هر نقطه‌ای از فضای پیرامون بار q_1 قرار دهیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی‌ای قرار می‌گیرد که بار q_2 پیش‌تر در آن نقطه ایجاد کرده است. بنابراین، بار q_1 ، نه با تماس با بار q_2 بلکه به وسیله میدان الکتریکی خودش بر بار q_2 نیرو وارد می‌کند.

میدان الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف یک جسم باردار الکتریکی به این شکل تعیین می‌شود: نخست بار کوچک و مثبت q_0 موسوم به **بار آزمون** را در آن نقطه قرار می‌دهیم و سپس نیروی الکتریکی \vec{F} وارد بر آن را اندازه می‌گیریم. آنگاه میدان الکتریکی \vec{E} ناشی از جسم باردار در آن نقطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (3-1)$$

بنابراین تعریف میدان الکتریکی (رابطه ۳-۱)، میدان الکتریکی کمیته برداری است که بزرگی آن برابر $E = \frac{F}{q_0}$ و جهت آن همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون (بار کوچک و مثبت) است. در رابطه ۳-۱ یکای نیرو (\vec{F})، نیوتون (N)، و یکای بار آزمون (q_0)، کولن (C) است و در نتیجه یکای میدان الکتریکی (\vec{E})، نیوتون بر کولن (N/C) می‌شود.

مثال ۷-۱

برای تعیین میدان الکتریکی در نقطه‌ای از فضا بار آزمون $+2 \text{ nC}$ را در آن نقطه قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی $5/0 \times 10^{-3} \text{ N}$ در راستای جنوب - شمال و به طرف شمال بر این بار وارد می‌شود. بزرگی و جهت میدان الکتریکی در این نقطه را مشخص کنید.

پاسخ: از رابطه ۳-۱ می‌توان بزرگی میدان الکتریکی در نقطه مورد نظر را محاسبه کرد.

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{5/0 \times 10^{-3} \text{ N}}{2 \times 10^{-9} \text{ C}} = 2/5 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

جهت میدان در نقطه مورد نظر هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون، یعنی رو به شمال است.

۳-۱- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار



شکل ۱-۳ می‌خواهیم میدان حاصل از بار q را در نقطه A محاسبه کنیم.

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

بار q را در نقطه A به دست می آوریم.

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

در نتیجه :

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

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

مثال ۸-۱

بزرگی میدان الکتریکی ذره ای با بار $2 \mu\text{C}$ را در نقطه M به فاصله الف (2 m) و ب (2 m) از این بار الکتریکی محاسبه کنید و بردار میدان را در این نقطه برای حالت الف رسم کنید.

پاسخ : با استفاده از رابطه ۴-۱ اندازه میدان را در نقطه های مورد نظر، به دست می آوریم :

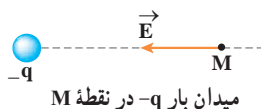
$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad \text{الف)}$$

$$E_1 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \text{ m})^2} = 45 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

ب)

$$E_2 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \text{ m})^2} = 45 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

برای رسم بردار میدان در نقطه M بار آزمونی را در آن نقطه فرض می کنیم. چون بار q منفی است، بار آزمون فرضی را جذب می کند. میدان بار q در جهت همین نیروست که در شکل زیر نشان داده شده است.



در بخش ۱-۱ دیدیم اگر چند بار نقطه ای مانند q_1, q_2, \dots داشته باشیم برآیند نیروهای الکتریکی حاصل از این بارها برابر آزمون q_0 با استفاده از اصل برهم نهی نیروهای کولنی از رابطه زیر به دست می آید :

$$\vec{F}_{T_0} = \vec{F}_{1_0} + \vec{F}_{2_0} + \dots$$

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

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

$$\frac{\vec{F}_{T_0}}{q_0} = \frac{\vec{F}_{1_0}}{q_0} + \frac{\vec{F}_{2_0}}{q_0} + \dots$$

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

این رابطه که موسوم به اصل برهم نهی میدان‌های الکتریکی است، نشان می‌دهد که میدان الکتریکی ناشی از چند بار الکتریکی در نقطه‌ای از فضا، برابر مجموع میدان‌هایی است که هر بار در نبود سایر بارها در آن نقطه از فضا ایجاد می‌کند.

مثال ۱-۱

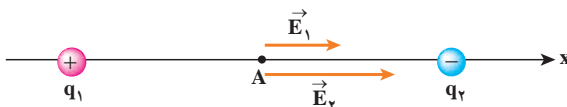
دو ذره با بارهای $q_1 = 4 \times 10^{-6} \text{ C}$ ، $q_2 = -6 \times 10^{-6} \text{ C}$ در فاصله 8 m از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به دست آورید:

الف) در وسط خط واصل دو ذره،

ب) در نقطه‌ای به فاصله 8 m از بار q_1 و 16 m از بار q_2 و روی خط واصل دوبار.

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

الف) در شکل زیر اگر بار آزمون را در نقطه A واقع در وسط خط واصل دو ذره قرار دهیم، بار q_1 آن را می‌راند و بار q_2 آن را می‌رباید. بنابراین، همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، \vec{E}_1 و \vec{E}_2 در نقطه A هم‌جهت و به سوی بار q_2 (در سوی مثبت محور x) هستند.



با استفاده از اصل برهم نهی 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 رابطه ۴-۱ ($E = k|q|/r^2$) به دست می‌آوریم:

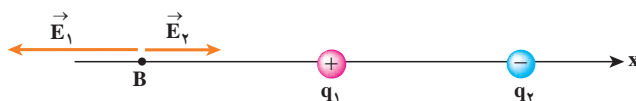
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C}$$

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

بنابراین:

$$\vec{E}_A = (2.25 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (3.375 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (5.625 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

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



با استفاده از اصل برهم نهی 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 :

$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{4 \times 10^{-6}}{(1 \text{ m})^2} = 36 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{6 \times 10^{-6}}{(1 \text{ m})^2} = 54 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین :

$$\vec{E}_B = (-36 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (54 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (18 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

مثال ۱-۱

دو ذره با بارهای $q_1 = +5 \text{ nC}$ و $q_2 = -5 \text{ nC}$ در فاصله $a = 16 \text{ cm}$ از یکدیگر ثابت شده‌اند. میدان الکتریکی را روی عمود منصف خطی که دو ذره را به یکدیگر وصل می‌کند و به فاصله $x = 6 \text{ cm}$ از وسط خط واصل دو ذره، به دست آورید. به مجموعه این دو بار الکتریکی، **دو قطبی الکتریکی** گفته می‌شود.

پاسخ : همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، میدان الکتریکی حاصل از این دو بار، در نقطه مورد نظر هم‌اندازه‌اند.

$$r_1 = r_2 = \sqrt{a^2 + x^2} = \sqrt{(16 \text{ cm})^2 + (6 \text{ cm})^2} = 17 \text{ cm}$$

با استفاده از رابطه ۱-۴ داریم :

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

$$E_1 = E_2 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(5 \times 10^{-9} \text{ C})}{(17 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 15.5 \times 10^4 \text{ N/C}$$

در نتیجه برای مؤلفه در نقطه M داریم :

$$E_{1x} = -E_{2x} = E_1 \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{x}{r_1} = \frac{6 \text{ cm}}{17 \text{ cm}} = 0.35$$

$$E_{1x} = -E_{2x} = (15.5 \times 10^4 \text{ N/C})(0.35) = 5.4 \times 10^4 \text{ N/C}$$

$$E_{1y} = E_{2y} = -E_1 \sin \alpha$$

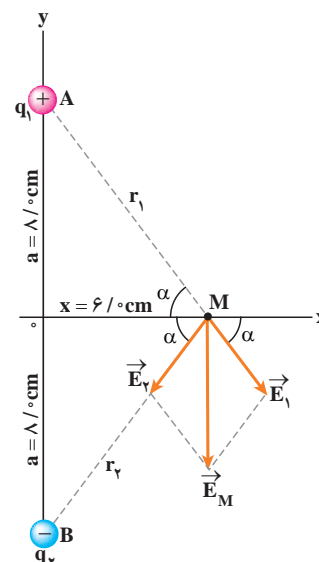
$$\sin \alpha = \frac{a}{r_1} = \frac{16 \text{ cm}}{17 \text{ cm}} = 0.94$$

$$E_{1y} = E_{2y} = -(15.5 \times 10^4 \text{ N/C})(0.94) = -1.45 \times 10^5 \text{ N/C}$$

با توجه به اینکه $E_{1x} = -E_{2x}$ است، مؤلفه x میدان الکتریکی برآیند صفر است و

با توجه به اینکه $E_{1y} = E_{2y}$ است، مؤلفه y میدان الکتریکی برآیند $2E_{1y}$ است و داریم :

$$\vec{E} = 2E_{1y} \vec{j} = 2 \times (-1.45 \times 10^5 \text{ N/C}) \vec{j} = (-2.9 \times 10^5 \text{ N/C}) \vec{j}$$



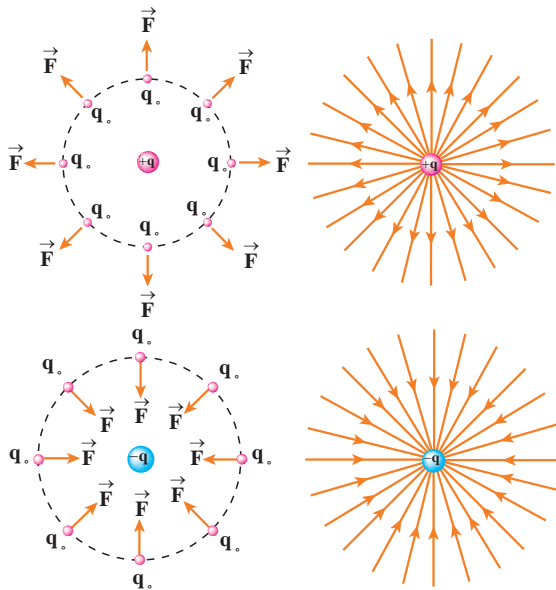
میدان الکتریکی حاصل از دو قطبی مثال ۱-۱° را در نقطه‌ای روی محور دو قطبی (محور y) و به فاصله ۱۶ cm از مرکز دو قطبی (نقطه مبدأ) به دست آورید.

۱-۴- خطوط میدان الکتریکی

پیش از این دیدیم بارهای الکتریکی در فضای پیرامون خود میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند. برای مجسم کردن میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام دارای بار، از خط‌های جهت‌داری موسوم به **خطوط میدان الکتریکی** استفاده می‌کنیم.

این خط‌ها دارای ویژگی‌های زیرند:

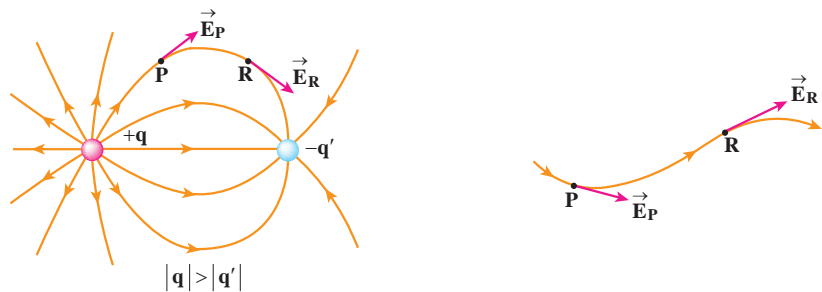
۱- خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون (مثبت) واقع در آن نقطه‌اند. در نتیجه، جهت این خط‌ها برای بار مثبت روبه خارج و برای بار منفی روبه داخل است (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۶ خط‌های میدان الکتریکی در هر نقطه هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون مثبت واقع در آن نقطه است.

۲- میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط

میدان هم جهت است (شکل ۱-۷).

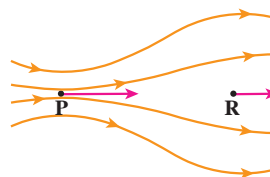


شکل ۱-۷ میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است.

۳- در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خط‌های میدان به یکدیگر نزدیک‌تر و فشرده‌ترند (شکل ۱-۸).

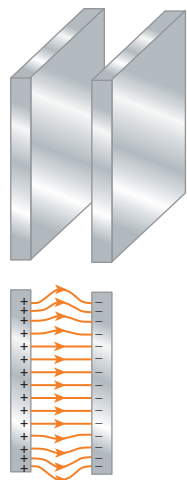
شکل ۱-۸ در نقطه P خطوط میدان به یکدیگر

نزدیک‌ترند، و بنابراین $E_P > E_R$ است.

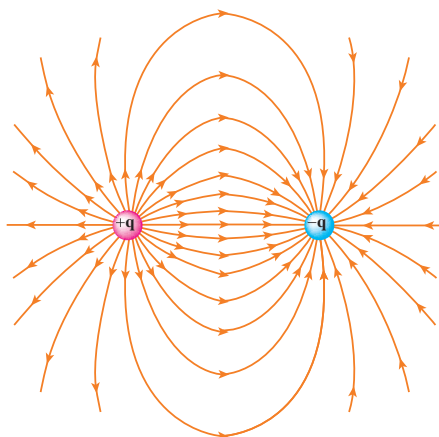


۴- خط‌های میدان یکدیگر را قطع نمی‌کنند؛ یعنی از هر نقطه فقط یک خط میدان می‌گذرد. به بیان دیگر، در هر نقطه فضا فقط یک میدان الکتریکی وجود دارد که همان میدان الکتریکی برآیند است.

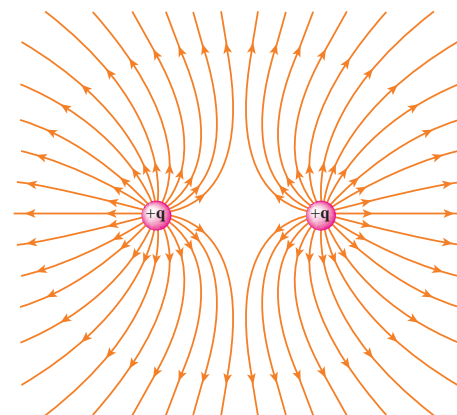
در شکل ۹-۱ خطوط میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



پ) میدان بین دو صفحه رسانای موازی با بارهای هم اندازه و ناهمنام (نمونه‌ای از یک میدان یکنواخت)



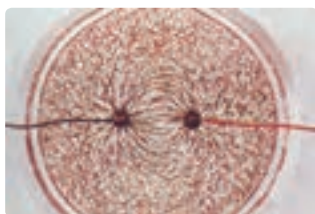
ب) دو بار الکتریکی ناهمنام و هم اندازه



الف) دو بار الکتریکی مثبت و هم اندازه

شکل ۹-۱ میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار

آزمایش ۱-۱



(الف)



(ب)

مشاهده طرح خطوط میدان الکتریکی

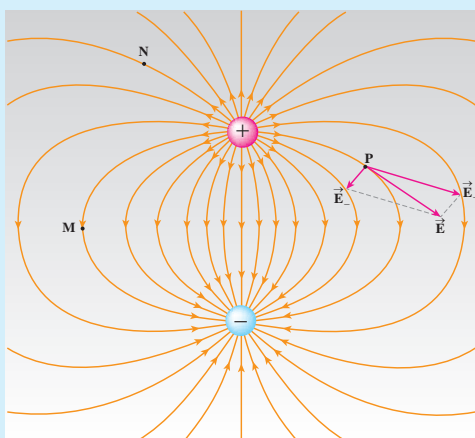
وسایله‌های آزمایش: ظرف پلاستیکی یا شیشه‌ای با ابعاد مناسب، پارافین مایع یا روغن مایع خوراکی، مولد و اندوگراف یا هر مولد ولتاژ بالای دیگر، سیم‌های رابط با پوشش عایق ضخیم، الکترودهایی با شکل‌های مختلف (می‌توانید الکترودها را با ورقه آلومینیومی ضخیم بسازید)، بذر چمن.

شرح آزمایش:

- ۱- روغن را در ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی بریزید.
- ۲- دو الکتروده را به صورت دو گلوله فلزی درآورید و درون روغن قرار دهید. سپس الکترودها را با سیم‌های رابط به پایانه‌های خروجی مولد و اندوگراف وصل کنید.
- ۳- مولد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای بین دو الکترودها بپاشید.
- ۴- اکنون به سمت گیری دانه‌های بذر در فضای بین دو الکترودها توجه کنید (شکل الف) و با استفاده از آن طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکترودها رسم کنید.

- ۵- این بار دو الکتروود را به صورت دو صفحه موازی درون ظرف روغن قرار دهید و آنها را با سیم‌های رابط به پایانه‌های خروجی مولد واندوگراف وصل کنید.
- ۶- مولد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای میان دو الکتروود بپاشید.
- ۷- دوباره به سمت گیری دانه‌های بذر در فضای میان دو الکتروود توجه کنید (شکل ب) و با استفاده از آن، طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکتروود رسم کنید.
- ۸- برای آنکه بتوانید طرح خطوط میدان را به صورت سه بُعدی ببینید، به جای بذر چمن از بریده‌های کوچک نخ استفاده کنید و آن را پیش از انجام آزمایش در ظرف شیشه‌ای شفاف با عمق مناسب که حاوی روغن است کاملاً به هم بزنید و سپس الکتروودها را مطابق آزمایش‌های قبل به مولد واندوگراف متصل کنید.

فعالیت ۱-۱



- ۱- در شکل ۱-۹ پ میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه و دور از لبه‌های آن، یکنواخت است. با توجه به تعریف میدان الکتریکی و ویژگی‌های خط‌های میدان، برای میدان الکتریکی یکنواخت تعریفی بیان کنید.
- ۲- در شکل روبه‌رو میدان الکتریکی بر ایند یک دو قطبی الکتریکی در نقطه P رسم شده است. میدان بر ایند در نقطه‌های M و N را به دقت رسم کنید.

۵- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی

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

$$\vec{F} = q \vec{E} \quad (۶-۱)$$

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

مثال ۱۱-۱

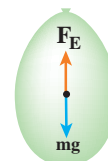
در بادکنکی به جرم $g = 1.0 \times 10^{-3}$ بار الکتریکی 2.00 nC ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، به طوری که نیروی وزن بادکنک با نیروی الکتریکی وارد بر آن موازنه شود. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را تعیین کنید. ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

پاسخ: برای اینکه نیروی الکتریکی با وزن بادکنک موازنه شود باید نیروی الکتریکی در خلاف جهت وزن بادکنک به آن وارد شود و بزرگی آن با وزن بادکنک برابر باشد:

$$F_E = mg$$

$$|q|E = mg$$

$$\Rightarrow E = \frac{mg}{|q|} = \frac{(1.0 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})}{2.00 \times 10^{-9} \text{ C}} = 4.9 \times 10^5 \text{ N/C}$$



با توجه به رابطه $\vec{F} = q\vec{E}$ و منفی بودن q ، جهت میدان الکتریکی در خلاف جهت نیروی الکتریکی و بنابراین، مستقیماً رو به پایین است.

زنبورهای عسل و گرده افشانی گل‌ها: زنبورهای عسل معمولاً در حین پرواز دارای بار

مثبت می‌شوند و وقتی به گرده بدون باری روی بساک یک گل (شکل ۱-۱ الف) می‌رسند که از لحاظ الکتریکی خنثی است، میدان الکتریکی آنها روی گرده بارهای مثبت و منفی القا می‌کند، به طوری که آن سمت گرده که به طرف زنبور است دارای بار منفی می‌شود و به این ترتیب گرده به سوی زنبور کشیده می‌شود (شکل ۱-۱ ب). گرده‌ها روی موپه‌های ریز زنبور قرار می‌گیرند و سپس وقتی زنبور در اطراف کلاله گل دیگری پرواز می‌کند، بارهایی منفی را بر روی کلاله القا می‌کند. هرگاه نیروی الکتریکی وارد از کلاله بزرگ‌تر از نیروی الکتریکی وارد از زنبور بر گرده باشد، گرده به سمت کلاله گل کشیده می‌شود (شکل ۱-۱ پ) و گرده افشانی صورت می‌پذیرد.



الف) اجزای بساک و کلاله یک گل

ب) اثر حضور زنبور، روی گرده نزدیک بساک، بار القا شده است.

پ) الکترونی‌هایی که در نوک کلاله جمع شده‌اند، گرده را جذب می‌کنند.

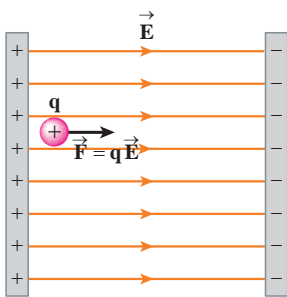
شکل ۱-۱

۱- در حل این مسئله از نیروی شناوری که هوا به بادکنک وارد می‌کند چشم‌پوشی کرده‌ام.

رسوب‌دهنده‌های الکتروستاتیکی، دود و غبار را از گازهای زائدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌آید، جدا می‌سازند. در مورد چگونگی کار این رسوب‌دهنده‌ها تحقیق کنید.



شکل ۱۱-۱ ذره با بار $+q_2$ در میدان الکتریکی فضای اطراف بار $+q_1$ رها شده است.

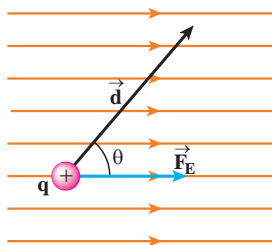


شکل ۱۲-۱ بار الکتریکی $+q$ از مجاورت صفحه مثبت رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.



$$\vec{F} = m\vec{g}$$

شکل ۱۳-۱ جسم از نزدیکی سطح زمین رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.



شکل ۱۴-۱ نیروی الکتریکی وارد بر بار $+q$ در حین جابه‌جایی \vec{d} درون میدان الکتریکی یکنواخت.

۶-۱- انرژی پتانسیل الکتریکی

آرایش دو ذره باردار الکتریکی شکل ۱۱-۱ را در نظر بگیرید که در آن، بار $+q_1$ در جای خود ثابت و بار $+q_2$ در فضای اطراف آن رها شده است. می‌دانیم بار $+q_2$ بر اثر میدان الکتریکی حاصل از بار $+q_1$ از آن رانده و دارای انرژی جنبشی می‌شود. به نظر شما این انرژی جنبشی از کجا آمده است؟ طبق قانون پایستگی انرژی، انرژی جنبشی نمی‌تواند خود به خود به وجود آمده باشد. این انرژی، ناشی از انرژی پتانسیلی است که به نیروی الکتریکی بین دو ذره آرایش شکل ۱۱-۱ وابسته است و به آن **انرژی پتانسیل الکتریکی** می‌گوییم. برای آنکه به توصیفی کمی از این انرژی دست یابیم، میدان الکتریکی یکنواختی را مطابق شکل ۱۲-۱ در نظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحه باردار برقرار شده است. اگر بار الکتریکی $+q$ را از مجاورت صفحه مثبت رها کنیم، به طرف صفحه منفی شروع به حرکت می‌کند و به تدریج سرعت و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد. این وضعیت شبیه چیزی است که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم. در آنجا نیز مشاهده کردیم که وقتی جسمی به جرم m از ارتفاع h رها می‌شود، جسم رو به پایین حرکت کرده و انرژی جنبشی آن بر اثر کاهش انرژی پتانسیل گرانشی به تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۱۳-۱). همچنین دیدیم تغییر انرژی پتانسیل گرانشی برابر با منفی کار نیروی گرانشی است.

در اینجا نیز می‌توان گفت: **تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک ذره باردار در میدان الکتریکی**

\vec{E} در یک جابه‌جایی مشخص برابر با منفی کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی در همان جابه‌جایی است؛ یعنی:

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

گرچه این رابطه برای یک میدان الکتریکی یکنواخت بیان شد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر میدان الکتریکی ناشی از بارهای ساکن (میدان الکتروستاتیکی) برقرار است.

تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک بار ذره‌ای در میدان الکتریکی یکنواخت:

ذره‌ای q در میدان الکتریکی یکنواخت \vec{E} در نظر بگیرید که مطابق شکل ۱۴-۱ جابه‌جایی \vec{d} را انجام داده است. کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

با توجه به اینکه $\vec{F}_E = q\vec{E}$ است، این رابطه به صورت زیر می‌آید:

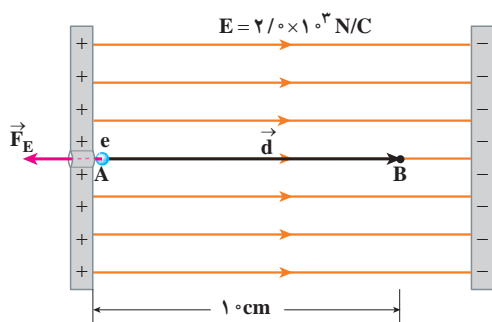
$$W_E = |q| E d \cos\theta$$

اکنون با استفاده از رابطه ۸-۱ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار ذره‌ای q چنین محاسبه می‌شود:

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

که در آن، θ زاویه بین نیروی \vec{F}_E و جابه‌جایی \vec{d} است. در این رابطه، بار الکتریکی (q) بر حسب کولن (C)، بزرگی میدان الکتریکی (E) بر حسب نیوتون بر کولن (N/C)، اندازه جابه‌جایی (d) بر حسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی (ΔU_E) بر حسب ژول (J) است. توجه کنید که رابطه ۸-۱ چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است. به این منظور، مثال زیر را ملاحظه کنید.

مثال ۱۳-۱



در میدان الکتریکی یکنواخت نشان داده شده در شکل، الکترونی از نقطه A با سرعت v_0 پرتاب شده است. الکترون سرانجام در نقطه B متوقف می‌شود. بار الکترون $1/6 \times 10^{-19} C$ و جرم آن $9/1 \times 10^{-31} kg$ است.

الف) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون در این جابه‌جایی چه مقدار است؟

ب) سرعت پرتاب الکترون را پیدا کنید.

پاسخ:

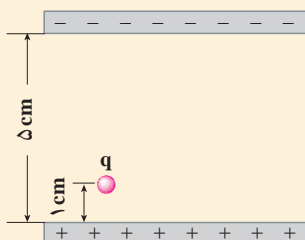
الف) با توجه به رابطه ۸-۱ داریم:

$$\begin{aligned} \Delta U_E &= -|q| E d \cos\theta = -(1/6 \times 10^{-19} C)(2/0 \times 10^3 N/C)(10 \times 10^{-2} m)(\cos 180^\circ) \\ &= 3/2 \times 10^{-17} J \end{aligned}$$

ب) طبق قضیه کار و انرژی می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} W_E &= \Delta K \Rightarrow -\Delta U_E = \frac{1}{2} m (0 - v_0^2) \\ -3/2 \times 10^{-17} J &= \frac{1}{2} (9/1 \times 10^{-31} kg)(-v_0^2) \Rightarrow v_0 = 8/4 \times 10^6 m/s \end{aligned}$$

تمرین ۱۴-۱



مطابق شکل، یک غبار که دارای بار الکتریکی $1/0 \times 10^{-15} C$ و جرم $1/0 \times 10^{-8} g$ است در میدان الکتریکی یکنواخت $1/2 \times 10^5 N/C$ بین دو صفحه افقی قرار گرفته است. اگر غبار در ابتدا ساکن و به فاصله $1/0 cm$ از صفحه پایینی قرار داشته باشد، در چه مدتی به صفحه بالایی می‌رسد؟

۷-۱- پتانسیل الکتریکی

در رابطه ۸-۱ دیدیم که تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی برای هر ذره باردار (چه مثبت و چه منفی) علاوه بر بزرگی میدان الکتریکی و جابه‌جایی ذره، به بار الکتریکی آن نیز بستگی دارد؛ مثلاً با دوبرابر شدن بار ذره، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز دو برابر می‌شود. بنابراین، نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار ذره، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است. به این نسبت، **اختلاف پتانسیل الکتریکی** دو نقطه‌ای می‌گوییم که ذره میان آنها جابه‌جا شده است و آن را با ΔV نمایش می‌دهیم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \quad (9-1)$$

در این رابطه، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی (ΔU) بر حسب ژول (J)، بار الکتریکی (q) بر حسب کولن (C) و اختلاف پتانسیل الکتریکی (ΔV) بر حسب ژول بر کولن (J/C) است که آن را **ولت** می‌نامند و با نماد V نمایش می‌دهند.

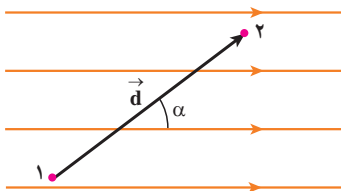
توجه کنید که در این رابطه، علامت q در نظر گرفته می‌شود. همچنین دقت کنید که هرچند این رابطه برای میدان الکتریکی یکنواخت به‌دست آمده است، اما برای تمامی میدان‌های الکتروستاتیکی نیز برقرار است.

با استفاده از روابط ۸-۱ و ۹-۱ می‌توان نشان داد در میدان الکتریکی یکنواخت شکل

۱۵-۱ داریم:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = -E d \cos \alpha \quad (10-1)$$

در این رابطه، اختلاف پتانسیل (ΔV) بر حسب ولت (V)، میدان الکتریکی (E) بر حسب ولت بر متر (V/m)، جابه‌جایی (d) بر حسب متر (m) و α زاویه بین میدان الکتریکی و جابه‌جایی است. همان‌طور که مشخص است این رابطه به ازای $\alpha = 0^\circ$ به $\Delta V = -Ed$ می‌انجامد.



شکل ۱۰-۱ در این شکل α زاویه بین میدان الکتریکی و جابه‌جایی است.

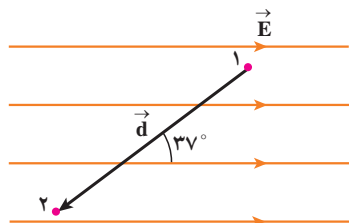
فعالیت ۳-۱

الف) درستی رابطه ۱-۱ را یک بار برای بار مثبت و یک بار برای بار منفی نشان دهید.
ب) نشان دهید یک‌گانه‌های «نیوتون بر کولن» و «ولت بر متر» که برای میدان الکتریکی به کار می‌روند، معادل یکدیگرند.

از فعالیت ۳-۱ الف درمی‌یابیم با حرکت در سوی خطوط میدان، از پتانسیل الکتریکی بیشتر

به پتانسیل الکتریکی کمتر رفته‌ایم و بالعکس.

مثال ۱-۱۳



در میدان الکتریکی یکنواخت شکل مقابل که بزرگی آن $E = 5 \times 10^5 \text{ V/m}$ است: (الف) اختلاف پتانسیل الکتریکی بین نقاط ۱ و ۲ را بیابید. (ب) اگر بار نقطه‌ای $q = +2 \text{ nC}$ از نقطه ۱ به نقطه ۲ جابه‌جا شود، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن و کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی را به دست آورید. ($\cos 37^\circ = 0.8$ و $d = 1 \text{ cm}$)

پاسخ: (الف) با استفاده از رابطه ۱-۱۰ داریم:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = -E d \cos \alpha$$

دقت کنید که α زاویه بین خطوط میدان و جابه‌جایی و برابر با $18^\circ - 37^\circ$ است؛ در نتیجه داریم:

$$\Delta V = -(5 \times 10^5 \text{ V/m})(1 \times 10^{-2} \text{ m})(-0.8) = 4 \times 10^4 \text{ V}$$

(ب) با استفاده از رابطه ۱-۹ داریم:

$$\Delta U = q\Delta V = (2 \times 10^{-9} \text{ C})(4 \times 10^4 \text{ V}) = 8 \times 10^{-5} \text{ J} = 8 \mu\text{J}$$

و از آنجا

$$W_E = -\Delta U = -8 \mu\text{J}$$

در تشابه با انرژی پتانسیل گرانشی، در اینجا نیز می‌توانیم برای انرژی پتانسیل الکتریکی مرجعی اختیار کنیم. در نقطه مرجع، انرژی پتانسیل الکتریکی ذره باردار، صفر و پتانسیل الکتریکی در آن نقطه نیز صفر است. بنابراین، پتانسیل الکتریکی (V) در هر نقطه از میدان به صورت زیر می‌شود:

$$V = \frac{U}{q} \quad (11-1)$$

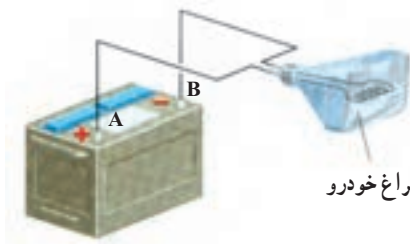
شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا رادیو از آنها استفاده می‌شود و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها معمولاً $1/5$ ولتی، $4/5$ ولتی یا ۹ ولتی اند. باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ ولتی یا بیشترند. هر باتری دو پایانه دارد که یکی مثبت و دیگری منفی است. وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایانه‌های منفی و مثبت آن برابر ۱۲ ولت است. اگر پتانسیل پایانه منفی را با $-V$ و پتانسیل پایانه مثبت را با $+V$ نشان دهیم، داریم:

$$\Delta V = V_+ - V_- = 12 \text{ V}$$

بنابراین، پتانسیل پایانه مثبت به اندازه ۱۲ ولت از پتانسیل پایانه منفی آن بیشتر است. مثلاً اگر پتانسیل پایانه منفی را برابر با -4 V یا $+4 \text{ V}$ فرض کنیم، پتانسیل پایانه مثبت به ترتیب برابر $+8 \text{ V}$ یا $+16 \text{ V}$ خواهد شد. می‌توان پایانه منفی را مرجع پتانسیل در نظر گرفت؛ در این صورت، پتانسیل پایانه مثبت برابر $+12 \text{ V}$ می‌شود. معمولاً (به خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین یا نقطه‌ای از مدار را برابر صفر می‌گیرند و به آن نقطه اصطلاحاً **نقطه زمین** می‌گویند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به آن می‌سنجند.

تمرین ۱-۵

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



اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر ۱۲۷ است. اگر در مدت ۱۰s بار الکتریکی ۵۰- کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟

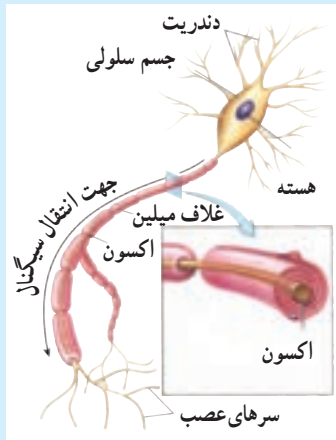
پاسخ: با استفاده از رابطه ۱-۹ داریم:

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

$$\Delta U = q\Delta V = q(V_+ - V_-)$$

$$= (-50\text{C})(+127\text{V}) = -6350\text{J}$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه 6350J کاهش یافته است.



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

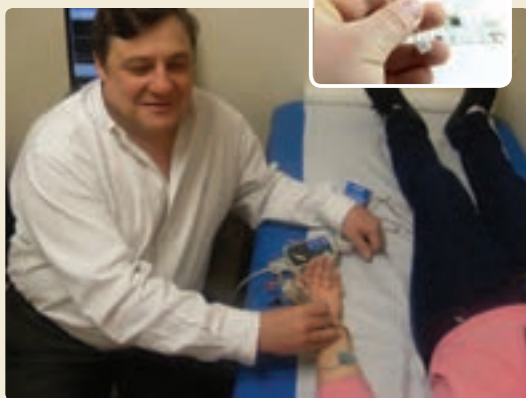
مطالعه آزاد

الکتروکاردیوگرافی و الکترومیوگرافی



در الکتروکاردیوگرافی که به اختصار EKG یا ECG خوانده می‌شود، با قرار دادن الکترودهای این دستگاه روی قفسه سینه، مچ، بازو و یا سایر بخش‌های بدن، سیگنال‌های الکتریکی ناشی از فعالیت قلب ثبت و اختلاف پتانسیل بین بخش‌های مختلف بدن (که عموماً بیش از چند mV نیست) اندازه‌گیری می‌شود. این اختلاف پتانسیل‌ها نشانگر اختلاف پتانسیل‌های بین ناحیه‌های مختلف قلب اند و در نتیجه روش حساسی برای آشکارسازی هر ناهنجاری در فعالیت قلب محسوب می‌شوند.

در الکترومیوگرافی که به اختصار EMG خوانده می‌شود، سوزن نازکی که حاوی دو الکتروود است به درون ماهیچه



دست بیمار فرو برده می شود و سیگنال های الکتریکی حاصل از این ماهیچه ها ثبت و اختلاف پتانسیل بین الکترودها با استفاده از ولت سنج حساسی اندازه گیری می شود. بدین ترتیب پزشک می تواند فعالیت الکتریکی ماهیچه ها را بکاود و بیماری های عصبی - ماهیچه ای را تشخیص دهد.

کار انجام شده توسط نیروی خارجی :

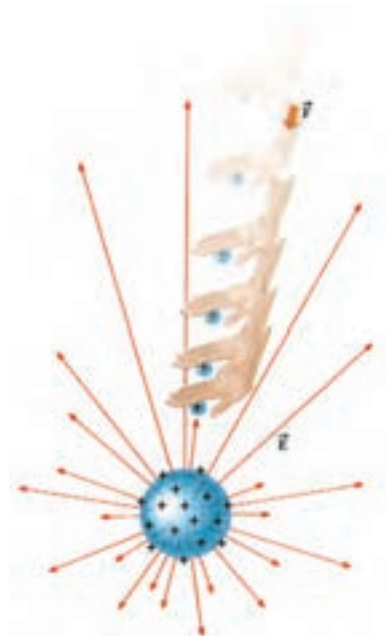
فرض کنید در یک میدان الکتریکی ذره ای با بار q را با اعمال نیرویی از نقطه ای به نقطه ای دیگر جابه جا می کنیم (شکل ۱-۱۶). در حین این حرکت، نیروی خارجی ما کار $W_{\text{خارجی}}$ را روی بار انجام می دهد، در حالی که نیروی الکتریکی نیز کار W_E را روی آن انجام داده است. با استفاده از قضیه کار - انرژی، تغییر انرژی جنبشی بار q چنین می شود:

$$\Delta K = W_{\text{خارجی}} + W_E$$

حال فرض کنید که بار q پیش و پس از این حرکت ساکن باشد. آنگاه معادله بالا به صورت زیر درمی آید :

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

که در آن از رابطه های ۱-۷ ($W_E = -\Delta U_E$) و ۱-۹ ($\Delta U = q\Delta V$) استفاده کرده ایم. بسته به علامت و بزرگی q و ΔV ، کار $W_{\text{خارجی}}$ می تواند مثبت، منفی یا صفر باشد.



شکل ۱-۱۷ نیروی دست، بار $+q$ را در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه جا می کند.

تمرین ۱-۷

در شکل ۱-۱۶

الف) کار نیروی دست، مثبت است یا منفی؟

ب) آیا بار مثبت به نقطه ای با پتانسیل بیشتر حرکت کرده است یا به نقطه ای با پتانسیل

کمتر؟ توضیح دهید.

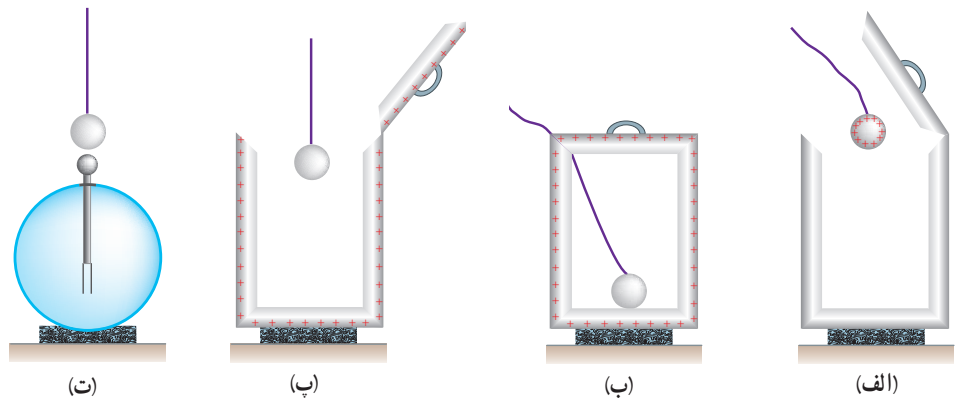
۸- توزیع و القای بار در رساناها

جسم رسانایی را در نظر بگیرید که توسط عایقی از محیط اطراف خود جدا شده است (به این رسانا اصطلاحاً رسانای منزوی گفته می شود). اگر باری اضافی به این جسم رسانا داده شود، و یا آن جسم در یک میدان الکتریکی خارجی قرار گیرد پس از مدت زمان کوتاهی (از مرتبه 10^{-9} s) میدان الکتریکی داخل رسانا صفر می شود. در ادامه این دو وضعیت را بررسی می کنیم.

الف) رسانای باردار : نخستین بار بنیامین فرانکلین برای بی بردن به اینکه بار الکتریکی داده شده به رسانای منزوی چگونه در آن توزیع می شود، آزمایشی را در سال ۱۷۵۵ میلادی انجام داد. تقریباً ۸۰ سال بعد (۱۸۳۶ میلادی) این آزمایش توسط مایکل فارادی انگلیسی به گونه ای دیگر تکرار شد.

آزمایش فارادی : ظرف رسانایی با درپوش فلزی را در نظر بگیرید که روی پایه نارسنایی قرار دارد و روی درپوش آن دسته ای عایق نصب شده است. ابتدا ظرف بدون بار است. یک گوی فلزی را که از نخ عایق آویزان است باردار و سپس وارد ظرف می کنیم (شکل ۱۷-۱ الف) آنگاه درپوش فلزی را می بندیم. اکنون گوی را با کف ظرف تماس می دهیم (شکل ۱۷-۱ ب) سپس گوی را کمی بالا می کشیم و بعد درپوش فلزی را با دسته عایقش برمی داریم (شکل ۱۷-۱ پ). پس از خارج کردن گوی فلزی از ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می کنیم. مشاهده می شود عقربه الکتروسکوپ تکان نمی خورد (شکل ۱۷-۱ ت).

از این آزمایش نتیجه می گیریم که بار اضافی یک رسانای منزوی روی سطح خارجی آن توزیع می شود. به عبارتی، وقتی در شکل ۱۷-۱ ب گوی با کف ظرف تماس پیدا می کند مجموعه گوی و ظرف، رسانایی را تشکیل می دهند که در سطح خارجی این جسم رسانای مرکب بار مشابه شکل ۱۷-۱ ب توزیع می شود.



شکل ۱۷-۱ شرحی تصویری از آزمایش فارادی

شعایت ۱-۵



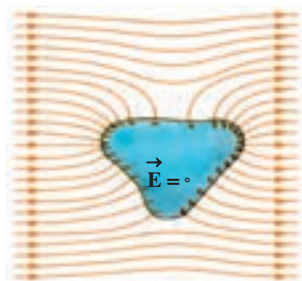
الف) قفس یا حفاظ فارادی، مبتنی بر آزمایش فارادی است. در مورد آن و کاربردهایش تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

ب) تحقیق کنید چرا معمولاً شخصی که در داخل اتومبیل است از خطر آذرخش در امان می ماند.

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

ب) رسانای منزوی و خنثی در میدان الکتریکی خارجی : اگر یک رسانای خنثی منزوی

در یک میدان الکتریکی خارجی قرار داده شود الکترون‌های آزاد رسانا طوری روی سطح خارجی آن توزیع می‌شوند که اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی کنند و میدان خالص درون رسانا صفر شود (شکل ۱۸-۱).



شکل ۱۸-۱ یک رسانای بدون بار که در یک میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است. الکترون‌های آزاد خود را طوری در رسانا پخش کرده‌اند که میدان الکتریکی خالص داخل رسانا صفر شود.

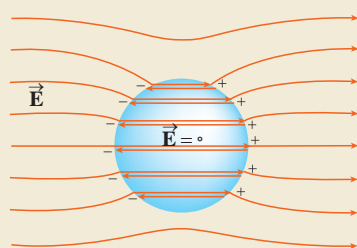
مطالعه آزاد

میدان و پتانسیل الکتریکی در داخل و روی سطح رسانای منزوی : در هر دو مورد الف و ب میدان الکتریکی

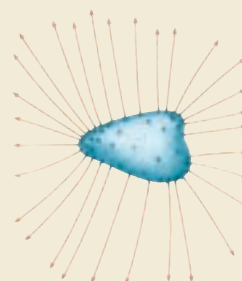
داخل رسانا پس از مدتی برابر صفر می‌شود؛ زیرا در غیراین صورت، این میدان باید نیروهایی بر الکترون‌های آزاد داخل رسانا وارد کند و در نتیجه جریانی در داخل رسانا ایجاد شود؛ یعنی بارها از جایی به جای دیگر انتقال یابند. ولی چنین جریانی داخل یک رسانا وجود ندارد، که این بدین معناست که بارها در **تعادل الکتروستاتیکی** قرار دارند.

افزون بر این، اگر روی سطح رسانا که در تعادل الکتروستاتیکی است میدان الکتریکی وجود داشته باشد، این میدان باید عمود بر سطح رسانا باشد؛ چرا که در غیراین صورت میدان مؤلفه‌ای مماس بر سطح رسانا خواهد داشت و این مؤلفه باعث حرکت الکترون‌های آزاد بر سطح رسانا می‌گردد که این در تناقض با شرط تعادل الکتروستاتیکی است (شکل‌های ۱-۱۹- الف و ب). چون میدان درون رسانایی که در تعادل الکتروستاتیکی است، برابر صفر است و میدان روی سطح رسانا عمود بر این سطح است، کار نیروی الکتریکی در هر جابه‌جایی بار در داخل و روی سطح رسانا صفر است و در نتیجه همهٔ نقاط داخل و روی سطح این رسانا، پتانسیل یکسانی دارند. به عبارتی دیگر :

$$\Delta U = -W_E = 0 \Rightarrow \Delta V = \frac{\Delta U}{q} = 0$$

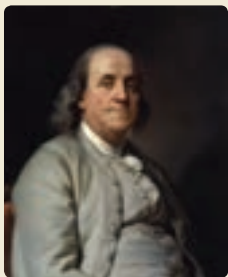


ب) میدان الکتریکی خارجی باعث جدا شدن بارهای مثبت و منفی در دو وجه رسانا نشده است، به طوری که میدان خارجی در داخل رسانا را خنثی می‌کند. (توجه کنید که دو خط هر جفت خطوط میدان نشان داده شده در داخل رسانا منطبق بر هم هستند و برای آنکه دیده شوند، با فاصلهٔ اندکی از هم رسم نشده‌اند).



الف) میدان الکتریکی یک رسانای باردار در همه جا عمود بر سطح این رسانا است.

شکل ۱۹-۱



بنیامین فرانکلین

بنیامین فرانکلین دانشمند، نویسنده و سیاستمدار آمریکایی در ۱۷ ژانویه سال ۱۷۰۶ میلادی (۸۵ هجری شمسی) در شهر بوستون به دنیا آمد و در ۱۷ آوریل سال ۱۷۹۰ میلادی (۱۱۶۹ هجری شمسی) در شهر فیلادلفیا دیده از جهان فرویست. فرانکلین در حدود سال ۱۷۴۴ میلادی با مبحث الکتروسیستیمه آشنا شد و عمده کشفیات مهم و بزرگ خویش را در بین سال‌های ۱۷۳۷ و ۱۷۵۱ به انجام رسانید و به شهرت علمی بی‌سابقه‌ای رسید. جالب است که او برخلاف سایر دانشمندان بزرگ، پس از چهل سالگی کارهای علمی اساسی خود را آغاز کرد. پیش از این تاریخ او مجالی برای پرداختن به مسائل علمی و تحقیقاتی نداشت. مهم‌ترین اثر فرانکلین، کتاب «در باب الکتروسیستیمه» است که بسیاری آن را با کتاب «اصول ریاضیات» / *Scholarly Newton* مقایسه کرده‌اند. فرانکلین در این کتاب شالوده و بنیاد اصول علم الکتروسیستیمه را بر مبنای تجربیات و مشاهدات علمی خود تشریح کرده است و کمتر مبحثی در الکتروستاتیک است که از دید این کتاب پنهان مانده باشد. در واقع تجربیات متعدد و مهم فرانکلین آغازگر دوره‌ای جدید در مبحث الکتروسیستیمه بوده است و بسیاری از واژگانی که ما امروزه در الکتروسیستیمه به کار می‌گیریم نخستین بار توسط فرانکلین به کار برده شده است. تبحر و استادی فرانکلین در راه و رسم آزمایش و بیان واضح وی از مفاهیم فیزیکی و بالاخره کشفیات مهم او موجب ارج و قرب علوم تجربی در قرن هجدهم شد.

چگالی سطحی بار الکتریکی رسانا: دیدیم که بار الکتریکی اضافی روی سطح خارجی رسانا توزیع می‌شود. بنا به تعریف، چگالی سطحی بار برابر با بار الکتریکی جسم رسانا بخش بر مساحت سطح آن جسم است. اگر بار الکتریکی جسم برابر q و مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده است برابر A باشد چگالی سطحی بار که با نماد σ نشان داده می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (13-1)$$

در این رابطه، بار الکتریکی (q) بر حسب کولن (C)، مساحت (A) بر حسب متر مربع (m^2) و در نتیجه چگالی سطحی بار (σ) بر حسب کولن بر متر مربع (C/m^2) است. در نبود میدان الکتریکی خارجی، چگالی سطحی بار الکتریکی یک رسانای کروی در همه نقاط سطح خارجی آن یکسان است. اما در اجسامی که سطح خارجی آنها شکل تقارنی کروی ندارد چگالی سطحی بار در همه جای سطح خارجی یکسان نیست.

آزمایش ۲-۱

چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی جسم رسانای منزوی

وسایل آزمایش: مخروط فلزی یا ورقه آلومینیومی ضخیم، پایه عایق، گلوله فلزی کوچک با دسته عایق، الکتروسکوپ، مولد و اندوگراف یا دستگاه مشابه دیگر برای ایجاد بار

شرح آزمایش:

۱- اگر مخروط فلزی ندارید با استفاده از ورقه آلومینیومی ضخیم، یک مخروط بسازید و روی پایه عایق قرار دهید.

۲- با تماس مخروط فلزی با کلاهک مولد و اندوگراف آن را باردار کنید.

۳- گلوله فلزی را با دسته عایق آن بگیرید و گلوله را با نوک تیز مخروط تماس دهید.

سپس گلوله را به کلاهک الکتروسکوپ تماس دهید. چه چیزی مشاهده می‌کنید؟

۴- گلوله فلزی و الکتروسکوپ را با تماس با دستتان خنثی کنید، اینک گلوله را با

دسته عایق آن بگیرید و با بدنه مخروط فلزی تماس دهید. سپس گلوله را با کلاهک الکتروسکوپ تماس دهید. اکنون چه چیزی مشاهده می‌کنید؟

۵- مراحل ۳ و ۴ را چندبار تکرار

کنید. پیش از انجام دادن هر یک از مراحل ۳

و ۴، گلوله فلزی و الکتروسکوپ را با تماس

با دستتان خنثی کنید.



۶- از مشاهده‌های خود در انجام مراحل ۳ و ۴ و ۵ چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

آزمایش‌هایی مانند آزمایش ۱-۲ و نیز محاسبه نشان می‌دهد چگالی سطحی بار در نقاط نوک تیز سطح جسم رسانا از نقاط دیگر آن بیشتر است.

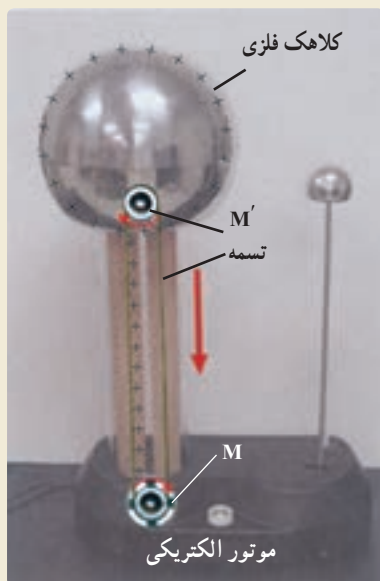
فعالیت ۱-۷

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

مطالعه آزاد

مولد واندوگراف

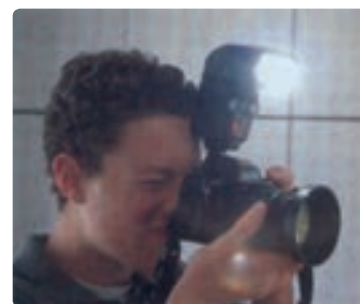
مولد واندوگراف دستگاهی است که بار الکتریکی روی کلاهک فلزی آن انباشته می‌شود. اگر یک جسم رسانا با کلاهک این دستگاه تماس پیدا کند، دارای بار الکتریکی می‌شود.



در نمونه ساده مولد واندوگراف، غلتک M توسط یک موتور الکتریکی می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود. معمولاً غلتک M از جنس پلی‌اتیلن و غلتک M' از جنس پرسیکس است. بر اثر مالش تسمه با غلتک‌ها، غلتک M بار منفی و غلتک M' بار مثبت پیدا می‌کند. غلتک M که بار منفی دارد، در یک شانه فلزی که متصل به زمین است، بار مثبت القا می‌کند. بار مثبت توسط این شانه روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می‌شود. این بارهای مثبت، توسط تسمه که عایق است به کمک شانه فلزی دیگری که به کلاهک متصل است به سطح خارجی کلاهک منتقل می‌شود. به این ترتیب، بار الکتریکی مثبت روی سطح خارجی کلاهک انباشته می‌شود. اگر جای غلتک‌های M و M' با هم عوض شود، بار منفی در سطح خارجی کلاهک انباشته خواهد شد.

۱-۹- خازن

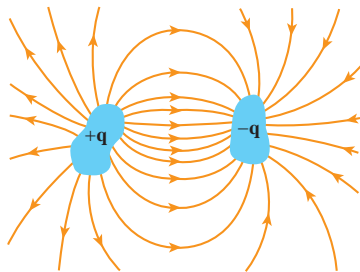
خازن وسیله‌ای الکتریکی است که می‌تواند بار الکتریکی و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند. مثلاً باتری‌های یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در خازن فلاش دوربین ذخیره می‌کنند (شکل ۱-۲۰). توجه کنید باتری‌ها می‌توانند انرژی را فقط با آهنگ نسبتاً کمی به مدار بدهند که این برای گسیل جرقه نور از فلاش دوربین بسیار کم است، اما وقتی خازن باردار می‌شود، می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار بیشتری برای فلاش زدن آماده کند.



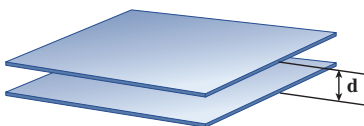
شکل ۱-۲۰ انرژی فلاش دوربین در یک خازن ذخیره شده است.



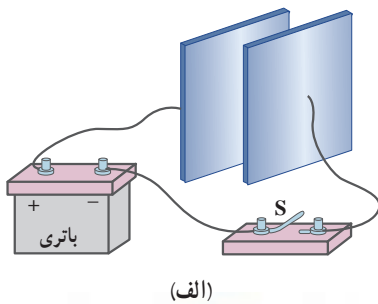
شکل ۱-۲۱ تصویری از چند خازن مختلف



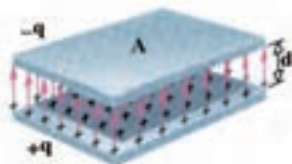
شکل ۱-۲۲ دو رسانا که به طور الکتریکی از یکدیگر و محیط اطراف خود منزوی شده‌اند، تشکیل یک خازن را می‌دهند.



شکل ۱-۲۳ یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت A ساخته شده است که به فاصله d از هم قرار گرفته‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۱-۲۴ الف) برای باردار کردن خازن، آن را به باتری وصل کرده‌ایم. ب) هر صفحه این خازن بارهایی با علامت مخالف قرار دارد و میدان الکتریکی عمود بر صفحه‌ها و از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است.

شکل ۱-۲۱ چند خازن را در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۱-۲۲ اجزای اصلی هر خازن را نشان می‌دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. بی توجه به شکل آنها و اینکه آیا تخت هستند یا نه، این رساناها را **صفحه خازن** می‌نامیم. شکل ۱-۲۳ آرایش خازنی موسوم به **خازن تخت** را نشان می‌دهد که شامل دو صفحه رسانای موازی با مساحت A است که به فاصله d (که در برابر ابعاد صفحه‌ها ناچیز است) از هم قرار گرفته‌اند. گرچه نمادی که برای نشان دادن یک خازن به کار می‌بریم $\left(\begin{array}{|c|} \hline | \\ \hline \end{array} \right)$ مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن‌ها با هر شکلی استفاده می‌شود. خازن‌ها به طور گسترده‌ای در مدارهای الکترونیکی وسایلی مانند رادیو، تلویزیون، رایانه و... به کار می‌روند؛ مثلاً شکل ۱-۲۴ مدار یک تقویت کننده (آمپلی فایر) را نشان می‌دهد که در آن چندین خازن به کار رفته است. برخی از این خازن‌ها با پیکان‌هایی مشخص شده‌اند.



شکل ۱-۲۴ مدار یک تقویت کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن‌ها با پیکان مشخص شده‌اند.

باردار (شارژ) کردن خازن: روش ساده و مرسوم برای باردار کردن خازن قرار دادن

آن در مدار الکتریکی ساده‌ای است که دارای یک باتری است (شکل ۱-۲۵ الف). وقتی کلید S بسته شود بار از طریق سیم رسانا جریان می‌یابد. این بار همان الکترون‌هایی هستند که توسط میدان الکتریکی ای که باتری در سیم‌ها ایجاد می‌کند در طول سیم‌ها به حرکت واداشته می‌شوند. میدان الکتریکی، الکترون‌ها را از صفحه متصل به پایانه مثبت باتری به حرکت در می‌آورد. در نتیجه، این صفحه با از دست دادن الکترون دارای بار مثبت می‌شود. این میدان، درست همین تعداد الکترون را از پایانه منفی باتری به صفحه‌ای می‌راند که از طریق کلید به پایانه منفی باتری متصل است. در نتیجه، این صفحه با به دست آوردن الکترون دارای بار مثبت شده است. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحه خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانه باتری یکسان شود. با توجه به اینکه صفحه‌های

۱- parallel - plate capacitor

خازن رساناست تمام نقاط هر صفحه پتانسیل یکسانی دارد و خطوط میدان الکتریکی عمود بر این صفحه‌ها و از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است (شکل ۱-۲۵-ب). وقتی یک خازن باردار می‌شود، صفحه‌های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی علامت مخالف می‌شود: $+q$ و $-q$. ولی بار یک خازن را به صورت q نشان می‌دهند که همان بار صفحه مثبت است.

۱-۱۰- ظرفیت خازن

اگر اختلاف پتانسیل بین صفحه‌های خازن (ΔV) را زیاد کنیم، بار خازن (q) نیز به همان نسبت زیاد می‌شود. به عبارتی نسبت $\frac{q}{\Delta V}$ همواره مقداری ثابت است. به این نسبت که به اندازه بار خازن و نیز اختلاف پتانسیل دو صفحه آن بستگی ندارد **ظرفیت خازن** می‌گویند و آن را با C نشان می‌دهند. بنا به دلایل تاریخی قدر مطلق اختلاف پتانسیل ΔV بین دو صفحه خازن را با V نمایش می‌دهند. بنابراین:

$$C = \frac{q}{V} \quad (14-1)$$

در رابطه ۱۴-۱ یکای بار الکتریکی، کولن (C)، یکای اختلاف پتانسیل، ولت (V) و بنابراین یکای ظرفیت، کولن بر ولت (C/V) است که به پاس خدمات مایکل فارادی، **فاراد** (F) نامیده شده است. *فاراد* یکای بسیار بزرگی است و عملاً ظرفیت اکثر خازن‌های متداول در محدوده پیکوفاراد ($10^{-12}F$) تا میلی‌فاراد ($10^{-3}F$) است. گرچه امروزه فناوری ساخت خازن‌ها، دستیابی به ظرفیت‌هایی بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

مثال ۱-۱۵

صفحه‌های خازنی را به پایه‌های مولدی با اختلاف پتانسیل $24/0V$ وصل می‌کنیم. اگر بار خازن $120\mu C$ شود الف) ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

ب) اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل $36/0V$ وصل کنیم، بار الکتریکی آن چقدر می‌شود؟

پاسخ:

الف) با استفاده از رابطه ۱۴-۱ داریم:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{1/20 \times 10^{-4} C}{24/0 V} = 5/00 \times 10^{-6} F = 5/0 \mu F$$

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

آنگاه با استفاده از رابطه ۱۴-۱ می‌توان نوشت:

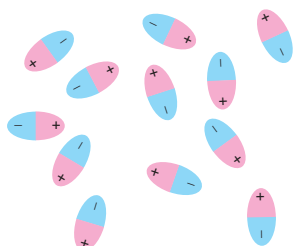
$$q = CV = (5/00 \times 10^{-6} F)(36/0 V) = 180 \times 10^{-6} C = 180 \mu C$$

۱-۱۱- خازن با دی‌الکتریک

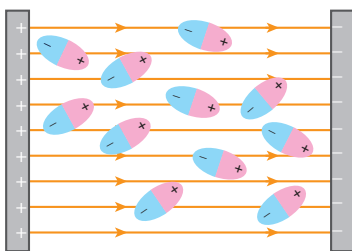
اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با ماده‌ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن **دی‌الکتریک** گفته می‌شود پر کنیم برای ظرفیت خازن چه پیش می‌آید؟ **مایکل فارادی** نخستین بار در

سال ۱۸۳۷ میلادی، با استفاده از وسایل ساده‌ای دریافت که ظرفیت خازن با ضربی موسوم به ثابت دی‌الکتریک ماده عایق (که آن را با κ نشان می‌دهند) افزایش می‌یابد؛ یعنی اگر ظرفیت خازن بدون دی‌الکتریک را با C_0 نمایش دهیم آنگاه ظرفیت خازن با دی‌الکتریک برابر با $C = \kappa C_0$ می‌شود. جدول ۱-۱ ثابت دی‌الکتریک چند ماده عایق را نشان می‌دهد.

| جدول ۱-۱- برخی از ویژگی‌های دی‌الکتریک‌ها در دمای 20°C | | |
|--|-----------------|------------------------|
| قدرت دی‌الکتریک (kV/mm) | ثابت دی‌الکتریک | ماده دی‌الکتریک |
| ۳ | ۱/۰۰۰۶ | هوای ۱ atm |
| ۶۰ | ۲/۱ | تفلون |
| ۱۰ | ۲/۲ | پارافین |
| ۲۴ | ۲/۶ | پلی استیرن |
| ۲۸۰ | ۳/۱ | میلار |
| ۲۹ | ۳/۴ | PVC (پلی وینیل کلراید) |
| ۱۶ | ۳/۵ | کاغذ |
| ۸ | ۴/۳ | کوارتز |
| ۱۴ | ۵ | شیشه پیرکس |
| ۱۵۰ | ۷ | میکا |
| ۶۵ | ۸۰ | آب |
| ۸ | ۳۱۰ | تیتانید استرانسیوم |



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



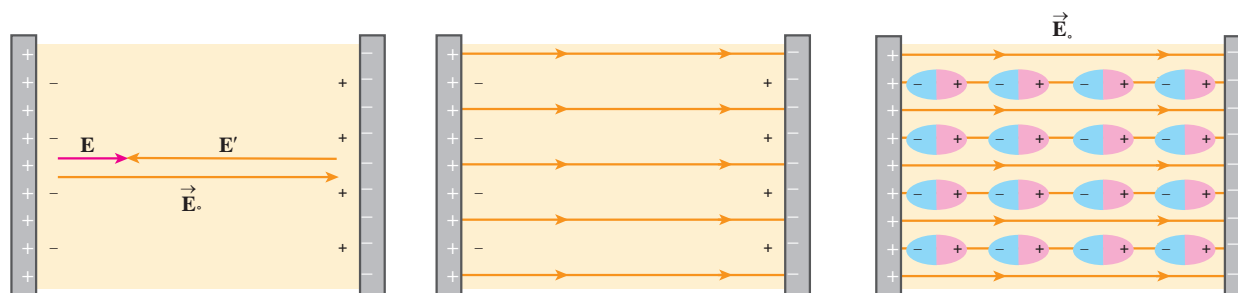
ب) در حضور میدان الکتریکی، مولکول‌های دو قطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی خارجی هم‌ردیف کنند.

شکل ۱-۳۷

حال پرسش این است که دی‌الکتریک چگونه ظرفیت خازن را افزایش می‌دهد؟ به این منظور 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 نوع اند: قطبی و غیرقطبی. وقتی یک دی‌الکتریک قطبی (مانند آب، NH_3 ، HCl) در میدان الکتریکی بین دو صفحه خازن قرار می‌گیرد، سر منفی مولکول‌های دو قطبی به طرف صفحه مثبت و سر مثبت آنها به طرف صفحه منفی کشیده می‌شود و در نتیجه این مولکول‌های دو قطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی بین دو صفحه خازن هم‌ردیف کنند (شکل ۱-۲۶). هم‌ردیفی این مولکول‌های دو قطبی، میدانی الکتریکی مانند \vec{E}' ایجاد می‌کند که جهت آن در خلاف جهت میدان الکتریکی

۱- از حروف الفبای یونانی که **کاپا** خوانده می‌شود.

\vec{E}_0 اولیه صفحه‌های خازن است. به این ترتیب، میدان الکتریکی برآیند \vec{E} در داخل دی‌الکتریک جمع برداری میدان‌های \vec{E}_0 و \vec{E}' می‌شود که جهت آن در همان جهت \vec{E}_0 ، ولی بزرگی آن از بزرگی \vec{E}_0 کوچک‌تر است (شکل ۱-۲۷).



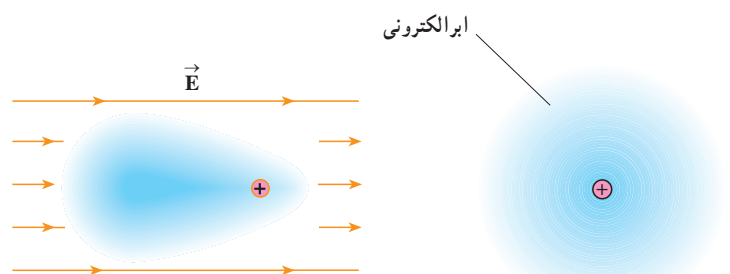
ب) میدان الکتریکی \vec{E}' حاصل از بارهای سطحی در خلاف جهت میدان الکتریکی \vec{E}_0 است. میدان الکتریکی برآیند \vec{E} در جهت \vec{E}_0 و کوچک‌تر از آن شده است.

ب) این هم‌ردیفی، بارهایی سطحی را روی دو وجه دی‌الکتریک ایجاد می‌کند که موجب تضعیف میدان الکتریکی خارجی می‌شود.

الف) مولکول‌های دو قطبی در حضور میدان الکتریکی خارجی \vec{E}_0 هم‌ردیف شده‌اند.

شکل ۱-۲۷

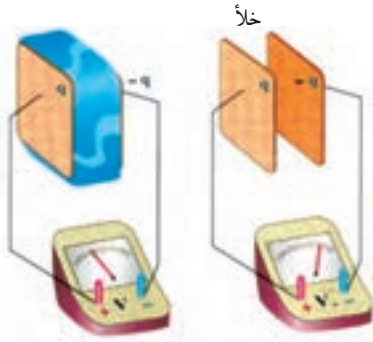
آنچه گفته شد برای دی‌الکتریک‌های غیرقطبی (مانند متان، بنزن و...) نیز برقرار است. وقتی مولکول‌های چنین دی‌الکتریک در میدان بین دو صفحه خازن قرار می‌گیرند بر اثر القاء قطبیده می‌شوند؛ یعنی میدان الکتریکی باعث می‌شود که ابر الکترونی این مولکول‌ها در خلاف جهت میدان جابه‌جا شود (شکل ۱-۲۸) و به این ترتیب، مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند و اصطلاحاً مولکول‌ها قطبیده می‌شوند.



ب) در حضور میدان الکتریکی، مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا شده‌اند و ابر الکترونی در خلاف جهت میدان جابه‌جا شده است.

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

شکل ۱-۲۸



شکل ۱-۲۹ با وارد شدن دی الکتریک در بین صفحه‌های خازن، اختلاف پتانسیل اولیه V_0 به مقدار کوچک‌تر V کاهش یافته است.



شکل ۱-۳۰ فروریزش الکتریکی باعث تشکیل مسیرهای رسانشی سرخس شکلی در دی الکتریک شده است.



شکل ۱-۳۱ تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل قابل تحمل بیشینه نوشته شده است.

پس از آن مانند مولکول‌های دی الکتریک قطبی، میدان بین دو صفحه خازن را تضعیف می‌کنند. دیدیم که در هر دو حالت با توجه به اینکه خازن متصل به باتری نیست، با قرار دادن دی الکتریک (چه قطبی و چه غیر قطبی) بین صفحه‌های خازن، میدان اولیه بین این صفحه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف پتانسیل بین دو صفحه نیز کاهش می‌یابد (شکل ۱-۲۹). بنابراین، طبق رابطه ۱-۱۴ و با توجه به اینکه بار ثابت مانده است، ظرفیت خازن افزایش می‌یابد:

$$C = \kappa C_0 \quad (15-1)$$

اثر دیگر حضور دی الکتریک‌ها در خازن، افزایش حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن است. اما در هر حال برای هر دی الکتریکی، بیشینه میدان و در نتیجه اختلاف پتانسیلی وجود دارد که از آن به بعد دی الکتریک اصطلاحاً دستخوش فروریزش الکتریکی می‌شود و به آن اختلاف پتانسیل بیشینه، پتانسیل فروریزش می‌گویند. مقدار بیشینه میدان الکتریکی ای که دی الکتریک می‌تواند بدون فروریزش تحمل کند را قدرت (استقامت) دی الکتریک^۱ می‌نامند. برخی از قدرت‌های دی الکتریک برحسب kV/mm در ستون دوم در جدول ۱-۱ داده شده است. به لحاظ میکروسکوپی، فروریزش الکتریکی ناشی از کنده شدن الکترون‌های اتم‌های ماده دی الکتریک توسط میدان الکتریکی و سپس رانده شدن این الکترون‌ها توسط میدان الکتریکی و ایجاد یک مسیر رسانایی بین دو صفحه خازن است که با ایجاد یک جرقه همراه است و معمولاً خازن را می‌سوزاند. خازن‌ها معمولاً با مقدار ظرفیت آنها و اختلاف پتانسیل بیشینه ای که می‌توانند تحمل کنند مشخص می‌شوند (شکل ۱-۳۱). به‌عنوان مثالی از کاربرد دی الکتریک، خازن تختی را در نظر بگیرید. آزمایش و محاسبه نشان می‌دهد که ظرفیت یک خازن تخت با مساحت صفحه‌های A و فاصله جدایی صفحه‌های d ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

که در آن ϵ_0 همان ضریب گذردهی الکتریکی خلاً ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$) است. حال اگر فضای بین صفحه‌های این خازن را با یک دی الکتریک با ثابت دی الکتریک κ کاملاً پر کنیم، رابطه (۱۶-۱) همان C_0 رابطه (۱۵-۱) می‌شود و در نتیجه برای ظرفیت خازن جدید داریم:

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

مثال ۱۷-۱

مساحت هریک از صفحه‌های خازن تختی $۴/۰ \times ۱۰^{-۲} \text{cm}^2$ و فاصله جدایی صفحه‌های آن $۱/۰ \times ۱۰^{-۱} \text{mm}$ است. فضای بین صفحه‌ها را با صفحه کاغذی پر می‌کنیم. با استفاده از جدول ۱-۱ کتاب، الف) ظرفیت خازن و ب) پتانسیل فروریزش الکتریکی آن را محاسبه کنید.

پاسخ:

الف) ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر است با

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

ثابت دی الکتریک کاغذ با استفاده از جدول ۱-۱ برابر با $۳/۵$ است و از آنجا برای ظرفیت خازن داریم:

$$C = (۳/۵)(۸/۸۵ \times ۱۰^{-۱۲} \text{F/m}) \frac{(۴/۰ \times ۱۰^{-۲} \text{m}^2)}{(۱/۰ \times ۱۰^{-۴} \text{m})} = ۱/۲ \times ۱۰^{-۸} \text{F} = ۱۲ \text{nF}$$

ب) با استفاده از رابطه $۱-۱۰$ به ازای $\alpha = ۰$ ($\Delta V = -Ed$) پتانسیل فروریزش را به دست می‌آوریم. همان‌طور که گفتیم در نمادگذاری این کتاب از نماد V برای نشان دادن قدرمطلق اختلاف پتانسیل صفحه‌های خازن استفاده می‌کنیم. بنابراین، منظور از پتانسیل فروریزش همان اختلاف پتانسیل بیشینه‌ای است که به فروریزش دی الکتریک خازن می‌انجامد. آنگاه با استفاده از جدول ۱-۱ داریم:

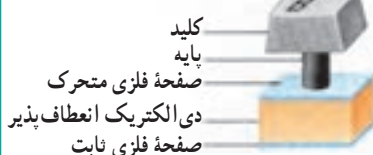
$$V_{\text{فروریزش}} = E_{\text{فروریزش}} d = (۱۶ \times ۱۰^۶ \frac{\text{V}}{\text{m}})(۱/۰ \times ۱۰^{-۴} \text{m}) = ۱/۶ \times ۱۰^۳ \text{V} = ۱/۶ \text{kV}$$

توجه کنید در محاسبه بالا از قدرت دی الکتریک به جای فروریزش E استفاده کردیم.

مثال ۱۷-۱



الف)



ب)

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

فاصله بین صفحه‌ها عموماً $۵/۰۰ \times ۱۰^{-۳} \text{m}$ است که این فاصله با فشار دادن کلید به $۰/۱۵۰ \times ۱۰^{-۳} \text{m}$ می‌رسد. مساحت صفحه‌ها $۹/۵۰ \times ۱۰^{-۵} \text{m}^2$ است و خازن از ماده‌ای با ثابت دی الکتریک $۳/۵$ پر شده است. تغییر ظرفیتی که با فشار دادن کلید، توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود چقدر است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه ۱-۱۷ ظرفیت خازن پیش از فشار دادن کلید برابر است با

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

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

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

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

فعالیت ۷-۱



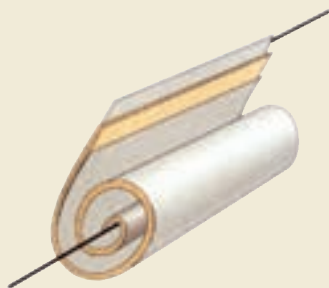
کیسه هوای خودرو

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

مطالعه آزاد

انواع خازن‌ها

غالباً خازن‌ها را براساس دی‌الکتریک آنها دسته‌بندی می‌کنند؛ مثلاً خازن کاغذی، الکتrolیتی، سرامیکی، میکا و... خازن‌ها بسیار متنوع‌اند؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی ساخته می‌شوند. در اینجا با چند نمونه خازن آشنا می‌شوید.



طرحی از یک خازن کاغذی

خازن‌های کاغذی: این خازن‌ها از دو ورقه قلع یا آلومینیوم تشکیل شده‌اند که بین آنها دو ورقه کاغذ ظریف و نازک آغشته به روغن جا داده می‌شود. این ورق‌ها را لوله می‌کنند و به صورت یک استوانه درمی‌آورند و در محفظه‌ای پلاستیکی یا پوشش مومی قرار می‌دهند (شکل روبه‌رو). ظرفیت این نوع خازن‌ها از 1 nF تا $1 \mu\text{F}$ است.

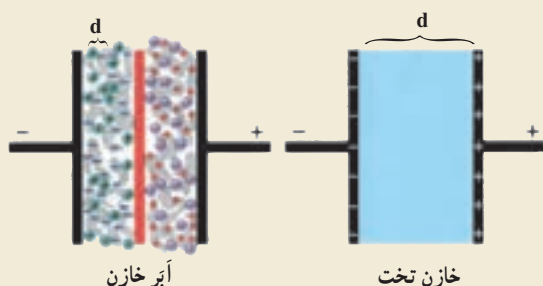
خازن‌های میکا: بین ورقه‌های فلزی نازک قلعی، ورقه‌های نازک میکا قرار می‌دهند و ورقه‌های قلع را یک در میان به یکدیگر وصل می‌کنند. ظرفیت این خازن‌ها حدود 50 تا 500 پیکوفاراد است.

خازن‌های سرامیکی: دی‌الکتریک این خازن‌ها سرامیک است که با استفاده از انواع سیلیکات‌ها در دمای بالا تهیه می‌شود. ثابت دی‌الکتریک این خازن‌ها زیاد و در حدود 1000 است. خازن‌های سرامیکی به شکل عدس تهیه می‌شوند و

حجم آنها کم است. صفحه‌های رسانای آنها نیز با ذوب نقره در دو طرف سرامیک تهیه می‌شود. ظرفیت این خازن‌ها حدود ده‌ها نانوفاراد (nF) است.

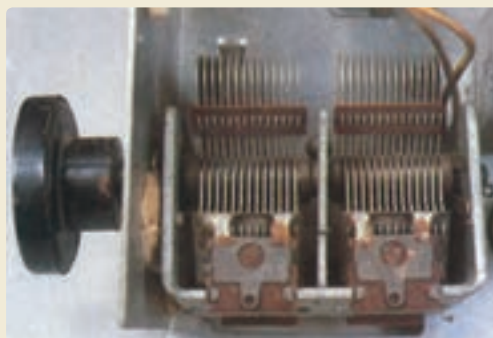
خازن‌های الکترولیتی: این نوع خازن‌ها از صفحه‌های آلومینیومی تشکیل شده‌اند که در میان آنها الکترولیت‌هایی از انواع مختلف فسفات یا کربنات قرار می‌دهند. در بین صفحه‌ها ماده‌ای اسفنجی است که الکترولیت را به خود جذب می‌کند. ظرفیت این خازن‌ها بالاست و تا حدود 10^5 F می‌رسد.

آبر خازن^۱: این نوع خازن‌ها می‌توانند با حجمی حدود $16/4 \text{ cm}^3$ ظرفیتی تا چند کیلوفاراد داشته باشند. صفحه‌های این نوع خازن‌ها که از نوعی الکترولیت پر شده‌اند با استفاده از موادی ساخته شده‌اند که در مقیاس نانو مساحت سطح بسیار بزرگی دارند. فناوری نانو به کار گرفته شده در این خازن‌ها به ظرفیت‌های بسیار بزرگی (از مرتبه کیلوفاراد) می‌انجامد. یکی از ویژگی‌های این خازن‌ها آن است که خیلی سریع‌تر از باتری‌های شارژ‌شدنی شارژ می‌شوند و می‌توان آنها را به دفعاتی تا هزاران بار بیشتر از این باتری‌ها شارژ کرد. همین ویژگی است که باعث استفاده از این خازن‌ها در وسایل نقلیه الکتریکی می‌شود.



طرحی از ساختار یک آبر خازن در مقایسه با یک خازن تخت معمولی. به تفاوت d ها توجه کنید. در عمل این تفاوت به مراتب بیشتر است. d در یک آبر خازن از مرتبه نانومتر است.

خازن‌های متغیر: دی‌الکتریک این خازن‌ها معمولاً هواست. در ساختمان آنها دو نوع صفحه فلزی، یک دسته ثابت و دسته دیگر متحرک به کار رفته است که هر دو دسته، روی یک محور قرار گرفته‌اند؛ ولی صفحه‌های متحرک روی این محور می‌چرخند. صفحه‌ها به شکل نیم دایره‌اند و با چرخیدن صفحه‌های متحرک، مساحت خازن کم و زیاد می‌شود. این نوع خازن‌ها در گیرنده‌های رادیویی به کار می‌رفته است.



تصویری از یک خازن متغیر

۱۲-۱- انرژی خازن

وقتی صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شوند در خازن انرژی نیز ذخیره می‌شود؛ مثلاً در هنگام شارژ شدن خازن توسط باتری، دائماً باری جزئی از یک صفحه خازن جدا و به همان اندازه به صفحه دیگر منتقل می‌شود. در این فرایند طبق رابطه ۱-۱۲ باتری روی این بار کار انجام می‌دهد. هنگام انتقال بار، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن نیز به آهستگی افزایش می‌یابد. بنابراین، برای انتقال بارهای بعدی به کار بیشتری نیاز است. بنا به رابطه ۱-۱۴ ($V = q/C$) و با توجه به اینکه در این فرایند ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است، می‌توانیم اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن را تابعی خطی از بار ذخیره شده در آن بدانیم که به‌طور یکنواخت از صفر تا V افزایش می‌یابد. بنابراین، در هنگام باردار شدن خازن می‌توان اختلاف پتانسیل متوسطی را به صورت $\bar{V} = \frac{V+0}{2} = \frac{V}{2}$ برای دو صفحه خازن در نظر گرفت. آنگاه با استفاده از رابطه ۱-۱۲، کار انجام شده برای باردار شدن کامل خازن برابر با حاصل ضرب کل بارهای جزئی منتقل شده (q) در اختلاف پتانسیل متوسط است:

$$W = q\bar{V} = q\left(\frac{V}{2}\right) = \frac{1}{2}qV$$

این کار به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی فضای بین صفحه‌های خازن

ذخیره می‌شود. بنابراین:

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2}qV \quad (18-1)$$

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

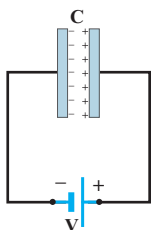
از طرفی با استفاده از رابطه ۱-۱۴ می‌توان نوشت:

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

و

$$U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} \quad (20-1)$$

مثال ۱۸-۱



دو سر یک خازن $0.5 \mu\text{F}$ را به ولتاژ 12V وصل می‌کنیم. بار و انرژی ذخیره در آن را محاسبه کنید.

پاسخ: با توجه به رابطه $q = CV$ بار ذخیره شده برابر است با

$$q = CV = (0.5 \times 10^{-6}\text{F})(12\text{V}) = 6 \times 10^{-6}\text{C} = 6 \mu\text{C}$$

با استفاده از رابطه $U = \frac{1}{2}qV$ انرژی خازن را محاسبه می‌کنیم:

$$U = \frac{1}{2}qV = \frac{1}{2}(6 \times 10^{-6}\text{C})(12\text{V}) = 36 \times 10^{-6}\text{J} = 3.6 \mu\text{J}$$

دستگاه رفع لرزش نامنظم قلب (دیفبریلاتور)



توانایی خازن برای ذخیره انرژی پتانسیل الکتریکی، اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها مانند دستگاه‌های رفع لرزشی است که توسط گروه‌های فوریت‌های پزشکی برای توقف لرزش بطنی افرادی که دچار حمله قلبی شده‌اند به کار می‌رود. در این بیماری انقباض و انقباض ناهماهنگ و آشفته قلب باعث می‌شود خون به درستی به مغز فرستاده نشود. در دستگاه‌های رفع لرزشی قابل حمل، یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود ۶kV باردار می‌کند و خازن در زمانی کمتر از یک دقیقه مقدار زیادی انرژی ذخیره می‌کند. صفحه‌های رابط

(کفشک‌ها)^۱ روی قفسه سینه بیمار قرار داده می‌شوند و خازن بخشی از انرژی ذخیره شده خود را از طریق بدن بیمار از یک کفشک به کفشک دیگر منتقل می‌کند. هدف از این کار این است که یک پالس (تپ) جریان قوی به قلب بدهند تا قلب به طور موقت از کار بیفتد و پس از آن با آهنگ منظم طبیعی خود به کار افتد.

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

الف) چقدر انرژی در بدن بیمار تخلیه شده است؟

ب) چه مقدار بار الکتریکی از بدن بیمار عبور کرده است؟

پ) اگر تخلیه انرژی تقریباً در مدت 2 ms صورت پذیرفته باشد توان پالس جریان چقدر بوده است؟

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

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

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

ب) بار اولیه روی صفحات خازن برابر است با

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

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

پ) توان پالس (تپ) برابر است با

$$P = \frac{U}{t} = \frac{198}{2 \times 10^{-3}} = 99 \text{ kW}$$

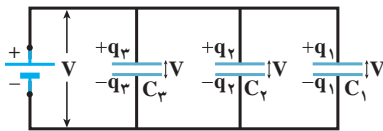
فعالیت ۸-۱

انرژی پتانسیلی که باتری فراهم می‌آورد از رابطه $qV = U_{\text{باتری}}$ به دست می‌آید. از طرفی طبق رابطه ۱-۱۸ انرژی

پتانسیل خازن $U_{\text{خازن}} = \frac{1}{2} qV$ است. آیا به نظر شما پایستگی انرژی نقض شده است؟ در این مورد تحقیق کنید.

۱۳-۱- به هم بستن خازن ها در مدار

در گذشته‌های دور برای به دست آوردن ظرفیت مورد نیاز، تعداد معینی خازن را طوری به هم می‌بستند که ظرفیت مورد نظر را به دست آورند، ولی امروزه همان‌طور که پیش‌تر دیدیم مدارهای الکتریکی پُر از خازن‌هایی است که هر یک بنا به ویژگی‌های خود در مدار استفاده شده است. خازن‌ها می‌توانند به روش‌های مختلفی به یکدیگر متصل شوند که در اینجا دو نوع رایج این اتصال‌ها را بررسی می‌کنیم که **موازی** و **متوالی** نامیده می‌شوند. مجموعه خازن‌هایی که به این روش‌ها به هم متصل شده‌اند را می‌توان با یک خازن جایگزین کرد که به این خازن، **خازن معادل** و به ظرفیت آن، **ظرفیت معادل** (C_{eq}) می‌گویند. انرژی الکتریکی ذخیره شده در این خازن معادل برابر مجموع انرژی تک تک خازن‌هاست.



شکل ۱-۳۳ سه خازن که به‌طور موازی بسته شده‌اند.

الف) بستن خازن‌ها به صورت موازی: شکل ۱-۳۲ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که در آن سه خازن به صورت موازی به باتری متصل شده‌اند. توجه کنید واژه «موازی» ارتباط چندانی به چگونگی ترسیم صفحه‌های خازن‌ها ندارد، بلکه «به صورت موازی» به این معناست که صفحه بالایی خازن‌ها به یکدیگر و صفحه پایینی آنها نیز به یکدیگر متصل شده است و اختلاف پتانسیل یکسان V به دو سر این دسته صفحه‌ها اعمال شده است. بنابراین، هر یک از خازن‌ها در اختلاف پتانسیل یکسان V قرار دارد:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V$$

بار هر خازن طبق رابطه $q = CV$ به صورت زیر درمی‌آید:

$$q_1 = C_1 V, \quad q_2 = C_2 V, \quad q_3 = C_3 V$$

بنابراین، بار کل ذخیره شده در مجموعه خازن‌ها برابر است با:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 = C_1 V + C_2 V + C_3 V = (C_1 + C_2 + C_3) V$$

در نتیجه ظرفیت معادل ترکیب خازن‌های موازی چنین می‌شود:

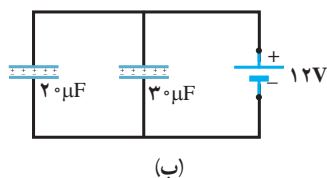
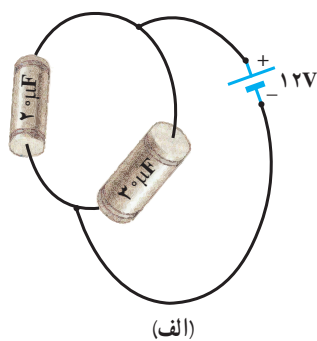
$$C_{eq} = \frac{q}{V} = \frac{(C_1 + C_2 + C_3)V}{V} = C_1 + C_2 + C_3$$

و بنابراین، ترکیب این سه خازن موازی را می‌توان با خازن معادل شکل ۱-۳۳ جایگزین کرد. در حالت کلی برای n خازن موازی رابطه بالا به صورت زیر تعمیم می‌یابد:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (۲۱-۱)$$

بنابراین، ظرفیت خازن معادل خازن‌هایی که به صورت موازی به یکدیگر بسته شده‌اند از ظرفیت هر یک از خازن‌ها بیشتر است.

مثال ۲-۱



شکل الف، دو خازن را نشان می‌دهد که به یک باتری ۱۲۷ بسته شده‌اند.
الف) ظرفیت، بار و انرژی خازن معادل را محاسبه کنید.
ب) بار و انرژی هر خازن را بیابید.

پاسخ:

الف) شکل الف را می‌توان به صورت آرایش شکل ب نشان داد. با توجه به شکل ب، خازن‌ها موازی‌اند و ظرفیت معادل آنها از مجموع ظرفیت تک تک آنها حاصل می‌شود:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 2 \mu F + 3 \mu F = 5 \mu F$$

با توجه به اینکه ولتاژ خازن معادل برابر اختلاف پتانسیل باتری است، بار خازن معادل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q = C_{eq} V = (5 \mu F)(12V) = 60 \times 10^{-6} \mu C$$

و انرژی خازن معادل را می‌توانیم با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه کنیم؛ مثلاً با استفاده از رابطه $U = \frac{1}{2} CV^2$ داریم:

$$U = \frac{1}{2} C_{eq} V^2 = \frac{1}{2} (5 \mu F)(12V)^2 = 360 \times 10^{-6} \mu J$$

ب) با توجه به اینکه خازن‌ها به صورت موازی بسته شده‌اند، ولتاژ هر خازن برابر با اختلاف پتانسیل دو سر باتری است. اکنون با استفاده از رابطه $q = CV$ بار هر خازن را به دست می‌آوریم:

$$q_1 = C_1 V = (2 \mu F)(12V) = 24 \times 10^{-6} \mu C$$

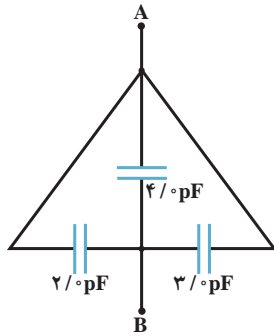
$$q_2 = C_2 V = (3 \mu F)(12V) = 36 \times 10^{-6} \mu C$$

و انرژی هر خازن نیز با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه می‌شود. این دفعه از رابطه $U = \frac{1}{2} qV$ استفاده می‌کنیم:

$$U_1 = \frac{1}{2} q_1 V = \frac{1}{2} (24 \times 10^{-6} \mu C)(12V) = 144 \times 10^{-6} \mu J$$

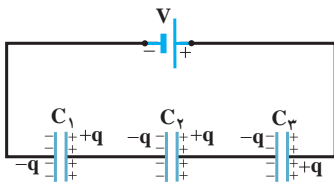
$$U_2 = \frac{1}{2} q_2 V = \frac{1}{2} (36 \times 10^{-6} \mu C)(12V) = 216 \times 10^{-6} \mu J$$

خوب است بررسی کنید که مجموع بار خازن‌ها برابر با بار خازن معادل، و مجموع انرژی خازن‌ها برابر با انرژی خازن معادل است.



ظرفیت معادل بین پایانه‌های A و B را در شکل روبه‌رو به دست آورید.
پاسخ: همان‌طور که در شکل می‌بینیم دو صفحه‌خازن ۴/۰ pF به دو صفحه‌خازن‌های ۲/۰ pF و ۳/۰ pF بسته شده است. بنابراین، خازن ۴/۰ pF با دو خازن دیگر موازی است. در نتیجه داریم:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 = 4/0 \text{ pF} + 3/0 \text{ pF} + 2/0 \text{ pF} = 9/0 \text{ pF}$$



شکل ۱-۳۴ سه خازن که به‌طور متوالی بسته شده‌اند.

ب) بستن خازن‌ها به صورت متوالی: شکل ۱-۳۴ سه خازن را نشان می‌دهد که به صورت

متوالی به یک باتری متصل شده‌اند. توجه کنید واژه «متوالی» ارتباط چندانی به چگونگی ترسیم صفحه‌های خازن‌ها ندارد؛ بلکه «به صورت متوالی» به این معناست که خازن‌ها یکی پس از دیگری به یکدیگر بسته شده‌اند، هیچ اشعاعی بین آنها وجود ندارد و یک اختلاف پتانسیل V به دو سر این ترکیب متوالی اعمال شده است. در بستن متوالی خازن‌ها، همه خازن‌ها دارای بار یکسان q می‌شوند. برای توضیح این موضوع، فرایند زیر را که پس از اعمال اختلاف پتانسیل V در خازن‌ها رخ می‌دهد در نظر می‌گیریم.

از خازن ۱ شروع می‌کنیم و رو به سمت راست به سوی خازن ۳ می‌رویم. وقتی باتری به خازن‌های متوالی وصل می‌شود بار -q را روی صفحه سمت چپ خازن ۱ ایجاد می‌کند. آنگاه این بار، بار منفی را از صفحه سمت راست خازن ۱ می‌راند (آن را با بار +q بر جای می‌گذارد). این بار منفی رانده شده به سوی صفحه سمت چپ خازن ۲ حرکت می‌کند (به آن بار -q می‌دهد). سپس بار روی صفحه سمت چپ خازن ۲ بار منفی را از صفحه سمت راست خازن ۲ می‌راند (آن را با بار +q بر جای می‌گذارد) و به صفحه سمت چپ خازن ۳ می‌برد (به آن بار -q می‌دهد). سرانجام بار روی صفحه سمت چپ خازن ۳ کمک می‌کند تا بار منفی از صفحه سمت راست خازن ۳ به سمت باتری حرکت کند و به این ترتیب، صفحه سمت راست را با بار +q بر جای می‌گذارد.

برای به دست آوردن ظرفیت خازن معادل C_{eq} ، نخست اختلاف پتانسیل هر یک از خازن‌ها را به‌طور جداگانه به دست می‌آوریم:

$$V_1 = \frac{q}{C_1}, V_2 = \frac{q}{C_2}, V_3 = \frac{q}{C_3}$$

اختلاف پتانسیل کل، برابر با مجموع این سه اختلاف پتانسیل است:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

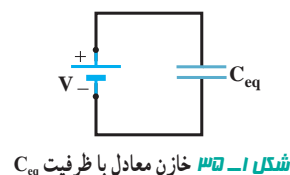
پس ظرفیت خازن معادل چنین می‌شود:

$$C_{eq} = \frac{q}{V} = \frac{q}{q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

و در نتیجه :

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

و بنابراین، ترکیب این سه خازن متوالی را می‌توان با خازن معادل شکل ۱-۳۵ جایگزین کرد. در حالت کلی برای n خازن متوالی رابطه بالا به صورت زیر تعمیم می‌یابد.



$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (۲۲-۱)$$

بنابراین، ظرفیت خازن معادل خازن‌هایی که به صورت متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند از کوچک‌ترین ظرفیت خازن این مجموعه نیز کوچک‌تر است.

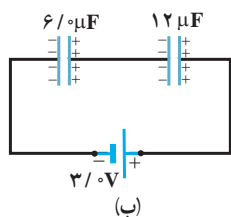
مثال ۱-۲۲



شکل الف دو خازن را نشان می‌دهد که به یک باتری ۳/۰V بسته شده‌اند. الف) ظرفیت، بار و انرژی خازن معادل را محاسبه کنید. ب) بار، ولتاژ و انرژی هر خازن را بیابید.

پاسخ:

الف) شکل الف را می‌توان به صورت آرایش شکل ب نشان داد. با توجه به شکل ب، خازن‌ها متوالی‌اند و ظرفیت معادل آنها از رابطه ۱-۲۲ به دست می‌آید:



$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{6/0\mu F} + \frac{1}{12\mu F} = \frac{1}{4/0\mu F}$$

در نتیجه $C_{eq} = 4/0\mu F$ است.

اکنون با استفاده از رابطه $q = C_{eq} V$ بار خازن معادل را به دست می‌آوریم:

$$q = C_{eq} V = (4/0\mu F)(3/0V) = 12\mu C$$

و انرژی خازن معادل را می‌توانیم با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه

کنیم؛ مثلاً با استفاده از $U = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$ داریم:

$$U = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C_{eq}} = \frac{1}{2} \frac{(12\mu C)^2}{4/0\mu F} = 18\mu J$$

ب) با توجه به اینکه خازن‌ها به صورت متوالی بسته شده‌اند، بار هر دو خازن با هم برابر و مساوی بار خازن معادل است:

$$q_1 = q_2 = q = 12\mu C$$

اکنون با استفاده از رابطه $V = q / C$ ولتاژ هر خازن را می‌یابیم:

$$V_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{12\mu C}{6/0\mu F} = 2/0V$$

$$V_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{12\mu C}{12\mu F} = 1/0V$$

و انرژی هر خازن نیز با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه می‌شود. این بار از رابطه $U = \frac{1}{2}qV$ استفاده می‌کنیم:

$$U_1 = \frac{1}{2}q_1V_1 = \frac{1}{2}(12\mu\text{C})(2/0\text{V}) = 12\mu\text{J}$$

$$U_2 = \frac{1}{2}q_2V_2 = \frac{1}{2}(12\mu\text{C})(1/0\text{V}) = 6/0\mu\text{J}$$

خوب است بررسی کنید که مجموع ولتاژ خازن‌ها برابر با ولتاژ کل (ولتاژ باتری) است و نیز مجموع انرژی خازن‌ها برابر با انرژی خازن معادل است.

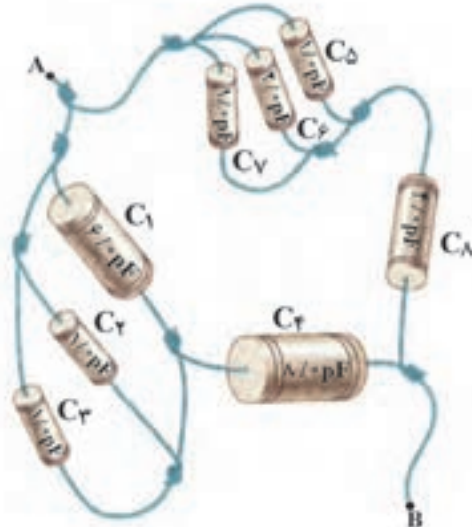
فعالیت ۹-۱



صفحه‌های لمسی از قبیل آنچه که در شکل روبه‌رو نشان داده شده است امروزه کاربردی گسترده در زندگی روزمره پیدا کرده است و آنها را می‌توان در همه جا از صفحه‌های رایانه گرفته تا گوشی‌های تلفن‌های همراه و حتی در ابزارهای پزشکی یافت. آنها به روش‌های مختلفی عمل می‌کنند که یکی از متداول‌ترین این روش‌ها مبتنی بر استفاده از ظرفیت خازن‌هاست. با تماس انگشت با یک صفحه لمسی، تغییری در ظرفیت خازن ایجاد می‌شود که مدارهای الکترونیکی دستگاه می‌توانند آن تغییر را آشکار کنند. در مورد انواع این صفحه‌های لمسی خازنی^۱ و چگونگی عملکرد آنها تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

خازن‌ها را می‌توان به صورت موازی، متوالی یا ترکیبی از خازن‌های موازی و متوالی بست و دستگاهی از خازن‌ها درست کرد. در ادامه مثالی از این دست را بررسی می‌کنیم.

مثال ۲۳-۱



شکل روبه‌رو، هشت خازن را نشان می‌دهد که به صورت مجموعه‌ای از اتصال‌های متوالی و موازی به هم بسته شده‌اند. الف) ظرفیت خازن معادل بین پایانه‌های A و B را در شکل محاسبه کنید.

ب) اگر پایانه‌های A و B را به یک باتری با ولتاژ ۱۲V وصل کنیم چه مقدار انرژی در دستگاه خازن‌ها ذخیره می‌شود؟

۱- capacitive touch screen

پاسخ:

الف) با توجه به شکل، سه خازن خوشه سمت چپ با هم موازی اند و ظرفیت معادل آنها برابر است با

$$C_{۱۲۳} = C_۱ + C_۲ + C_۳ = ۶/۰ \text{ pF} + ۱/۰ \text{ pF} + ۱/۰ \text{ pF} = ۸/۰ \text{ pF}$$

خازن $C_{۱۲۳}$ خود با خازن $C_۴$ متوالی است. بنابراین ظرفیت معادل خازن های سمت چپ از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{C_{چپ}} = \frac{1}{C_{۱۲۳}} + \frac{1}{C_۴} = \frac{1}{۸/۰ \text{ pF}} + \frac{1}{۸/۰ \text{ pF}} = \frac{1}{۴/۰ \text{ pF}} \Rightarrow C_{چپ} = ۴/۰ \text{ pF}$$

به همین ترتیب سه خازن خوشه سمت راست با هم موازی اند و ظرفیت معادل آنها برابر است با

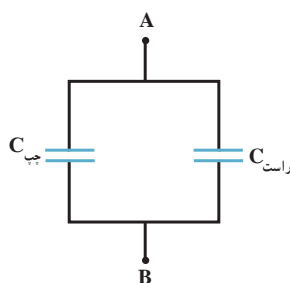
$$C_{۵۶۷} = C_۵ + C_۶ + C_۷ = ۱/۰ + ۲/۰ + ۱/۰ = ۴/۰ \text{ pF}$$

خازن $C_{۵۶۷}$ خود با خازن $C_۸$ متوالی است. بنابراین، ظرفیت معادل خازن های سمت راست از رابطه زیر به دست

می آید:

$$\frac{1}{C_{راست}} = \frac{1}{C_{۵۶۷}} + \frac{1}{C_۸} = \frac{1}{۴/۰ \text{ pF}} + \frac{1}{۴/۰ \text{ pF}} = \frac{1}{۲/۰ \text{ pF}} \Rightarrow C_{راست} = ۲/۰ \text{ pF}$$

بنابراین، شکل این دستگاه خازن ها به صورت شکل زیر در می آید.



در نتیجه ظرفیت خازن معادل این دستگاه خازن ها برابر است با

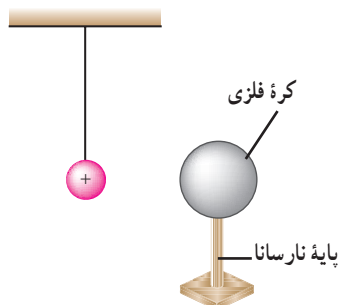
$$C_{eq} = C_{چپ} + C_{راست} = ۴/۰ \text{ pF} + ۲/۰ \text{ pF} = ۶/۰ \text{ pF}$$

ب) با استفاده از یکی از سه رابطه انرژی خازن ها می توانیم انرژی ذخیره شده در این دستگاه را بیابیم. در اینجا ساده تر

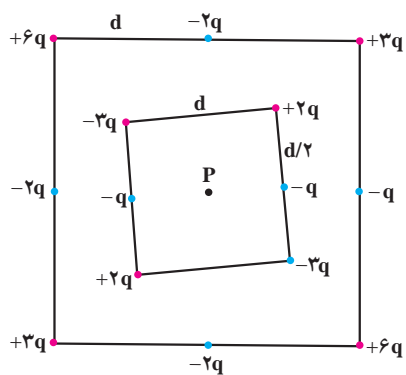
آن است که از رابطه $U = \frac{1}{2} CV^2$ استفاده کنیم:

$$U = \frac{1}{2} C_{eq} V^2 = \frac{1}{2} (۶/۰ \text{ pF}) (۱۲V)^2 = ۴/۳ \times ۱۰^{-۲} \text{ pJ}$$

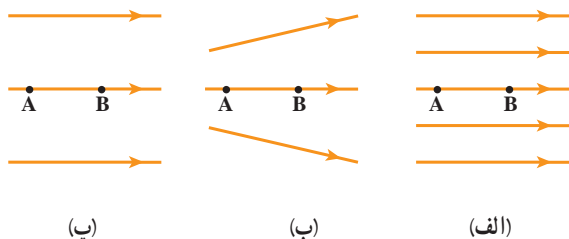
پرسش ها



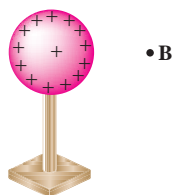
۱ یک کره فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه نارسانا قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می افتد.



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



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



• B

• A

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

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

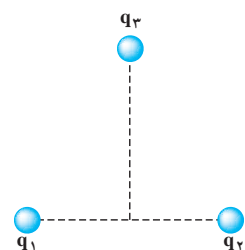
(ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌های آن سه برابر شود.



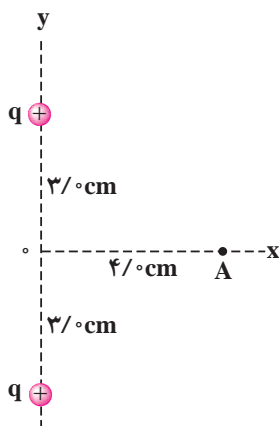
۶ شکل روبه‌رو، دوزره باردار را نشان می‌دهد که در جای خود روی محور x ثابت شده‌اند. (الف) در کجای این محور (غیر از بینهایت) نقطه‌ای وجود دارد که در آنجا میدان الکتریکی

برآیند برابر با صفر است؟ (ب) آیا نقطه‌ای در جایی بیرون از محور (غیر از بینهایت) وجود دارد که میدان الکتریکی در آنجا صفر باشد؟

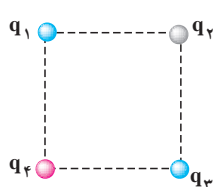
مسئله‌ها



۱ بارهای الکتریکی نقطه‌ای $q_1 = -4 \times 10^{-6} \text{ nC}$ و $q_2 = -4 \times 10^{-6} \text{ nC}$ مطابق شکل در فاصله 8 cm از یکدیگر ثابت شده‌اند. بار نقطه‌ای $q_3 = -5 \times 10^{-6} \text{ nC}$ را در نقطه‌ای که فاصله آن از هریک از دو بار الکتریکی قبلی برابر 8 cm است، قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی وارد بر بار q_3 را محاسبه کنید.



۲ دو بار الکتریکی نقطه‌ای همنام $q = +1 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ مطابق شکل روبه‌رو فاصله 6 cm از یکدیگر قرار دارند. جهت و اندازه میدان الکتریکی را در نقطه A واقع بر عمود منصف خط واصل دو بار، در فاصله 4 cm از نقطه O (وسط خط واصل دو بار) مشخص کنید.



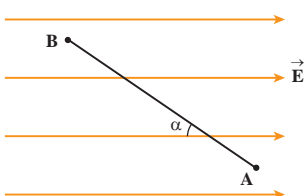
۳ سه ذره باردار q_1 و q_2 و q_3 مطابق شکل در سه رأس مربعی ثابت شده‌اند. اگر $q_1 = q_3 = -5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ باشد، نوع و اندازه بار q_2 را طوری تعیین کنید که بار q_4 در حال تعادل باشد.

۴ هسته اتم آهن شعاعی در حدود $4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ دارد و شامل ۲۶ پروتون است. (الف) بزرگی نیروی دافعه بین دو پروتون که به فاصله $4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ از هم قرار دارند چقدر است؟ (ب) بزرگی نیروی گرانشی بین این دو پروتون چقدر است؟ (پ) از این مسئله به چه نتیجه‌ای می‌رسید؟

۵ در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $5 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ که جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره بارداری به جرم $2 \cdot 10^{-20} \text{ g}$ معلّق و به حال سکون قرار دارد. اگر $g = 10 \text{ N/kg}$ باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.



۶ غلظت الکترون‌ها در ارتفاعات مختلف جو زمین متفاوت است. وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای اطراف زمین باردار می‌شود. این بارها ممکن است موجب آسیب رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شود. فرض کنید ماهواره امید در اثر عبور از یکی از لایه‌های جو دارای بار الکتریکی $q = 2 \cdot 10^{-1} \text{ C}$ شود. این ماهواره، مکعبی به ضلع 4 cm است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود).



۷ مطابق شکل، بار $q = +5 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ را در میدان الکتریکی یکنواخت $8 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ از نقطه A تا نقطه B جابه‌جا می‌کنیم. اگر $AB = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ و $\alpha = 3^\circ$ 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

۸ دو صفحه رسانا با فاصله $2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$ را موازی یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را به اختلاف پتانسیل 100 V وصل می‌کنیم. در نتیجه، یکی از صفحه‌ها به طور منفی و دیگری به طور مثبت باردار می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی به وجود می‌آید. اندازه این میدان الکتریکی را حساب کنید و توضیح دهید که کدام یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیشتری دارند.

۹ در یک میدان الکتریکی، بار $q = 2 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ از نقطه A تا B جابه‌جا می‌شود. اگر انرژی پتانسیل آن در نقطه‌های A و B به ترتیب $4 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ و $-4 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی میان دو نقطه $(V_B - V_A)$ را محاسبه کنید.

۱۰ بار الکتریکی $q = -4 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی $V_1 = -40 \text{ V}$ تا نقطه‌ای با پتانسیل $V_2 = -10 \text{ V}$ آزادانه جابه‌جا می‌شود. (الف) انرژی پتانسیل الکتریکی بار q چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟ (ب) توضیح دهید که تغییر انرژی پتانسیل بار q (با توجه به

قانون پایستگی انرژی) به چه انرژی ای تبدیل می شود؟

۱۱ مساحت صفحه های یک خازن تخت به ظرفیت $1/0^{\circ}F$ که فاصله صفحات آن $1/0^{\circ}mm$ و بین صفحات آن هواست، باید چقدر باشد؟ از این مسئله چه نتیجه ای می گیرید؟

۱۲ اختلاف پتانسیل بین دو صفحه یک خازن را از ۲۸ ولت به 4° ولت افزایش می دهیم. اگر با این کار ۱۵ میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

۱۳ خازنی به ظرفیت $C_1=5/0^{\circ}\mu F$ با اختلاف پتانسیل $1/2 \times 10^2 V$ و خازنی به ظرفیت $C_2=1^{\circ}\mu F$ با اختلاف پتانسیل $7/5 \times 10^2 V$ پر شده اند. اگر این خازن های پر را از مدار اصلی آنها جدا و صفحه های همنام آنها را به هم وصل کنیم،

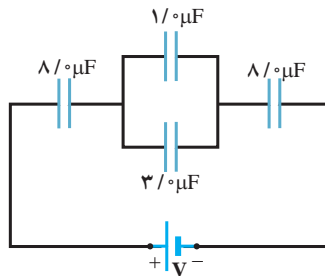
(الف) اختلاف پتانسیل بین دو صفحه و بار ذخیره شده در هر خازن چقدر می شود؟

(ب) مجموع انرژی ذخیره شده در دو خازن را قبل و بعد از اتصال به یکدیگر محاسبه و با هم مقایسه کنید.

۱۴ در مدار شکل روبه رو اختلاف پتانسیل دو سر مدار برابر $1^{\circ}V$ است.

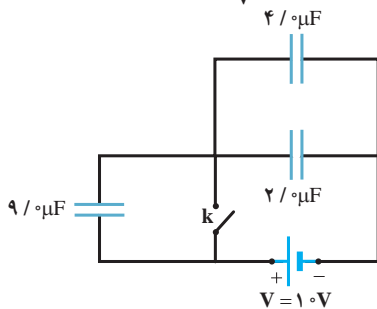
(الف) ظرفیت معادل مدار، و

(ب) بار الکتریکی و اختلاف پتانسیل دو سر هر یک از خازن ها را حساب کنید.



۱۵ در شکل روبه رو، انرژی ذخیره شده در مجموعه خازن ها را در حالتی حساب

کنید که الف) کلید k باز و ب) کلید k بسته است.



۱۶ یک باتری $12V$ به پایانه های A و B مدار نشان داده شده در شکل روبه رو بسته

شده است. چقدر انرژی در شبکه خازنی ذخیره می شود؟

* ۱۷ فرض کنید زنبور عسل کره ای به قطر $1/0^{\circ}cm$ است که بار $45/0^{\circ}pC$

به طور یکنواخت روی آن پخش شده است. همچنین قطر گرده کروی ای را که به سمت زنبور کشیده می شود $4^{\circ}/0^{\circ}\mu m$ و بزرگی باری را که روی هر طرف گرده القا می شود $1/0^{\circ}pC$ در نظر بگیرید و نیز فرض کنید گرده کاملاً به زنبور می چسبند. الف) با فرض آنکه کل بار روی زنبور در مرکز آن قرار گرفته باشد و بارهای القا شده روی گرده به صورت دو بار نقطه ای مجزا از هم در دو سمت

مقابل قطر گرده باشد، نیروی الکتریکی خالص وارد بر گرده از سوی زنبور را محاسبه کنید. ب) سپس فرض کنید این زنبور، گرده را به فاصله $1/0^{\circ}mm$ از نوک کلاه گل دیگری بیاورد و نیز نوک کلاه را مانند ذره ای با بار $45/0^{\circ}pC$ در نظر بگیرید. نیروی الکتریکی خالص وارد بر گرده از سوی کلاه را محاسبه کنید.

(پ) با مقایسه قسمت های الف و ب نتیجه بگیرید آیا گرده روی زنبور باقی می ماند یا به سمت کلاه حرکت می کند؟

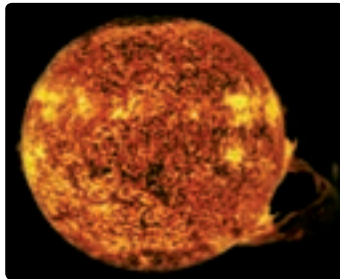
* این سؤالات برای دانش آموزان بسیار کوشا طراحی شده است و در امتحان نهایی از آنها ارزشیابی به عمل نمی آید.

جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



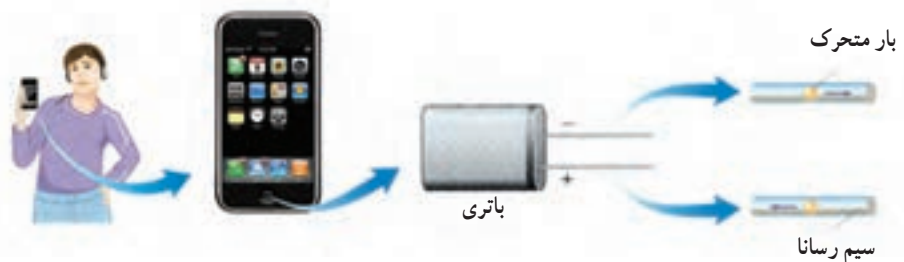
ماهی الکتریکی برای بیهوش کردن شکار و دور کردن شکارچی به آنها شوک الکتریکی می‌دهد. این ولتاژ از سلول‌های بیولوژیک پولکی‌شکلی ماصل می‌شود که در واقع مثل یک باتری عمل می‌کند. شکل، تصویری از یک ماهی الکتریکی به نام تورپدو را نشان می‌دهد. در زیر بالچه‌های این ماهی، پشته‌هایی از هزاران تا از این سلول‌ها در چند صد ردیف کنار هم قرار گرفته‌اند.

در فصل پیش با بار الکتریکی، میدان الکتریکی و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از میدان الکتریکی آشنا شدیم و به بررسی برهم کنش‌های بارهای الکتریکی در حالت سکون پرداختیم. در این فصل به **جریان‌های الکتریکی** می‌پردازیم که با شارش بارهای الکتریکی از یک ناحیه به ناحیه دیگر به وجود می‌آید.

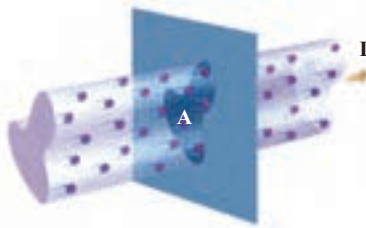


شکل ۲-۱ یک زبانه خورشیدی حلقه عظیمی از الکترون‌ها و پروتون‌هاست که از سطح خورشید رو به بیرون آن امتداد دارد. برخی از زبانه‌های خورشیدی از هم می‌پاشند و این ذرات باردار را به فضا پرتاب می‌کنند.

مثال‌های جریان‌های الکتریکی فراوان است؛ مثلاً انرژی مورد نیاز نمایشگرهایی مانند تلفن همراه توسط باتری‌هایی تأمین می‌شود که از طریق سیم‌های رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند به نمایشگر تلفن همراه شما متصل‌اند (شکل ۲-۱). فیزیولوژیست‌ها و مهندسان پزشکی با جریان‌های الکتریکی در رشته‌های عصبی‌ای سروکار دارند که ماهیچه‌ها را کنترل می‌کنند. مهندسان برق با دستگاه‌های الکتریکی بی‌شماری از قبیل مولدهای برق و دستگاه‌های ذخیره اطلاعات سروکار دارند و مهندسان مخابرات نگران اختلالات ناشی از زبانه‌های خورشیدی (شکل ۲-۲) هستند.



شکل ۲-۱ انرژی این نمایشگر تلفن همراه توسط بارهایی تأمین می‌شود که از طریق سیمی رسانا از باتری به نمایشگر منتقل می‌شوند.

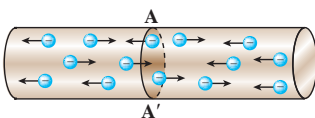


شکل ۲-۳ باریکه‌ای از بارهای مثبت از سطح مقطع A می‌گذرند و جریان I را ایجاد می‌کنند.

در این فصل، درباره مبانی فیزیکی جریان‌های الکتریکی و مدارهای الکتریکی بحث می‌کنیم. با این پرسش شروع می‌کنیم که چرا هر مجموعه بار متحرکی لزوماً جریان الکتریکی ایجاد نمی‌کند. در واقع برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم باید یک انتقال خالص بار از یک سطح معین رخ دهد (شکل ۲-۳) که به این منظور نیاز به یک مولد الکتریکی از قبیل باتری داریم تا با ایجاد یک میدان الکتریکی، بارها را در راستای معینی به حرکت درآورد.

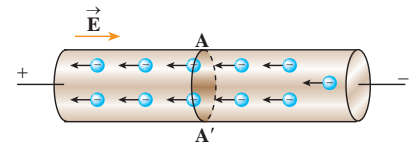
۱-۲- جریان الکتریکی

هرچند جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همه بارهای متحرک جریان ایجاد نمی‌کنند. همان‌طور که گفتیم، برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم باید یک شارش خالص بار از یک سطح معین بگذرد. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم الکترون‌های آزاد در طول یک سیم مسی وجود دارند ولی آنها با سرعت‌هایی از مرتبه 10^6 m/s به طور کاتوره‌ای در همه جهت‌ها حرکت می‌کنند و بنابراین، هیچ شارش خالص باری از مقطعی معین نداریم (شکل ۲-۴). از طرفی در فصل پیش دیدیم همه نقاط رسانای منزوی که به تعادل الکتروستاتیکی رسیده است، صرف نظر از اینکه بار اضافی داشته باشد یا نه، پتانسیل یکسانی دارد و میدان الکتریکی در تمام نقاط درون آن صفر است. بنابراین، گرچه الکترون‌های آزاد داریم، ولی هیچ

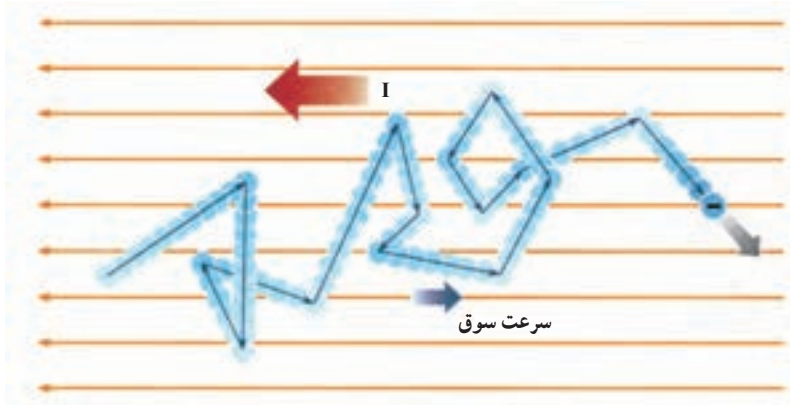


شکل ۲-۴ در نبود اختلاف پتانسیل شارش بار خالصی از مقطع معین AA' سیم نداریم.

نیروی خالص الکتریکی بر آنها وارد نمی‌شود و در نتیجه، هیچ جریانی در رسانا وجود ندارد. اکنون سیمی رسانا را در نظر بگیرید که در تعادل الکتروستاتیکی است. بنا بر آنچه که گفته شد همه نقاط این سیم، پتانسیل یکسانی دارد و جریانی در سیم وجود ندارد، ولی اگر به دو سر سیم یک باتری وصل کنیم، یک اختلاف پتانسیل در دو سر سیم و میدانی الکتریکی درون آن ایجاد می‌شود و باعث حرکت الکترون‌های آزاد در سیم و ایجاد جریان می‌شود (شکل ۲-۵). در واقع وقتی میدان الکتریکی را به فلز اعمال می‌کنیم، الکترون‌ها حرکت کاتوره‌ای خود را قدری تغییر می‌دهند و با سرعتی متوسط موسوم به **سرعت سوق**^۱ در خلاف جهت میدان به طور بسیار آهسته‌ای سوق پیدا می‌کنند که این موجب جریان الکتریکی در رسانا می‌شود (شکل ۲-۶). سرعت سوق در یک رسانای فلزی معمولاً کمتر از ۱ mm/s است.



شکل ۲-۵ در حضور اختلاف پتانسیل، شارش بار خالص از مقطع AA' سیم، دیگر برابر صفر نیست.



شکل ۲-۶ مسیر زیگزاگ یک الکترون آزاد در یک رسانای فلزی. در حضور میدان الکتریکی، این مسیر زیگزاگ در خلاف جهت میدان سوق می‌یابد.

فعالیت ۱-۲

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

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

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

^۱ - drift velocity

در رابطه ۱-۲ بار الکتریکی (Δq) برحسب کولن (C)، مدت زمان (Δt) برحسب ثانیه (s) و جریان (I) برحسب آمپر (A) است.

در این فصل با جریان‌های مستقیم سر و کار داریم که در آن جهت جریان با زمان تغییر نمی‌کند و مقدار آن ثابت می‌ماند.

مثال ۱-۲



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

الف) در این مدت چه مقدار بار از مدار می‌گذرد؟

ب) باتری چقدر انرژی به مدار ماشین حساب می‌دهد؟

پاسخ: الف) باری که در یک ساعت از مدار می‌گذرد با استفاده از رابطه ۱-۲

برابر است با

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

ب) انرژی‌ای که باتری به مدار می‌دهد بنا به رابطه ۱-۲ ($W_{\text{خارجی}} = q\Delta V$) چنین می‌شود:

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

تمرین ۱-۲

بایانه مثبت (+)



بایانه منفی (-)



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

باتری استاندارد خودرویی، 50 آمپر-ساعت است. اگر این باتری به طور متوسط جریان $5/A$ را فراهم سازد، چقدر طول می‌کشد تا خالی شود؟

۲-۲- مقاومت رساناهای اهمی و عوامل مؤثر بر آنها

در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که مقاومت الکتریکی به صورت $R = V/I$ تعریف می‌شود. و نیز دیدیم که برای برخی از مواد (از قبیل فلزات) جریان الکتریکی (I) تابعی خطی از اختلاف پتانسیل الکتریکی (V) است. به عبارت دیگر، این مواد اصطلاحاً از قانون اهم پیروی می‌کنند. در این بخش به عوامل مؤثر در مقاومت چنین رساناهایی می‌پردازیم. بدین منظور آزمایش زیر را انجام می‌دهیم.

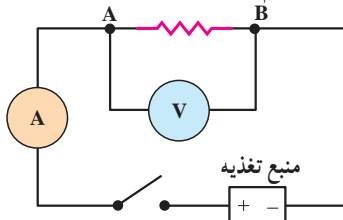
آزمایش ۱-۲

عوامل مؤثر بر مقاومت رسانای فلزی

وسایل آزمایش: منبع تغذیه، سیم رابط، سیم‌هایی از جنس تنگستن، نیکروم (یا آلیاژهای مختلف دیگر)، آمپرسنج، ولت‌سنج و کلید.

شرح آزمایش:

۱- در مداری مطابق شکل زیر بین دو نقطه A و B قطعه‌ای با طول معین (مثلاً ۱/۵ متر) از سیم تنگستن یا نیکروم را قرار دهید. پس از بستن کلید، اختلاف پتانسیل دو سر سیم را (برحسب ولت) و جریانی که از مدار می‌گذرد را (برحسب آمپر)، اندازه بگیرید. سپس با استفاده از تعریف مقاومت ($R=V/I$)، مقاومت قطعه سیم را (برحسب اهم) به دست آورید و در جدول زیر ثبت کنید.



۲- آزمایش را اکنون با همان سیم تنگستن (یا نیکروم) اما با قطعه‌ای به طول $\frac{1}{3}$ یا $\frac{1}{4}$ طول قبلی انجام دهید و با اندازه‌گیری V و I مقاومت قطعه‌ی اخیر را به دست آورید. نتیجه را در جدول زیر ثبت کنید.

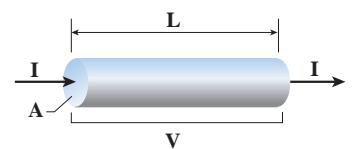
۳- حال آزمایش را با دو قطعه سیم هم طول و با سطح مقطع یکسان، یکی از جنس تنگستن و دیگری از جنس نیکروم تکرار کنید و نتیجه را در جدول زیر بنویسید.

| شماره آزمایش | جنس سیم | طول سیم L | سطح مقطع سیم A | I | V | $\frac{V}{I} = R$ |
|--------------|---------|-----------|----------------|---|---|-------------------|
| | | | | | | |

نتیجه‌های به دست آمده را با یکدیگر مقایسه کنید و به کلاس گزارش دهید.

۴- سرانجام با انجام دادن آزمایش با سیم‌های هم طول از یک جنس ولی با سطح مقطع‌های متفاوت، به همان ترتیب، مقاومت هریک از سیم‌ها را به دست آورید و نتیجه را در جدول بالا ثبت کنید.

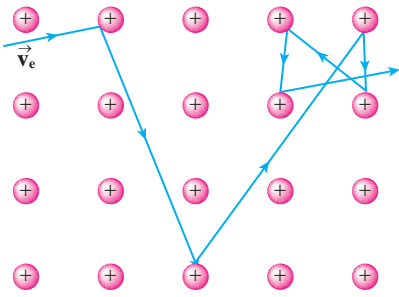
آزمایش ۱-۲ نشان می‌دهد که مقاومت رسانایی که از قانون اهم پیروی می‌کند (رسانای اهمی) در دمای ثابت به طول، سطح مقطع و جنس رسانا بستگی دارد. این آزمایش که با محاسبات نظری نیز تأیید می‌شود نشان می‌دهد اگر سطح مقطع سیم در تمام طول آن یکسان باشد (شکل ۲-۷)، مقاومت سیم از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:



شکل ۲-۷ از سیمی به طول L و مقطع یکنواخت A، تحت اختلاف پتانسیل V، جریان I می‌گذرد.

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

جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



شکل ۸-۲ حرکت الکترون در داخل شبکه بلوری فلز. با افزایش دما، ارتعاشات شبکه و در نتیجه برخورد الکترون‌ها با شبکه افزایش می‌یابد.



شکل ۸-۳ عبور جریان از فیلامان تنگستنی موجب درخشش لامپ جابجی شده است.

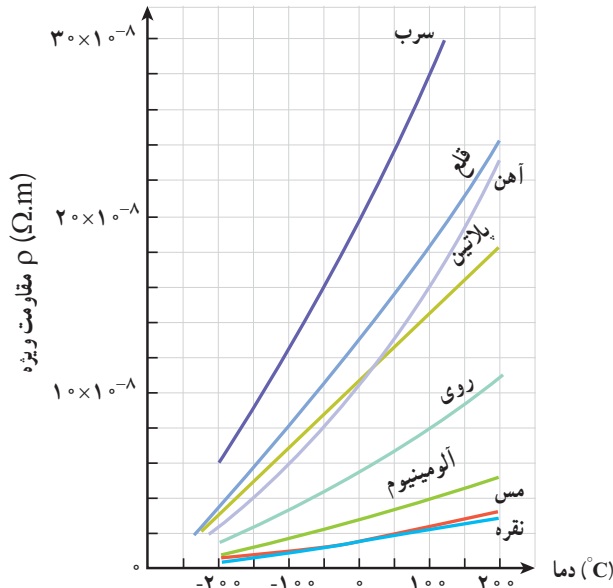
که در آن L طول سیم برحسب متر (m)، A مساحت مقطع سیم برحسب متر مربع (m^2) و R مقاومت الکتریکی سیم برحسب اهم (Ω) است.

در این رابطه ρ کمیتی به نام **مقاومت ویژه** رساناست که برای رساناهایی که از قانون اهم پیروی می‌کنند فقط به جنس رسانا و دمای آن بستگی دارد. یکای ρ در این رابطه اهم.متر ($\Omega.m$) است. مقاومت ویژه برخی مواد در دمای $20^\circ C$ در جدول ۱-۲ داده شده است.

تغییر مقاومت ویژه با دما: وقتی دمای یک رسانای فلزی افزایش می‌یابد ارتعاشات کاتوره‌ای اتم‌ها و یون‌های آن نیز افزایش می‌یابد و موجب افزایش برخورد الکترون‌های آزاد با شبکه اتمی رسانای فلزی می‌شود (شکل ۸-۲) و به این ترتیب، مقاومت رسانا در برابر عبور جریان زیاد می‌شود؛ مثلاً درحالی که درکسری از یک ثانیه دمای یک فیلامان تنگستن ملتهب لامپی جابجی (شکل ۸-۳) تقریباً به $2000^\circ C$ می‌رسد، مقاومت آن با مضربی حدود 10° افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت ویژه ρ با دما تقریباً به‌طور خطی تغییر می‌کند (شکل ۸-۲). مقاومت ویژه برخی از فلزات را در محدوده‌ای از دما نشان می‌دهد. بنابراین، مقاومت ویژه رسانای فلزی در یک دمای مشخص با رابطه زیر به مقاومت ویژه آن در یک دمای مرجع (ρ_0) مربوط می‌شود.

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (8-2)$$

که در آن α ثابتی مثبت موسوم به **ضریب دمایی مقاومت ویژه** و $T - T_0$ اختلاف دما (برحسب $^\circ C$ یا K) نسبت به دمای مرجع است. یکای α در این رابطه K^{-1} (یا $1/^\circ C$) است. ضریب دمایی مقاومت ویژه برخی از مواد در جدول ۱-۲ داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید این ضریب برای نیمرساناها منفی است. بنابراین، مقاومت ویژه نیمرساناها با افزایش دما، کاهش می‌یابد.



شکل ۸-۳ نمودار تقریبی مقاومت ویژه چند فلز در یک محدوده دمایی

جدول ۱-۲ - مقاومت ویژه در دمای 20°C و ضریب دمایی مقاومت ویژه برخی از رساناها و نیمرساناها

| مقاومت ویژه ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) | ضریب دمایی مقاومت ویژه α (K^{-1}) | ماده |
|--|---|---|
| | | رسانای فلزی |
| $1/62 \times 10^{-8}$ | $4/1 \times 10^{-3}$ | نقره |
| $1/69 \times 10^{-8}$ | $4/3 \times 10^{-3}$ | مس |
| $2/35 \times 10^{-8}$ | $4/0 \times 10^{-3}$ | طلا |
| $2/75 \times 10^{-8}$ | $4/4 \times 10^{-3}$ | آلمینیم |
| $5/25 \times 10^{-8}$ | $4/5 \times 10^{-3}$ | تنگستن |
| $9/68 \times 10^{-8}$ | $6/5 \times 10^{-3}$ | آهن |
| $10/6 \times 10^{-8}$ | $3/9 \times 10^{-3}$ | پلاتین |
| 100×10^{-8} | $4/0 \times 10^{-4}$ | نیکروم (۵۹ درصد Ni، ۲۳ درصد Cu، ۱۶ درصد Cr) |
| | | نیمرسانا |
| $3/5 \times 10^{-5}$ | -5×10^{-4} | کربن |
| ۰/۴۶ | -5×10^{-2} | ژرمانیم |
| $2/5 \times 10^{-2}$ | -7×10^{-2} | سیلیسیم خالص |

مثال ۲-۲



غلایف فلزی $A=3/1 \times 10^{-6} \text{m}^2$



یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

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

پاسخ: مقاومت ویژه ρ را از رابطه $\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$ و مقاومت سیم المنت را از رابطه $R = \rho L/A$ به دست می‌آوریم:

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

بنابراین، مقاومت سیم در دمای 42°C برابر است با

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

مثال ۳-۲

دماسنج‌های مقاومتی می‌توانند در دماهای بسیار بالا یا بسیار پایین که دماسنج‌های معمولی کار نمی‌کنند، دما را اندازه بگیرند. در واقع از تغییر مقاومت الکتریکی با دما برای ساختن این دماسنج‌های دقیق استفاده می‌شود. معمولاً در این دماسنج‌ها از پلاتین استفاده می‌کنند. زیرا پلاتین تقریباً دچار خوردگی نمی‌شود و نقطه ذوب بالایی دارد. فرض کنید در دمای 20°C مقاومت پلاتین یک دماسنج مقاومتی 164Ω باشد. وقتی این دماسنج در محلول خاصی قرار گیرد مقاومت آن 187Ω می‌شود. دمای این محلول چقدر است؟ (مقدار دقیق α برای پلاتین برابر $3/92 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ است.)

پاسخ: چون مقاومت R رابطه مستقیمی با مقاومت ویژه ρ دارد ($R = \rho L/A$)، آنگاه از رابطه $2-3$ نتیجه می‌گیریم:

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

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

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

مطالعه آزاد

برخی از تجهیزات پزشکی، مسیر مستقیمی از جریان را به قلب فراهم می‌کنند. ولی این کار مثل یک شمشیر دو دم است. زیرا در این صورت جریان‌های خیلی کوچک نیز می‌توانند خطر آفرین باشند. مثلاً سوندها را به منظورهای بسیاری در دستگاه گردش خون و گاهی هم در داخل خود قلب قرار می‌دهند. مقاومت خون و محلول‌های نمک ناچیز است، و البته رگ‌های خون نیز مسیرهای مستقیمی را به قلب فراهم می‌کنند و این به معنی آن است که یک ولتاژ اندک هم می‌تواند جریان‌های مرگباری تولید کند. پس، هر وسیله پزشکی که مسیر الکتریکی مستقیمی را به قلب فراهم می‌کند باید استانداردهای ایمنی سختی داشته باشد و به همین دلیل در مؤسسه‌های پزشکی استانداردهای شدیدی برای محدود ساختن جریان‌هایی وضع شده است که ممکن است تصادفاً از بدن بیمار عبور کنند.

۳-۲- برخی از استانداردهای مهندسی سیم‌ها

در استانداردهای مهندسی، سیم‌ها را برحسب قطر و مساحت مقطع آنها نمره‌بندی می‌کنند و اندازه مقاومت‌های الکتریکی را با حلقه‌هایی رنگی کدگذاری می‌نمایند.

نمره بندی سیم ها

در سیم کشی ها برای عبور جریان های زیاد باید سیم های با ضخامت بزرگ تر را انتخاب کنیم. در صنعت تولید سیم، سیم ها را با ضخامت های معینی می سازند و معلوم می کنند هر سیم چه جریان بیشینه ای را می تواند تحمل کند. به هر سیم با ضخامت معین کد مشخصی را اختصاص می دهند. جدول زیر برخی از این کدگذاری ها با جریان مجاز بیشینه هر سیم را بر اساس یکی از استانداردها نشان می دهد.

جدول ۲-۲- نمره بندی سیم های توپر مسی بر اساس استاندارد AWG*

| نمره سیم | قطر سیم (اینچ)** | جریان بیشینه مجاز (آمپر) | نمره سیم | قطر سیم | جریان بیشینه مجاز |
|----------|------------------|--------------------------|----------|---------|-------------------|
| ۰۰۰۰ | ۰/۴۶ | ۳۸۰ | ۲۱ | ۰/۰۲۸۴۶ | ۹ |
| ۰۰۰ | ۰/۴۰۹۶۵ | ۳۲۸ | ۲۲ | ۰/۰۲۵۳۵ | ۷ |
| ۰۰ | ۰/۳۶۴۸ | ۲۸۳ | ۲۳ | ۰/۰۲۲۵۷ | ۴/۷ |
| ۰ | ۰/۳۲۴۸۵ | ۲۴۵ | ۲۴ | ۰/۰۲۰۰۱ | ۳/۵ |
| ۱ | ۰/۲۸۹۳ | ۲۱۱ | ۲۵ | ۰/۰۱۷۹ | ۲/۷ |
| ۲ | ۰/۲۵۷۶۳ | ۱۸۱ | ۲۶ | ۰/۰۱۵۹۴ | ۲/۲ |
| ۳ | ۰/۲۲۹۴۲ | ۱۵۸ | ۲۷ | ۰/۰۱۴۲ | ۱/۷ |
| ۴ | ۰/۲۰۴۳۱ | ۱۳۵ | ۲۸ | ۰/۰۱۲۶۴ | ۱/۴ |
| ۵ | ۰/۱۸۱۹۴ | ۱۱۸ | ۲۹ | ۰/۰۱۱۲۶ | ۱/۲ |
| ۶ | ۰/۱۶۲۰۲ | ۱۰۱ | ۳۰ | ۰/۰۱۰۰۲ | ۰/۸۶ |
| ۷ | ۰/۱۴۴۲۸ | ۸۹ | ۳۱ | ۰/۰۰۸۹۳ | ۰/۷ |
| ۸ | ۰/۱۲۸۴۹ | ۷۳ | ۳۲ | ۰/۰۰۷۹۵ | ۰/۵۳ |
| ۹ | ۰/۱۱۴۴۳ | ۶۴ | ۳۳ | ۰/۰۰۷۰۸ | ۰/۴۳ |
| ۱۰ | ۰/۱۰۱۸۹ | ۵۵ | ۳۴ | ۰/۰۰۶۳ | ۰/۳۳ |
| ۱۱ | ۰/۰۹۰۷۴ | ۴۷ | ۳۵ | ۰/۰۰۵۶۱ | ۰/۲۷ |
| ۱۲ | ۰/۰۸۰۸ | ۴۱ | ۳۶ | ۰/۰۰۵ | ۰/۲۱ |
| ۱۳ | ۰/۰۷۱۹۶ | ۳۵ | ۳۷ | ۰/۰۰۴۴۵ | ۰/۱۷ |
| ۱۴ | ۰/۰۶۴۰۸ | ۳۲ | ۳۸ | ۰/۰۰۳۹۶ | ۰/۱۳ |
| ۱۵ | ۰/۰۵۷۰۷ | ۲۸ | ۳۹ | ۰/۰۰۳۵۳ | ۰/۱۱ |
| ۱۶ | ۰/۰۵۰۸۲ | ۲۲ | ۴۰ | ۰/۰۰۳۱۴ | ۰/۰۹ |
| ۱۷ | ۰/۰۴۵۲۶ | ۱۹ | | | |
| ۱۸ | ۰/۰۴۰۳ | ۱۶ | | | |
| ۱۹ | ۰/۰۳۵۸۹ | ۱۴ | | | |
| ۲۰ | ۰/۰۳۱۹۶ | ۱۱ | | | |

* American Wire Gauge

** ۱ inch = ۲/۵۴ cm

سیم کشی منازل معمولاً با سیم‌های مسی نمرة ۱۲ (قطر ۰/۸۰۸٪ اینچ یا معادل $10^{-2} \times 0.5 \times 2$ متر) صورت می‌گیرد. مقاومت 100 m از این سیم‌ها در دمای اتاق چقدر است؟

پاسخ: مساحت مقطع این سیم برابر است با:

$$A = \pi r^2 = \pi D^2 / 4 = (3/14)(2/0.5 \times 10^{-2} \text{ m})^2 / 4 = 3/30 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

از طرفی مقاومت ویژه سیم مسی در دمای 20°C با استفاده از جدول ۲-۱، $1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ و طول سیم مسی 100 m است. بنابراین، با استفاده از رابطه $R = \rho L / A$ برای مقاومت سیم مسی خواهیم داشت:

$$R = \rho \frac{L}{A} = (1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}) \frac{(100 \text{ m})}{(3/30 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} = 0.512 \Omega$$

انواع مقاومت‌ها و کدگذاری رنگی مقاومت‌های کربنی: برخی از وسایل برقی مانند

گرم‌کن‌ها، لامپ‌های رشته‌ای، اتو و ... دارای مقاومت الکتریکی در برابر جریان هستند. در بسیاری از مدارها، به‌خصوص در وسایل الکترونیکی مقاومت‌ها برای کنترل جریان و ولتاژ استفاده می‌شوند. اندازه یک مقاومت می‌تواند کمتر از 1Ω تا میلیون‌ها اهم (مگا اهم) باشد. انواع اصلی مقاومت‌ها بر دو نوع اند.



(ب) تصویری از یک مقاومت پیچیده‌ای

شکل ۲-۱۱

۱- مقاومت‌های پیچیده^۱ شامل پیچیده‌ای از یک سیم نازک هستند که معمولاً جنس آنها

از آلیاژهایی مانند نیکروم^۲ (آلیاژ نیکل و کرم) یا آلیاژ مس - نیکل - منگنز (که به آن منگانه^۳ می‌گویند) است. این پیچیده‌ها عموماً به دور هسته‌ای از جنس سرامیک، پلاستیک یا شیشه پیچیده شده‌اند و در غلافی از جنس سرامیک قرار گرفته‌اند. شکل ۲-۱۱ نمونه‌ای از ساختار چنین مقاومت‌هایی را نشان می‌دهد.

با وجود اینکه این مقاومت‌ها قدیمی‌ترین نوع مقاومت‌ها است، امروزه همچنان تولید می‌شوند؛

زیرا می‌توانند برای حصول مقاومت‌های پایین بسیار دقیق و همچنین توان‌های بالا ساخته شوند.

یکی از انواع مشهور این نوع از مقاومت‌ها، **رئوستا^۴** نام دارد که در مدارهای الکترونیکی

پتانسیومتر^۵ نامیده می‌شود. این نوع مقاومت‌ها، متغیر هستند. یک رئوستا از سیمی با مقاومت

ویژه نسبتاً زیاد ساخته شده است. این سیم روی استوانه‌ای نارسانا پیچیده شده و با استفاده از

دکمه‌ای لغزنده که روی ریلی در بالای استوانه قرار دارد و انتهای آن با سیم در تماس است

می‌تواند قسمت دلخواهی از سیم را در مسیر جریان قرار دهد و بنابراین مقدار مقاومت را تغییر

دهد و به این ترتیب جریان را در مدار تنظیم و کنترل کند. شکل ۲-۱۲ - الف طرحی از یک

رئوستا و شکل ۲-۱۲ - ب نماد رئوستا (یا پتانسیومتر) در مدار الکتریکی و شکل ۲-۱۲ - پ

شکلی واقعی از یک رئوستا و یک پتانسیومتر را نشان می‌دهد.

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

۲- nichrome

۳- manganin

۴- Rheostat

۵- Potentiometer

جدول ۲-۳- کد رنگی مقاومت ها

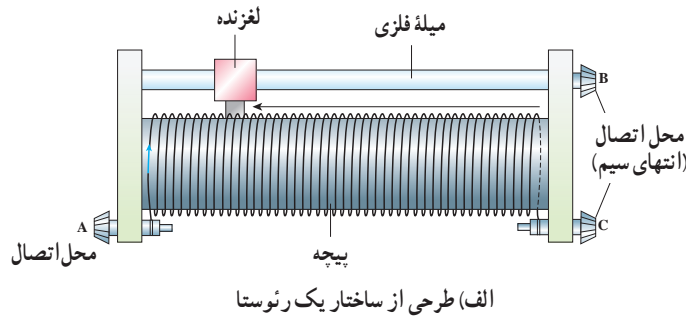
| رنگ | عدد | ضریب | تولانس |
|---------|-----|------------------|--------|
| سیاه | ۰ | ۱ | |
| قهوه‌ای | ۱ | ۱۰ ^۱ | |
| قرمز | ۲ | ۱۰ ^۲ | |
| نارنجی | ۳ | ۱۰ ^۳ | |
| زرد | ۴ | ۱۰ ^۴ | |
| سبز | ۵ | ۱۰ ^۵ | |
| آبی | ۶ | ۱۰ ^۶ | |
| بنفش | ۷ | ۱۰ ^۷ | |
| خاکستری | ۸ | ۱۰ ^۸ | |
| سفید | ۹ | ۱۰ ^۹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



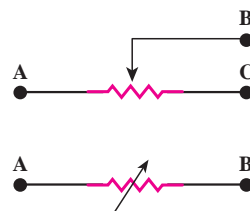
رئوستا



پتانسیومتر



الف) طرحی از ساختار یک رئوستا

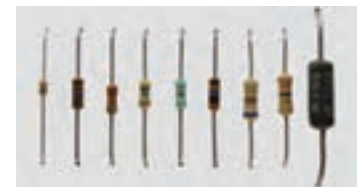


ب) نماد یک رئوستا یا پتانسیومتر در مدار الکتریکی

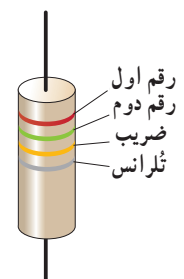
پ) شکل واقعی یک رئوستا و یک پتانسیومتر

شکل ۲-۱۲

۲- مقاومت‌های ترکیبی^۱ که معمولاً از کربن، برخی نیمرساناها، و یا فیلم‌های نازک فلزی ساخته شده‌اند که در داخل پوششی پلاستیکی قرار گرفته‌اند. کارخانه‌های سازنده، مقاومت‌های ترکیبی را در اندازه‌های خاص استاندارد تولید می‌کنند^۲. مقدار این مقاومت‌ها یا روی آنها نوشته می‌شود، یا عمدتاً به صورت کدی رنگی نشان داده می‌شود که با ۳ یا ۴ حلقه رنگی روی آنها مشخص شده است (شکل ۲-۱۳). هر رنگ معرف عددی است که در جدول ۲-۳ داده شده است. دو حلقه اول به ترتیب رقم اول و رقم دوم مقاومت را نشان می‌دهند. رقم حلقه سوم ضریبی است به صورت 10^n که در ستون سوم جدول مشخص شده است. حلقه چهارم یک حلقه طلایی یا نقره‌ای است که **تولانس**^۳ نامیده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از مقدار دقیق مقاومت را برحسب درصد مشخص می‌کند. نبود نوار چهارم به معنای آن است که تولانس ۲۰ درصد است (شکل ۲-۱۴). برای خواندن حلقه‌های رنگی، مقاومت را طوری به دست می‌گیریم که حلقه تولانس در سمت راست قرار گیرد و بقیه حلقه‌ها را از سمت چپ به راست می‌خوانیم. مشخصه مهم دیگر یک مقاومت، بیشینه توان الکتریکی است که مقاومت می‌تواند بدون آنکه بسوزد تحمل کند.



شکل ۲-۱۳ تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی



شکل ۲-۱۴ مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل ۲۵kΩ با تولانس ۱۰ درصد است.

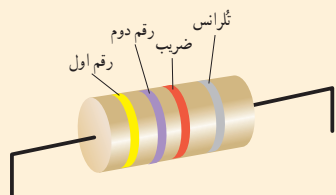
۱- composition resistor

۲- اندازه استاندارد آنها عمدتاً به صورت زیر است:

$$R = (1/7, 2/7, 3/9, 4/7, 5/6, 6/8, 8/2, 10, 12, 15, 18, 22) \times 10^n \Omega$$

$$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

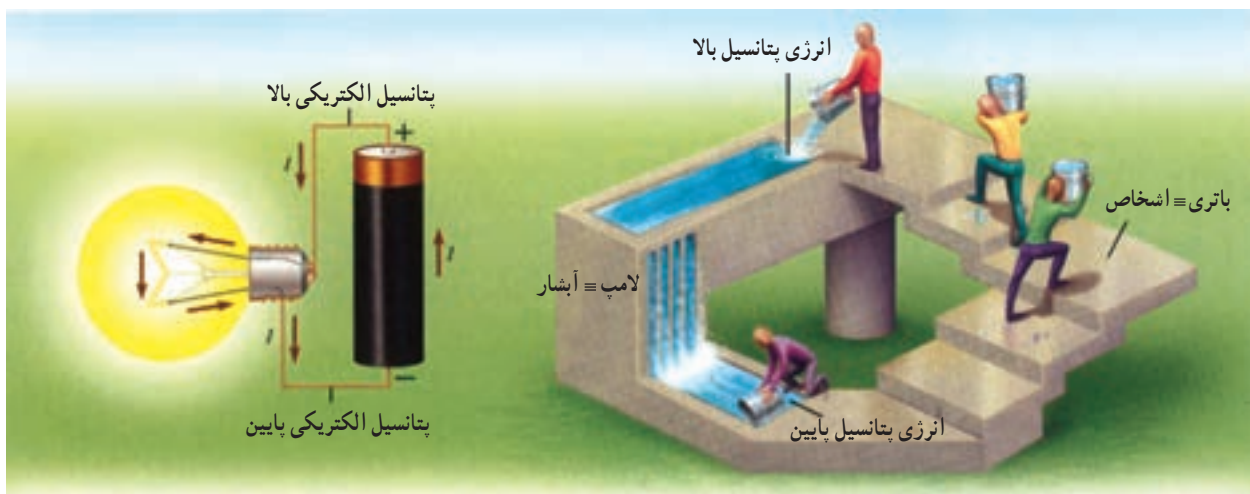
۳- tolerance



مقدار مقاومت نشان داده شده در شکل چقدر است؟

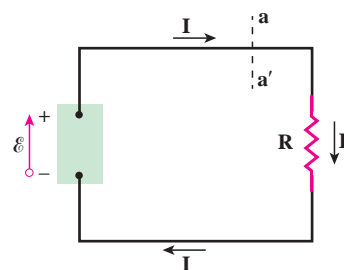
۲-۲- نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

نیروی محرکه الکتریکی: اگر بخواهیم بارهای الکتریکی را از یک مقاومت الکتریکی عبور دهیم، باید بین دو سر مقاومت یک اختلاف پتانسیل برقرار کنیم. در واقع برای این کار به یک پمپ یا تلمبه بار نیاز داریم تا جریانی ثابت از بارهای الکتریکی را برقرار کند. چنین وسیله‌ای که با انجام کار روی بار الکتریکی اختلاف پتانسیل را ثابت نگه می‌دارد **منبع نیروی محرکه الکتریکی** نامیده می‌شود. در واقع این وسیله با صرف انرژی، بارهای الکتریکی مثبت را از پتانسیل پایین‌تر به پتانسیل بالاتر سوق می‌دهد و سبب شارش آنها می‌شود. باتری‌ها، پیل‌های سوختی و مولدهای الکتریکی از جمله منابع‌های نیروی محرکه الکتریکی هستند که در زندگی روزمره کاربرد فراوانی دارند. کار منبع نیروی محرکه الکتریکی مانند کار تلمبه‌ای است که آب را از سطح زمین یا عمق چاه به ارتفاع معین بالا می‌برد. به این ترتیب، آب انرژی پتانسیل لازم را برای جریان یافتن و انجام کاری معین کسب می‌کند. در داخل این وسیله‌ها منبع انرژی‌ای وجود دارد که با حرکت دادن بارهای مثبت در خلاف جهت میدان الکتریکی، روی آنها کار انجام می‌دهد. شکل ۲-۱۵ مشابهت‌سازی را بین جریان آب در یک فرایند مکانیکی و حرکت بار در یک مدار الکتریکی نشان می‌دهد. در این شکل اشخاص نقش باتری را در مدار الکتریکی بازی می‌کنند و سقوط آب مشابه روشن شدن لامپ مدار است.



شکل ۲-۱۵: مشابهت‌سازی یک مدار الکتریکی با فرایندی مکانیکی که در آن آب به‌طور مکانیکی جریان می‌یابد.

اکنون مدار ساده الکتریکی شکل ۲-۱۶ را در نظر بگیرید. در هر بازه زمانی Δt ، بار Δq از هر مقطع این مدار (مثلاً aa') می‌گذرد. همین تعداد بار باید به پایانه با پتانسیل پایین تر منبع نیروی محرکه الکتریکی وارد شود و از پایانه با پتانسیل بالاتر آن خارج گردد. این وسیله باید کاری به اندازه ΔW روی بار Δq انجام دهد تا آن را در این مسیر به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی محرکه الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا در مدار جریان یابد اصطلاحاً نیروی محرکه الکتریکی (emf) نامیده و با رابطه زیر تعریف می‌شود:



شکل ۲-۱۷ یک مدار ساده الکتریکی

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

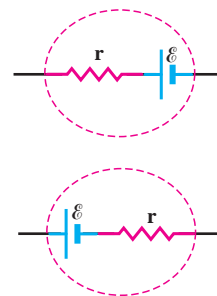
به عبارت دیگر، نیروی محرکه الکتریکی یک منبع نیروی محرکه الکتریکی عبارت از کاری است که روی واحد بار مثبت انجام می‌شود تا آن را از پایانه‌ای با پتانسیل کمتر به پایانه‌ای با پتانسیل بیشتر ببرد^۱.

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

منابع نیروی محرکه الکتریکی آرمانی یا واقعی هستند. اگر پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع نیروی محرکه را به ترتیب با a و b نمایش دهیم، اختلاف پتانسیل میان این دو پایانه برای یک منبع آرمانی برابر با نیروی محرکه الکتریکی آن وسیله است:

$$V_a - V_b = \mathcal{E} \quad (2-5)$$

ولی منبع آرمانی در واقعیت وجود ندارد و این منابع دارای مقاومتی داخلی (درونی) هستند. یعنی درون آنها مقاومتی در برابر حرکت بارها وجود دارد. بنابراین، وقتی جریان از این منابع بگذرد اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های آنها برخلاف منابع آرمانی، متفاوت از نیروی محرکه الکتریکی خواهد شد. به این منابع نیروی محرکه، منبع نیروی محرکه واقعی می‌گویند و آنها را در مدارهای الکتریکی به دو صورت شکل ۲-۱۷ نشان می‌دهند که در آن r مقاومت داخلی منبع نیروی محرکه است. در بخش بعد رابطه اختلاف پتانسیل دو سر یک منبع نیروی محرکه واقعی را خواهیم دید.



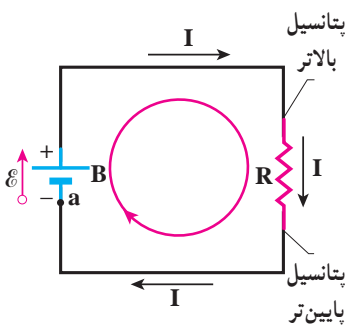
شکل ۲-۱۷ در مدارهای الکتریکی، منبع نیروی محرکه الکتریکی را به یکی از این دو صورت نمایش می‌دهند.

۱- توجه کنید که واژه نیروی محرکه الکتریکی واژه نامناسبی است؛ زیرا emf نیرو نیست، بلکه مانند پتانسیل یک کمیت انرژی به‌ازای واحد بار است. نماد نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} است که فونت خاصی از حروف E یونانی می‌باشد.

آثار تخریبی الکتریسیته بر بدن انسان

آسیبی که الکتریسیته بر بدن وارد می‌کند ناشی از جریان است یا اختلاف پتانسیل؟ توجه کنید هرچند اختلاف پتانسیل باعث حرکت الکترون‌ها می‌شود، ولی این جریان است که به بدن آسیب می‌رساند. مقدار این جریان به مقاومت الکتریکی بدن بستگی دارد که عمدتاً ناشی از پوست است. هرچه پوست خشک‌تر باشد مقاومت بیشتری دارد، ولی اگر پوست خیس یا مرطوب باشد، زخمی سَر باز داشته باشد و یا با گرمی پوشیده شده باشد، مقاومت کمتر می‌شود و مقدار خطرناکی از جریان می‌تواند از بدن شخص عبور کند. به همین ترتیب، اگر شخصی بر زمین خیس و 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 آن قدر زیاد باشد که موجب مرگ شود. از سوی دیگر اگر مقاومت الکتریکی منطقه تماس زیاد باشد و مثلاً شخص بر پایه‌های عایق ایستاده باشد، این خطر بسیار کم می‌شود.

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



مدار تک‌حلقه‌ای و افت پتانسیل در مقاومت: مدار ساده تک‌حلقه‌ای شکل ۲-۱۸

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

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

شکل ۲-۱۸ مداری تک‌حلقه‌ای که در آن مقاومت R به دو سر باتری آرمانی B با نیروی محرکه \mathcal{E} بسته شده است. جریان I در کل مدار یکسان است.

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

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

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

توجه کنید که اگر حلقه را در خلاف جهت نشان داده شده در شکل دور می‌زدیم به رابطه $\mathcal{E} + IR = 0$ می‌رسیدیم که همان رابطه بالاست. در حالت کلی جمع جبری اختلاف پتانسیل‌ها در هر حلقه - خواه مدار تک حلقه‌ای باشد یا چند حلقه‌ای - صفر است. به این قاعده، **قاعده حلقه** می‌گویند که اغلب به افتخار فیزیکدان آلمانی **گوستاو رابرت کیرشهوف**^۱، قاعده حلقه یا قانون ولتاژ کیرشهوف نامیده می‌شود.

قاعده حلقه کیرشهوف: در هر دورزدن کامل حلقه‌ای از مدار، جمع جبری اختلاف پتانسیل‌های اجزای مدار باید برابر صفر باشد.

اکنون می‌خواهیم نشان دهیم که قاعده حلقه چیزی جز پایستگی انرژی نیست. به این منظور دو طرف رابطه $\mathcal{E} = IR$ را در $I \Delta t$ ضرب کنید. از آنجا به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\mathcal{E} I \Delta t = I^2 R \Delta t$$

با توجه به اینکه $I \Delta t = \Delta q$ است و با استفاده از تعریف نیروی محرکه الکتریکی ($\mathcal{E} = \frac{\Delta W}{\Delta q}$) طرف چپ این معادله برابر با ΔW یا همان کاری است که باتری روی بار انجام داده است. از طرفی در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که توان الکتریکی مصرفی در رسانایی به مقاومت R برابر RI^2 است. بنابراین، طرف راست معادله بالا در واقع مقدار انرژی‌ای است که در مقاومت به انرژی گرمایی تبدیل شده است. بنابراین رابطه بالا چیزی جز پایستگی انرژی نیست و انرژی تأمین شده توسط باتری آرمانی به صورت انرژی گرمایی در مقاومت ظاهر شده است.

اکنون اگر باتری آرمانی مدار ساده شکل ۲-۱۸ را با یک باتری واقعی که دارای مقاومت داخلی r است جایگزین کنیم (شکل ۲-۱۹)، با به کار بستن قاعده حلقه به رابطه زیر می‌رسیم:

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

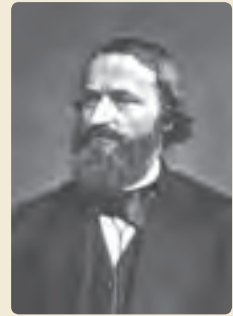
همچنین می‌توانیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری را نیز به دست آوریم. اگر از نقطه a در جهت جریان I به سمت نقطه b حرکت کنیم می‌توانیم با در نظر گرفتن اختلاف پتانسیل‌ها رابطه زیر را بنویسیم:

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

و یا

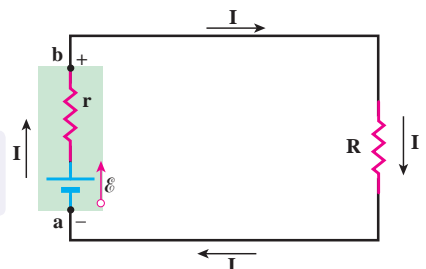
$$V_b - V_a = \mathcal{E} - Ir \quad (۲-۶)$$

همان‌طور که دیدیم در رابطه ۲-۶، \mathcal{E} نیروی محرکه باتری و Ir افت پتانسیل درون باتری است. تفاوت یک باتری نو و فرسوده در مقدار مقاومت داخلی آن است که ممکن است کمتر از 1Ω برای باتری نو، تا 1000Ω یا بیشتر برای باتری فرسوده باشد.



گوستاو کیرشهوف

گوستاو رابرت کیرشهوف در ۱۲ مارس سال ۱۸۲۴ میلادی (۱۲۰۳ هجری شمسی) در شهر واقع در غرب آلمان کنونی به دنیا آمد. کیرشهوف سهمی اساسی در درک مدارهای الکتریکی، طیف‌نگاری، ترمودینامیک و تابش اجسام گرم داشته است. در واقع او نخستین کسی بود که واژه جسم سیاه را در سال ۱۸۶۲ به کار برد و دو قانون مهم در نظریه مدارهای الکتریکی و ترمودینامیک به افتخار او نام‌گذاری شده است. کیرشهوف قانون مدارهای الکتریکی خود را در سال ۱۸۴۵ در حالی بی‌ریزی کرد که دانشجوی دانشگاه آلبرتوس بود. او قانون تابش گرمایی خود را در سال ۱۸۵۹ پیشنهاد داد و 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 (۱۲۶۶ هجری شمسی) در سن ۶۳ سالگی در برلین دیده از جهان فرو بست.



شکل ۲-۱۹: مدار تک حلقه‌ای شکل ۲-۱۸ که باتری آرمانی آن با یک باتری واقعی جایگزین شده است.

^۱ - Gustav Robert Kirchhoff

مثال ۲-۲

در مدار شکل ۲-۱۹ فرض کنید $\mathcal{E} = 12V$ ، $r = 2/\Omega$ و $R = 4/\Omega$ باشد.

الف) جریان عبوری از مدار چقدر است؟

ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری را محاسبه کنید.

پاسخ: براساس آنچه که در متن درس آمده است، در حل مسئله‌های مدار تک حلقه‌ای همواره دو دستورالعمل زیر را به کار

می‌بندیم:

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

۲- جهت نیروی محرکه الکتریکی باتری‌ها همواره از پایانه منفی به طرف پایانه مثبت است، بنابراین هرگاه از پایانه منفی به طرف پایانه مثبت حرکت کنیم پتانسیل به اندازه نیروی محرکه الکتریکی باتری افزایش می‌یابد و اگر در خلاف این جهت (یعنی از پایانه مثبت به منفی) حرکت کنیم پتانسیل به اندازه نیروی محرکه باتری کاهش می‌یابد.

الف) اگر مدار را در جهت جریان نشان داده شده بییماییم براساس آنچه گفته شد، در یک حلقه کامل با استفاده از قاعده حلقه داریم:

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

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

و در نتیجه

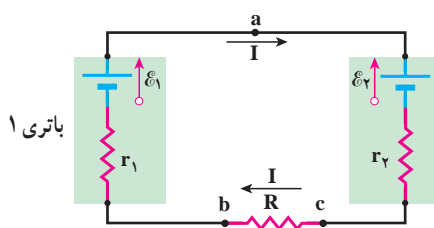
ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری برابر است با

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

تمرین ۳-۲

مثال ۲-۵ را با حرکت در خلاف جهت جریان نشان داده شده حل و نتیجه را با پاسخ مثال مقایسه کنید.

مثال ۴-۲



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

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

الف) جریان عبوری از مدار چقدر است؟

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

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

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

و از آنجا

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

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

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

در نتیجه

$$V_a - V_b = \mathcal{E}_1 - Ir_1 = 1/5V - (0/5A)(2/5\Omega) = 7/5V$$

و برای محاسبه اختلاف پتانسیل دو سر باتری ۲ از نقطه c به سمت نقطه a حرکت می‌کنیم:

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

در نتیجه

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

یک مثال عملی از چنین مسئله‌ای شارژ شدن باتری خودرو (باتری ۲) توسط یک مولد خارجی (باتری ۱) است.

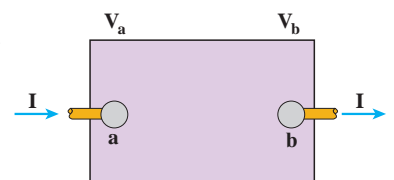
۲-۵- توان در مدارهای الکتریکی

اکنون می‌خواهیم رابطه‌هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به دست آوریم. جعبه شکل ۲-۲ یک عنصر مداری را نشان می‌دهد که می‌تواند باتری، مقاومت و یا هر چیز دیگری باشد که اختلاف پتانسیلی بین پایانه‌های آن برقرار است. فرض کنید بار Δq در مدت زمان Δt تحت اختلاف پتانسیل $\Delta V = V_b - V_a$ از پایانه a به پایانه b این جزء مدار برود. در فصل پیش دیدیم کار نیروی خارجی برای چنین انتقالی برابر با $W = (\Delta q)(\Delta V)$ است. از طرفی توان الکتریکی، آهنگ انجام این کار است:

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

$$P = I\Delta V$$

$$(۲-۷)$$



شکل ۲-۵-۱ یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی بین دو سر آن برقرار است.

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

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

در این رابطه، توان (P) برحسب وات (W)، جریان (I) برحسب آمپر (A) و اختلاف پتانسیل (ΔV) برحسب ولت (V) است. توجه کنید این رابطه هم برای منبع نیروی محرکه (مثلاً باتری) و هم برای وسیله مصرف‌کننده (مثلاً مقاومت یک دستگاه الکتریکی) برقرار است. در ادامه، توان الکتریکی مصرفی در مقاومت و توان الکتریکی خروجی یک منبع نیروی محرکه را بررسی می‌کنیم.

توان الکتریکی مصرفی در یک مقاومت : همان طور که گفتیم رابطه ۲-۷ برای مقاومت های الکتریکی نیز برقرار است. برای محاسبه مقدار توان مصرفی کافی است در این رابطه به جای ΔV از رابطه تعریف مقاومت ($R = \Delta V/I$) استفاده کنیم :

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

در نتیجه :

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 \quad (۸-۲)$$

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

در برخی از کتاب ها، مرسوم است که رابطه ۲-۹ را به صورت $P_{\text{مصرفی}} = V^2/R$ می نویسند که در آن V همان اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت است.

فعالیت ۲-۲

تحقیق کنید چرا در خطوط انتقال برق، انرژی الکتریکی به جای اینکه با جریان بالا و ولتاژ پایین انتقال یابد با ولتاژ بالا و جریان پایین منتقل می شود.
راهنمایی : به تفاوت توان تولیدی و توان مصرفی بیندیشید.

فعالیت ۳-۲



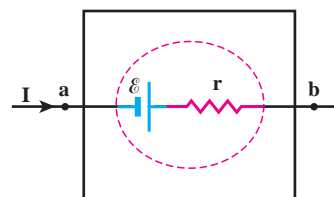
الف) با یک اهم متر، مقاومت رشته سیم داخل لامپ ۱۰۰ واتی خاموش را اندازه گیری کنید. سپس با استفاده از رابطه ۲-۹ و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. نتیجه محاسبه را با مقدار اندازه گیری مقایسه کنید و نتیجه را پس از بحث گروهی گزارش دهید.
ب) اکنون با استفاده از نتیجه به دست آمده دمای رشته سیم داخل لامپ را در حالت روشن برآورد کنید (رشته سیم لامپ از جنس تنگستن است که ضریب دمایی آن در جدول ۲-۱ داده شده است).

توان خروجی منبع نیروی محرکه : همان طور که گفتیم رابطه ۲-۷ ($P=I\Delta V$) برای منابع نیروی محرکه مانند باتری نیز برقرار است. از طرفی اختلاف پتانسیل دوسر یک باتری واقعی را در بخش پیش به دست آوردیم و دیدیم که برای شکلی مانند شکل ۲-۲۱ به صورت $\mathcal{E} - Ir$ می شود. با قرار دادن این

اختلاف پتانسیل در رابطه توان الکتریکی خواهیم داشت :

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

$$P_{\text{خروجی}} = \mathcal{E}I - rI^2 \quad (۱۰-۲)$$



شکل ۲-۱۱ توان خروجی از باتری
شکل از رابطه $P = (V_b - V_a)I$ به دست می آید.

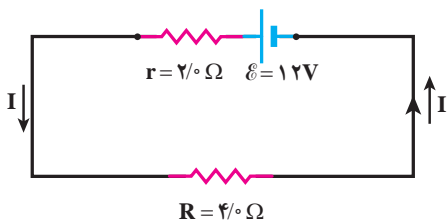
اکنون می خواهیم بدانیم معنای جمله های $\mathcal{E}I$ و rI^2 چیست. ساده تر آن است که نخست جمله دوم را تفسیر کنیم. همان طور که پیش تر دیدیم این جمله توان مصرفی در یک مقاومت است که در اینجا مقاومت درونی باتری است. بنابراین، rI^2 آهنگ اتلاف انرژی الکتریکی در مقاومت داخلی منبع نیروی محرکه است. اکنون به تفسیر جمله اول ($\mathcal{E}I$) می پردازیم. دیدیم که نیروی محرکه الکتریکی طبق رابطه ۲-۱۰ برابر

با $\mathcal{E} = \Delta W / \Delta q$ است و از طرفی جریان از رابطه $I = \Delta q / \Delta t$ به دست می آید. بنابراین داریم :

$$\mathcal{E}I = \left(\frac{\Delta W}{\Delta q}\right)\left(\frac{\Delta q}{\Delta t}\right) = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

که این همان توان تولیدی منبع نیروی محرکه است. بنابراین، توان خروجی منبع شکل ۲-۱۱ تفاضل توان تولیدی منبع از توانی است که در مقاومت داخلی منبع نیروی محرکه مصرف می شود.

مثال ۲-۷



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

پاسخ: نخست، جریان را با استفاده از قاعده حلقه به دست می آوریم :

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

اکنون توان الکتریکی خروجی از باتری با استفاده از رابطه ۲-۱۰ چنین می شود :

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

توان الکتریکی مصرفی در مقاومت ۴ اهمی با استفاده از رابطه ۲-۸ برابر است با

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

که همان طور که انتظار داشتیم با توان خروجی باتری برابر است.

مثال ۲-۸

در مثال ۲-۶ توان هریک از اجزای مدار را محاسبه کنید.

پاسخ: توان مصرفی در مقاومت $R = 8/5\Omega$ با استفاده از رابطه ۲-۸ چنین می شود :

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 = (8/5\Omega)(0.5A)^2 = 2/1W$$

که در آن از $I = 0.5A$ استفاده کرده ایم.

توان خروجی باتری ۱ را با استفاده از رابطه ۲-۱۰ محاسبه می کنیم :

$$P_{\text{خروجی}} = \mathcal{E}I - r_1 I^2 = (8/0V)(0/50A) - (2/0\Omega)(0/50A)^2 = 3/5W$$

اما توان باتری ۲ از رابطه ۲-۱ به دست نمی آید، چرا که همان طور که دیدیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ از رابطه ۲-۱ $V_a - V_c = \mathcal{E}_1 + Ir_1$ به دست می آید. اما طبق تعریف این کتاب برای استفاده از رابطه ۲-۲ $P = I\Delta V$ ، باید اختلاف پتانسیل $V_c - V_a$ را در نظر بگیریم که $-(\mathcal{E}_1 + Ir_1)$ می شود. بنابراین، مقدار (قدر مطلق) توان ورودی به باتری ۲ چنین می شود:

$$P_{\text{ورودی}} = |P| = |I\Delta V| = I(\mathcal{E}_1 + Ir_1) = \mathcal{E}_1 I + r_1 I^2$$

$$= (2/0V)(0/50A) + (1/50\Omega)(0/50A)^2 = 1/4W$$

این همان اتفاقی است که هنگام اتصال یک باتری به شارژر روی می دهد. شارژر به باتری انرژی الکتریکی می دهد. بخشی از این انرژی به انرژی شیمیایی تبدیل می شود و بقیه آن در مقاومت درون باتری تلف می شود و باتری را گرم می کند. همان طور که انتظار داریم این نتیجه همچنین با پایستگی انرژی سازگار است:

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

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

۲-۶- به هم بستن متوالی مقاومت ها

شکل ۲-۲۲ سه مقاومت را نشان می دهد که به طور متوالی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکه الکتریکی \mathcal{E} بسته شده اند. توجه کنید واژه «متوالی» ربط چندانی به چگونگی رسم مقاومت ها ندارد. «متوالی» به معنای بسته شدن مقاومت ها یکی پس از دیگری است به طوری که هیچ انشعابی بین آنها وجود نداشته باشد و اختلاف پتانسیل V به دوسر این مجموعه از مقاومت ها اعمال شده باشد. در بستن متوالی مقاومت ها از همه مقاومت ها جریان یکسان I عبور می کند. مقاومت هایی را که به طور متوالی بسته شده اند می توان با یک مقاومت معادل R_{eq} جایگزین کرد که دارای همان جریان I و اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دوسر مجموعه مقاومت هاست. بنابراین، در اینجا به دو صورت می توان عمل کرد که البته معادل یکدیگرند. یکی آنکه اختلاف پتانسیل کل را برابر با مجموع اختلاف پتانسیل های مقاومت ها در نظر بگیریم:

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

یا اینکه قاعده حلقه را به کار بگیریم و مثلاً با حرکت در جهت جریان I و با شروع از نقطه a دوباره به آن نقطه بازگردیم. در این صورت داریم:

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

و در نتیجه

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

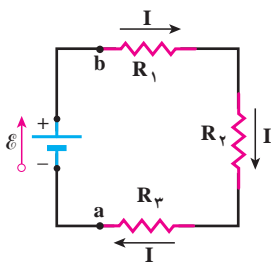
و از آنجا جریان I چنین می شود:

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

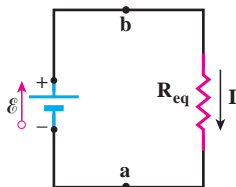
بنابراین، با تعریف مقاومت معادل

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

شکل مدار ۲-۲۲ به مدار معادل شکل ۲-۲۳ تبدیل می شود. بدیهی است که اگر به جای سه



شکل ۲-۲۲ سه مقاومت که به طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده است.



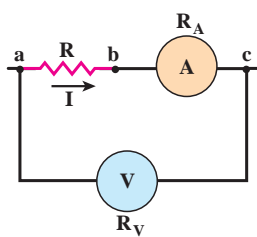
شکل ۲-۲۳ مدار معادل شکل ۲-۲۲ که در آن سه مقاومت با مقاومت R_{eq} جایگزین شده است.

مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم مقاومت معادل آنها از رابطه زیر به دست می آید :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (11-2)$$

توجه کنید وقتی مقاومت‌ها به طور متوالی بسته شده اند مقاومت معادل آنها بزرگ تر از مقاومت هر یک از آنها است و نیز توان الکتریکی مصرفی مقاومت معادل با مجموع توان‌های الکتریکی مصرفی هر یک از آنها برابر است.

مثال ۹-۲



شکل روبه‌رو مداری را برای اندازه‌گیری مقاومت مجهول R نشان می‌دهد. توجه کنید که مقاومت یک ولت‌سنج واقعی باید خیلی بزرگ باشد تا قرار گرفتن آن در مدار، ولتاژ اجزای مدار را به طور محسوسی تغییر ندهد. همچنین مقاومت یک آمپرسنج واقعی باید خیلی ناچیز باشد تا قرار گرفتن آن در مدار به طور محسوسی جریان اجزای مدار را تغییر ندهد. فرض کنید در این مدار ولت‌سنج $V = 12 \text{ V}$ و آمپرسنج $A = 100 \text{ mA}$ را نشان دهد. مقاومت ولت‌سنج $R_V = 1000 \Omega$ و مقاومت آمپرسنج $R_A = 20 \Omega$ است. الف) مقاومت R و ب) توان مصرفی در این مقاومت چقدر است؟

پاسخ: الف) مقاومت‌های R و R_A به طور متوالی به هم بسته شده‌اند و اختلاف پتانسیل دوسر آنها برابر با $V = 12 \text{ V}$ است. با توجه به اینکه آمپرسنج جریان $A = 100 \text{ mA}$ را نشان می‌دهد و به طور متوالی به مقاومت R بسته شده است، جریان عبوری از این دو مقاومت نیز برابر $A = 100 \text{ mA}$ است :

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{12 \text{ V}}{0.1 \text{ A}} = 120 \Omega$$

با توجه به اینکه $R_{eq} = R + R_A = 20 \Omega$ است مقاومت مجهول برابر با $R = 118 \Omega$ می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود اندازه مقاومت آمپرسنج در مقابل مقاومت‌های دیگر بسیار اندک است و به همین دلیل در بسیاری از مدارها از مقاومت آمپرسنج صرف‌نظر می‌شود.

ب) توان مصرفی در این مقاومت را می‌توان از رابطه $P = RI^2$ به دست آورد :

$$P = RI^2 = (118 \Omega)(0.1 \text{ A})^2 = 1.18 \text{ W}$$

۲-۷- مدارهای چندحلقه‌ای و به هم بستن موازی مقاومت‌ها

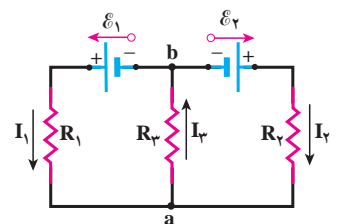
قاعده انشعاب کیرشهوف: شکل ۲-۲۴ مداری را نشان می‌دهد که شامل بیش از یک حلقه

است. برای سادگی فرض می‌کنیم باتری‌ها آرمانی باشند. دو انشعاب در نقطه‌های a و b این مدار وجود دارد و سه شاخه این انشعاب‌ها را به هم وصل می‌کند. جریان در این سه شاخه I_1 ، I_2 و I_3 است که جهت آنها به طور اختیاری انتخاب شده است. برای حل این مدار (یعنی یافتن جریان‌های I_1 ، I_2 و I_3) به سه معادله نیاز داریم. اگر حلقه سمت چپ را به طور پاد ساعتگرد از نقطه b بپییم، قاعده حلقه چنین می‌شود :

$$\mathcal{E}_1 - I_1 R_1 + I_3 R_3 = 0$$

و اگر حلقه سمت راست را به طور پاد ساعتگرد از نقطه b بپییم، قاعده حلقه چنین می‌شود :

$$-I_3 R_3 - I_2 R_2 - \mathcal{E}_2 = 0$$



شکل ۲-۲۴ یک مدار چندحلقه‌ای که شامل سه شاخه است.

بنابراین، می‌بینیم برای حل کامل مدار به یک معادله دیگر نیاز داریم. این معادله را از قاعده‌ای به نام قاعده انشعاب یا قاعده جریان‌های کیرشهوف به دست می‌آوریم. بنا بر این قاعده مجموع جریان‌های ورودی به هر انشعاب (گره) باید برابر با مجموع جریان‌هایی باشد که از آن انشعاب (گره) خارج می‌شوند.

قاعده انشعاب کیرشهوف: مجموع جریان‌هایی که به هر نقطه انشعاب (گره) مدار وارد می‌شود برابر با مجموع جریان‌هایی است که از آن نقطه انشعاب (گره) خارج می‌شود.

این قاعده، در واقع بیانی از اصل پایستگی بار است. به عبارتی دیگر در یک نقطه انشعاب، نه باری ایجاد می‌شود و نه از بین می‌رود.

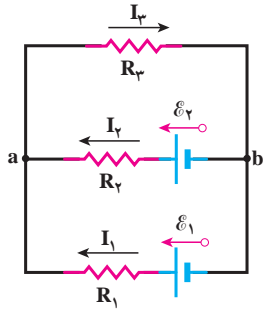
بنابراین، اگر قاعده انشعاب را مثلاً برای نقطه a بنویسیم با توجه به جهت جریان‌های اختیاری

خواهیم داشت:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

اکنون سه معادله و سه مجهول داریم و می‌توانیم جریان‌های مجهول I_1 ، I_2 و I_3 را بیابیم.

مثال ۱-۲



در مدار شکل روبه‌رو مقاومت‌ها عبارت‌اند از:

$$R_1 = 1\Omega, R_2 = 2\Omega \text{ و } R_3 = 1\Omega$$

و نیروی محرکه الکتریکی باتری‌ها (که آرمانی فرض شده‌اند) عبارت‌اند از:

$$\mathcal{E}_1 = 4V \text{ و } \mathcal{E}_2 = 7V$$

اگر جهت جریان‌ها را مطابق شکل فرض کنیم، مقدار جریان‌ها را به دست آورید.

پاسخ: نخست قاعده اختلاف پتانسیل‌ها را برای حلقه‌های بالایی و پایینی به کار

می‌گیریم. اگر حلقه پایینی را به‌طور ساعتگرد از نقطه a بپییم، خواهیم داشت:

$$-I_2 R_2 + \mathcal{E}_2 - I_1 R_1 = 0$$

یا

$$-I_2(1\Omega) + 7V - I_1(2\Omega) = 0$$

در نتیجه

$$I_2(2\Omega) + I_1(1\Omega) = 7V$$

(۱)

و اگر حلقه پایینی را به‌طور ساعتگرد از نقطه a بپییم، خواهیم داشت:

$$+I_2 R_2 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_1 - I_1 R_1 = 0$$

یا

$$+I_2(2\Omega) - 7V + 4V - I_1(1\Omega) = 0$$

در نتیجه

$$-I_1(1\Omega) + I_2(2\Omega) = 3V$$

(۲)

از طرفی، از قاعده جریان‌ها در نقطه انشعاب (گره) a داریم:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

(۳)

I_3 را در معادله (۱) با استفاده از معادله (۳) با $I_1 + I_2$ جایگزین می‌کنیم. در این صورت خواهیم داشت:

$$2I_V + (I_1 + I_V) = I_1 + 3I_V = V \quad (4)$$

با حل دستگاه دو معادله‌ای شامل معادله‌های (۲) و (۴)

$$\begin{cases} -I_1 + 2I_V = 3 \\ I_1 + 3I_V = V \end{cases}$$

از آنجا $I_V = 2A$ و $I_1 = 1A$ می‌شود. اکنون با استفاده از معادله (۳) جریان I_3 را به دست می‌آوریم:

$$I_3 = I_1 + I_V = 1A + 2A = 3A$$

بستن مقاومت‌ها به صورت موازی: شکل ۲-۲۵ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که

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

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

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

$$I = I_1 + I_V + I_3$$

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

$$I_1 = \frac{V}{R_1}, \quad I_V = \frac{V}{R_V}, \quad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

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

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

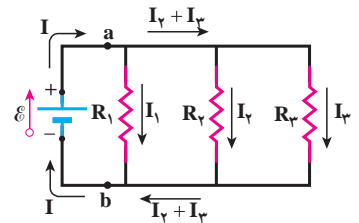
اگر ترکیب موازی مقاومت‌ها را با مقاومت R_{eq} جایگزین کنیم $I = \frac{V}{R_{eq}}$ می‌شود و از آنجا خواهیم داشت:

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

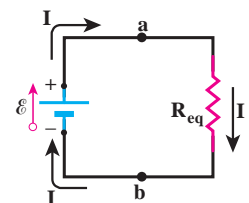
در حالت کلی برای n مقاومت موازی به رابطه زیر می‌رسیم:

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

شکل مدار ۲-۲۵ به مدار معادل شکل ۲-۲۶ تبدیل می‌شود. توجه کنید هرگاه چند مقاومت به صورت موازی به هم بسته شوند، مقاومت معادل آنها کوچک‌تر از هر یک از مقاومت‌های موجود در آن ترکیب است؛ و نیز توان الکتریکی مصرفی مقاومت معادل با مجموع توان‌های الکتریکی مصرفی هر یک از آنها برابر است.

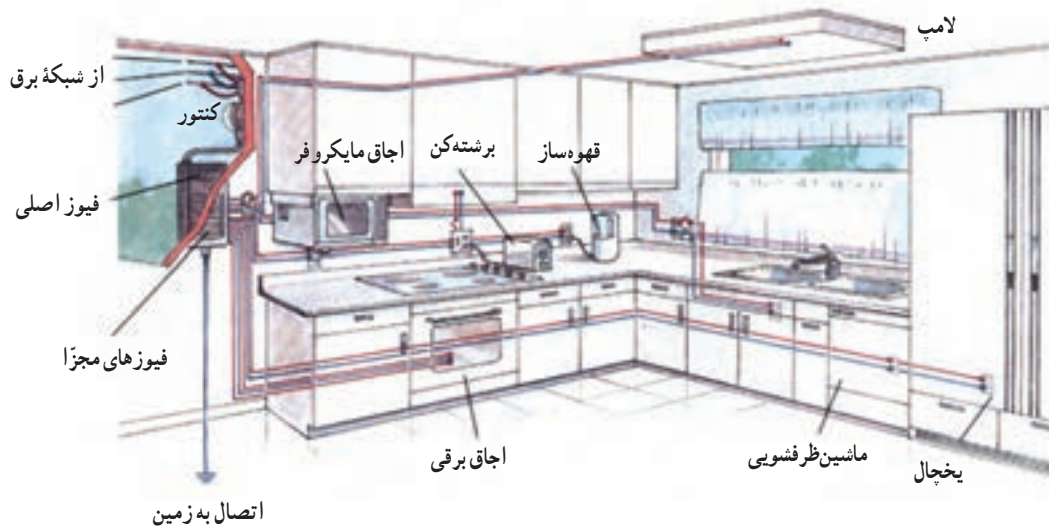


شکل ۲-۲۵ مدار شامل سه مقاومت که به صورت موازی به نقطه‌های a و b بسته شده‌اند.



شکل ۲-۲۶ مدار معادل شکل ۲-۲۵ که در آن سه مقاومت با مقاومت معادل R_{eq} جایگزین شده است.

یک اتوی $1/2 \times 10^3 \text{ W}$ ، یک نان برشته‌کن (توستر) $1/8 \times 10^3 \text{ W}$ ، پنج لامپ رشته‌ای $1/0 \times 10^2 \text{ W}$ و یک بخاری $1/0 \times 10^3 \text{ W}$ به پریزهای یک مدار سیم‌کشی خانگی $1/2 \times 10^2 \text{ V}$ که حداکثر می‌تواند جریان 25 A را تحمل کند وصل شده‌اند. آیا این ترکیب مصرف‌کننده‌ها باعث پریدن فیوز می‌شود یا خیر؟



شکل نوعی از سیم‌کشی در یک آشپزخانه

پاسخ: در سیم‌کشی منازل، همه مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند (چرا؟) بنابراین، مقاومت معادل این مصرف‌کننده‌ها از رابطه $2-12$ به دست می‌آید. به این منظور لازم است مقاومت اجزای مدار را به‌طور جداگانه محاسبه کنیم. با توجه به اینکه اختلاف پتانسیل دوسر مجموعه و توان هریک از مصرف‌کننده‌ها را داریم، مقاومت هر مصرف‌کننده به راحتی با استفاده از رابطه $P = V^2/R$ به دست می‌آید:

$$R_{\text{اتو}} = \frac{V^2}{P_{\text{اتو}}} = \frac{(1/2 \times 10^2 \text{ V})^2}{1/2 \times 10^3 \text{ W}} = 12 \Omega$$

$$R_{\text{برشته‌کن}} = \frac{V^2}{P_{\text{برشته‌کن}}} = \frac{(1/2 \times 10^2 \text{ V})^2}{1/8 \times 10^3 \text{ W}} = 8 \Omega$$

$$R_{\text{لامپ‌ها}} = \frac{V^2}{P_{\text{لامپ‌ها}}} = \frac{(1/2 \times 10^2 \text{ V})^2}{5(1/0 \times 10^2 \text{ W})} = 29 \Omega$$

$$R_{\text{بخاری}} = \frac{V^2}{P_{\text{بخاری}}} = \frac{(1/2 \times 10^2 \text{ V})^2}{1/0 \times 10^3 \text{ W}} = 14 \Omega$$

بنابراین، مقاومت معادل این مدار چنین می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{eq}}} &= \frac{1}{R_{\text{اتو}}} + \frac{1}{R_{\text{برشته‌کن}}} + \frac{1}{R_{\text{لامپ‌ها}}} + \frac{1}{R_{\text{بخاری}}} \\ &= \frac{1}{12} + \frac{1}{8} + \frac{1}{29} + \frac{1}{14} = 0/31 \Omega^{-1} \end{aligned}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{3} + \frac{1}{2}} = \frac{1}{\frac{5}{6}} = \frac{6}{5} = 1.2 \Omega$$

و در نتیجه

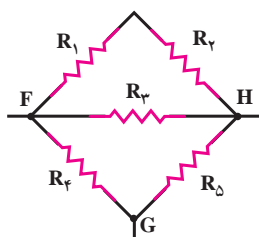
اکنون می‌توانیم جریان عبوری از مقاومت معادل را محاسبه کنیم:

$$I = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{1.2 \times 10^2 V}{1.2 \Omega} = 100 A$$

این جریان بزرگ‌تر از بیشینه جریانی است که مدار قادر به تحمل آن است. بنابراین فیوز خواهد پرید.

به نظر شما آیا منطقی است این فیوز ۲۵A را با فیوزی ۴۵A جایگزین کنیم تا مدار قطع نشود؟

مثال ۱۲-۲



شکل روبه‌رو پنج مقاومت $5/0^\circ$ اهمی را نشان می‌دهد. مقاومت معادل بین نقطه‌های (الف)

F و H و (ب) F و G را بیابید.

پاسخ: الف) مقاومت‌های R_1 و R_2 متوالی‌اند و مقاومت معادل آنها خود با مقاومت R_3 موازی است. همین‌طور مقاومت‌های R_4 و R_5 متوالی‌اند و مقاومت معادل آنها با مقاومت معادل سه مقاومت بالا موازی است. بنابراین، برای مقاومت معادل کل مدار بین نقطه‌های F و H داریم:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{45}} = \frac{1}{5/0^\circ \Omega + 5/0^\circ \Omega} + \frac{1}{5/0^\circ \Omega} + \frac{1}{5/0^\circ \Omega + 5/0^\circ \Omega}$$

$$= \frac{2}{5/0^\circ \Omega} = 0.4 \Omega^{-1}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{0.4 \Omega^{-1}} = 2.5 \Omega$$

در نتیجه

ب) اکنون همچون قسمت الف، R_1 و R_2 متوالی‌اند و مقاومت معادل آنها نیز با R_3 موازی است؛ ولی در اینجا مقاومت معادل این سه مقاومت با مقاومت R_5 متوالی و مقاومت معادل کل آنها با مقاومت R_6 موازی است. بنابراین برای مقاومت معادل کل داریم:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_{1235}} \tag{1}$$

که در آن R_{1235} خود برابر است با

$$R_{1235} = R_{123} + R_5 \tag{2}$$

و R_{123} خود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{1}{R_{123}} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{5/0^\circ \Omega + 5/0^\circ \Omega} + \frac{1}{5/0^\circ \Omega} = \frac{3}{10/0^\circ \Omega}$$

$$R_{123} = \frac{10/0^\circ \Omega}{3} = 3.33 \Omega$$

در نتیجه

اکنون با استفاده از رابطه (۲) داریم:

$$R_{1235} = 3/33\Omega + 5/0.0\Omega = 8/33\Omega$$

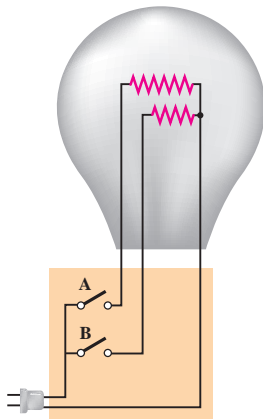
که با قرار دادن در رابطه (۱)، R_{eq} را چنین به دست می‌دهد:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{5/0.0\Omega} + \frac{1}{8/33\Omega} = 0.32\Omega^{-1}$$

و در نتیجه

$$R_{eq} = \frac{1}{0.32\Omega^{-1}} = 3.125\Omega$$

مثال ۱۳-۲



یک لامپ سه‌راهه 220V که دو رشته فیلامان دارد مطابق شکل برای کار در سه توان مختلف ساخته شده است. کمترین و بیشترین توان مصرفی این لامپ به ترتیب 150W و 50W است. مقاومت هریک از رشته‌ها را بیابید.

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

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

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

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

از طرفی کمترین توان مربوط به وقتی است که کلید مربوط به فیلامان با مقاومت بیشتر بسته شده است. اگر این مقاومت را با R_1 نمایش دهیم، داریم:

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

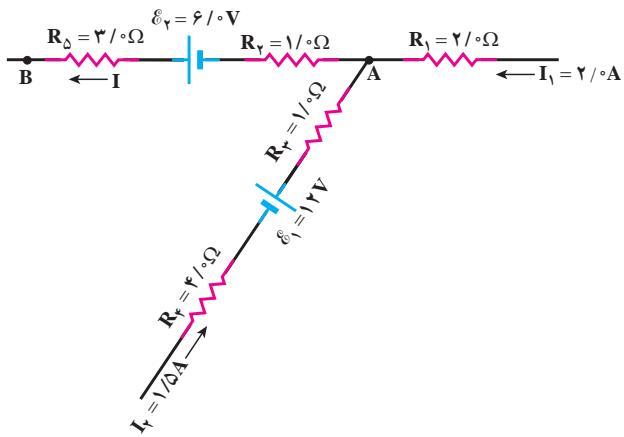
بنابراین، مقاومت مجهول R_2 از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

در نتیجه

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

مثال ۱۱۴-۲



شکل روبه‌رو قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد. $V_A - V_B$ را محاسبه کنید.

پاسخ: با استفاده از قانون انشعاب در نقطه A داریم:

$$I = I_1 + I_\gamma = 2/0\text{A} + 1/5\text{A} = 3/5\text{A}$$

از طرفی برای حرکت در جهت جریان I از نقطه

A به B داریم:

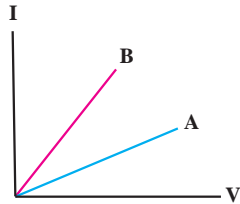
$$V_A - IR_\gamma + \mathcal{E}_\gamma - IR_\delta = V_B$$

$$\Rightarrow V_A - V_B = I(R_\gamma + R_\delta) - \mathcal{E}_\gamma$$

$$= (3/5\text{A})(1/0\Omega + 3/0\Omega) - 6/0\text{V} = 8/0\text{V}$$

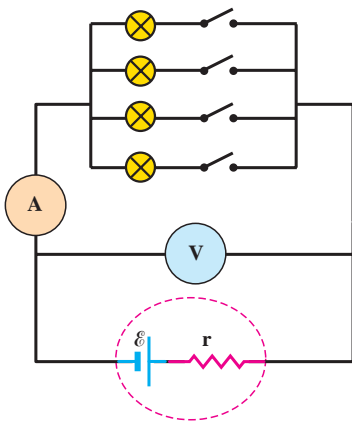
پرسش‌ها

- ۱ ولت‌سنج مناسب برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در یک مدار چه ویژگی‌ای باید داشته باشد؟ اگر ولت‌سنج مناسب نباشد، آنچه اندازه‌گیری می‌شود با اندازه واقعی چه تفاوتی دارد؟ پرسش بالا را در مورد آمپرسنج مناسب هم بررسی کنید.
- ۲ اختلاف پتانسیل دو سر باتری خودروهای سواری برابر ۱۲ ولت است. اگر هشت باتری قلمی ۱/۵ ولتی را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه آنها نیز برابر ۱۲ ولت می‌شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از هشت باتری قلمی استفاده نمی‌شود.

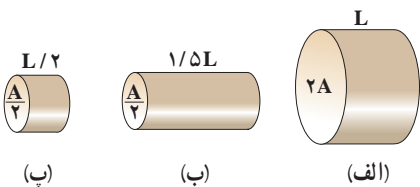


۳ شکل روبه‌رو نمودار $I-V$ را برای دو نوع رسانا نشان می‌دهد. مقاومت کدام یک بیشتر است؟

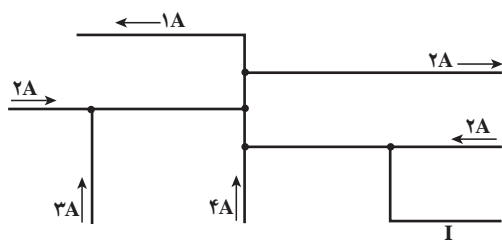
- ۴ برای مدار شکل ۲-۱۹، نمودار تغییرات ولتاژ دوسر مولد را برحسب جریانی که از آن می‌گذرد به طور کیفی رسم کنید.
- ۵ لامپ‌های یک درخت زینتی، به طور متوالی متصل شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتفاقی می‌افتد؟ به نظر شما چرا همه چراغ‌های خودرو (چراغ‌های جلو، عقب و ...) به طور موازی بسته می‌شوند؟
- ۶ در شکل روبه‌رو، تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده‌اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، عددی که آمپرسنج و ولت‌سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟



- ۷ دو مقاومت مساوی R را یک‌بار 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؟
- ۸ شکل روبه‌رو جریان I را در یک مدار تک حلقه‌ای با باتری B و مقاومت‌های R_1 و R_2 (و سیم‌هایی با مقاومت ناچیز) نشان می‌دهد. الف) آیا جهت پیکان نیروی محرکه در B به سمت چپ است یا به سمت راست؟ در نقاط a ، b و c ، ب) بزرگی جریان (پ) پتانسیل الکتریکی و ت) انرژی پتانسیل الکتریکی حامل‌های بار مثبت را به گونه‌ای مرتب کنید که بیشترین مقدار در ابتدا باشد.

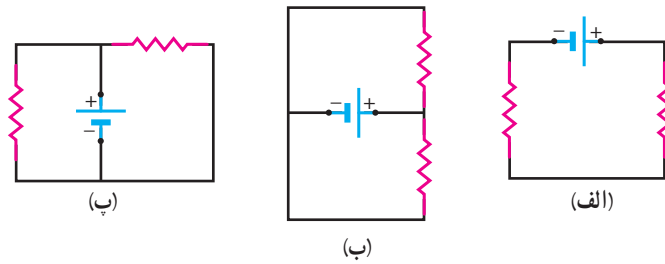


- ۹ شکل روبه‌رو، سه رسانای مسی استوانه‌ای را همراه با مساحت‌های مقطع و طول آنها نشان می‌دهد. این رساناها را برحسب جریانی که با اعمال اختلاف پتانسیل V یکسانی به دوسر آنها ایجاد می‌شود به گونه‌ای مرتب کنید که بیشترین مقدار در ابتدا باشد.



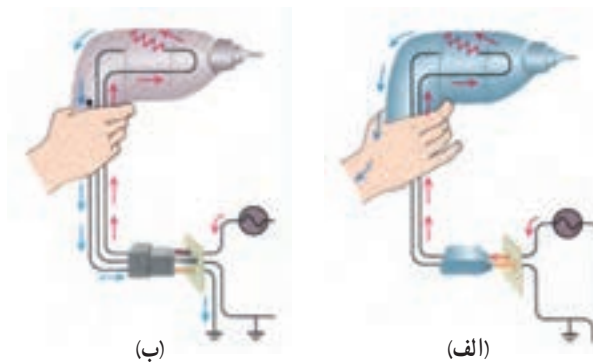
۱۰ شکل روبه‌رو بخشی از یک مدار را نشان می‌دهد. بزرگی و جهت جریان I در سیم پایین سمت راست چیست؟

۱۱ در شکل‌های زیر، آیا مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند یا موازی و یا هیچ کدام؟



۱۲ چرا وقتی باتری خودرو فرسوده می‌شود، با آنکه تغییر محسوسی در نیروی محرکه آن ایجاد نشده است، نمی‌تواند به راحتی خودرو را روشن کند؟

* ۱۳ بررسی کنید اگر مت‌برقی (دریل) معیوب شکل‌های زیر را با دوشاخه (شکل الف) یا سه‌شاخه (شکل ب) به پریز وصل کنیم، چه رخ می‌دهد؟ (نماد \perp اتصال به زمین را نشان می‌دهد که به آن پتانسیل صفر را اختصاص می‌دهند.)



مسئله‌ها



۱ لامپ یک چراغ قوه معمولی در 30°C و $2/97\text{V}$ کار می‌کند. اگر مقاومت رشته تنگستنی این لامپ در دمای اتاق (20°C) برابر $1/1\ \Omega$ باشد، دمای این رشته وقتی که لامپ روشن است، چقدر می‌شود؟

۲ دو رسانا از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توپری به قطر $1/0\text{ mm}$ است. رسانای B لوله‌ای توخالی به شعاع خارجی $2/0\text{ mm}$ و شعاع داخلی $1/0\text{ mm}$ است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟ (مقاومت‌ها نسبت به دوسر رساناها اندازه‌گیری شده‌اند.)

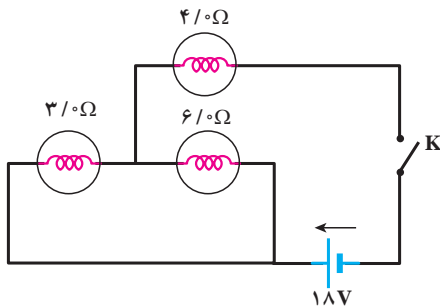


۳ در ماشین های چمن زنی برقی برای مسافت های حداکثر تا ۳۵ m از سیم های مسی نمرة ۲۰ (قطر ۰/۸ cm) و برای مسافت های طولانی تر از سیم های ضخیم تر نمرة ۱۶ (قطر ۰/۱۳ cm) استفاده می کنند تا بدین وسیله مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. الف) مقاومت یک سیم ۳۰ متری ماشین چمن زنی چقدر است؟ ب) مقاومت یک سیم ۷۰ متری ماشین چمن زنی چقدر است؟ (دمای سیم ها را 20°C در نظر بگیرید.)

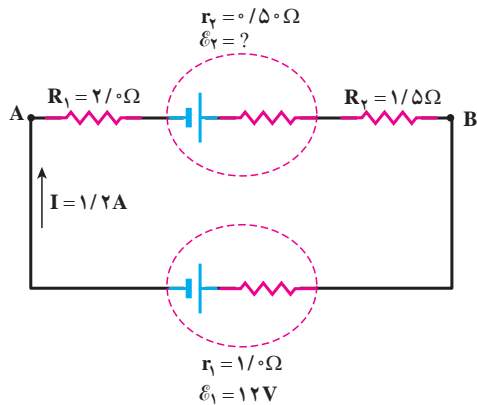
۴ سه مقاومت مشابه ۱۲ اهمی را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت وصل می کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می گذرد؟

۵ دو مقاومت موازی ۶/۰ اهمی و ۱۲ اهمی به طور متوالی به یک مقاومت ۲/۰ اهمی وصل شده است. اکنون، مدار را به دو سر یک باتری ۳۶ ولتی با مقاومت داخلی ناچیز می بندیم. توان مصرفی در مقاومت ۶/۰ اهمی را محاسبه کنید.

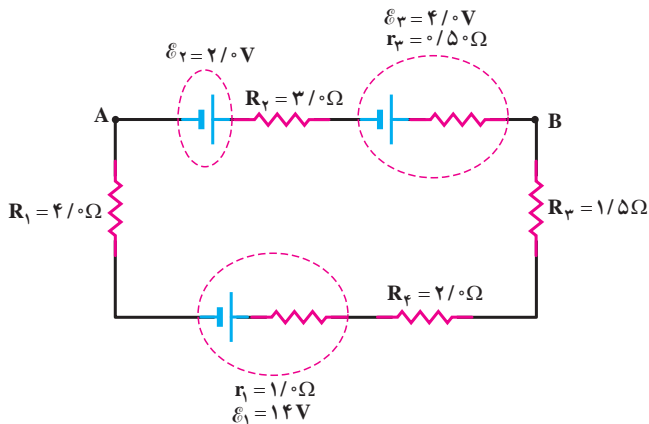
۶ از مقاومت های موازی $4/0\ \Omega$ ، $6/0\ \Omega$ و $12\ \Omega$ جریان کل $21\ \text{A}$ عبور می کند. جریان عبوری از مقاومت $6/0\ \Omega$ چقدر است؟



۷ در شکل روبه رو، وقتی کلید بسته شود چه جریانی از هر لامپ می گذرد؟ (مقاومت داخلی منبع، ناچیز است.)

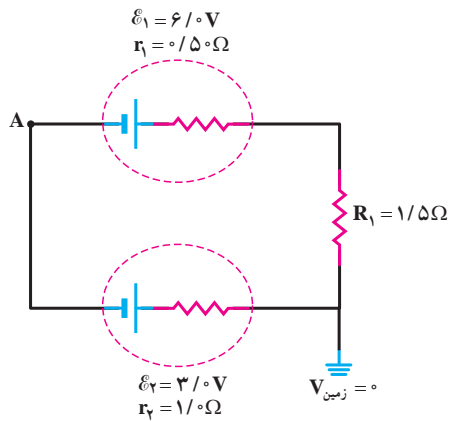
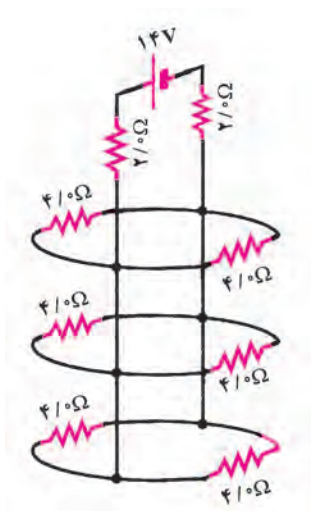


۸ در مدار شکل روبه رو جریان در جهت نشان داده شده $1/2\ \text{A}$ است. الف) نیروی محرکه \mathcal{E}_2 و $V_A - V_B$ چقدر است؟ ب) انرژی مصرف شده در R_1 و R_2 در مدت $5/0$ ثانیه چقدر است؟

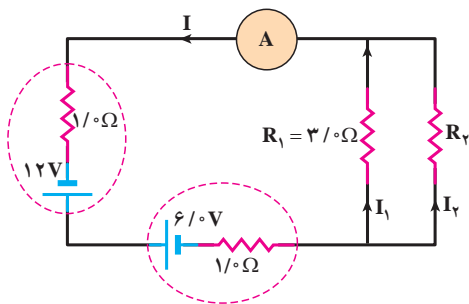


۹ در مدار شکل روبه رو جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه A و B ($V_B - V_A$) را محاسبه کنید.

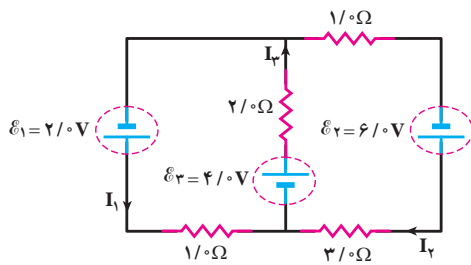
۱۰ جریانی که از منبع نیروی محرکه آرمانی و هر یک از مقاومت‌های شکل زیر می‌گذرد، چقدر است؟



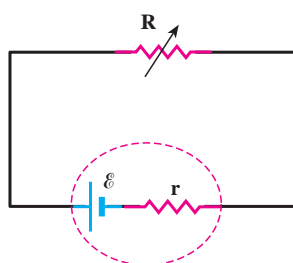
۱۱ در شکل روبه‌رو پتانسیل نقطه A را محاسبه کنید. (نماد \equiv اتصال به زمین را نشان می‌دهد که به آن پتانسیل $V_{\text{زمین}} = 0$ را اختصاص می‌دهند.)



۱۲ جریانی که آمپرسنج در مدار شکل روبه‌رو نشان می‌دهد، برابر $2/0$ A است. الف) مقاومت R_2 ، و ب) توان مصرفی هر یک از دو مقاومت را حساب کنید.

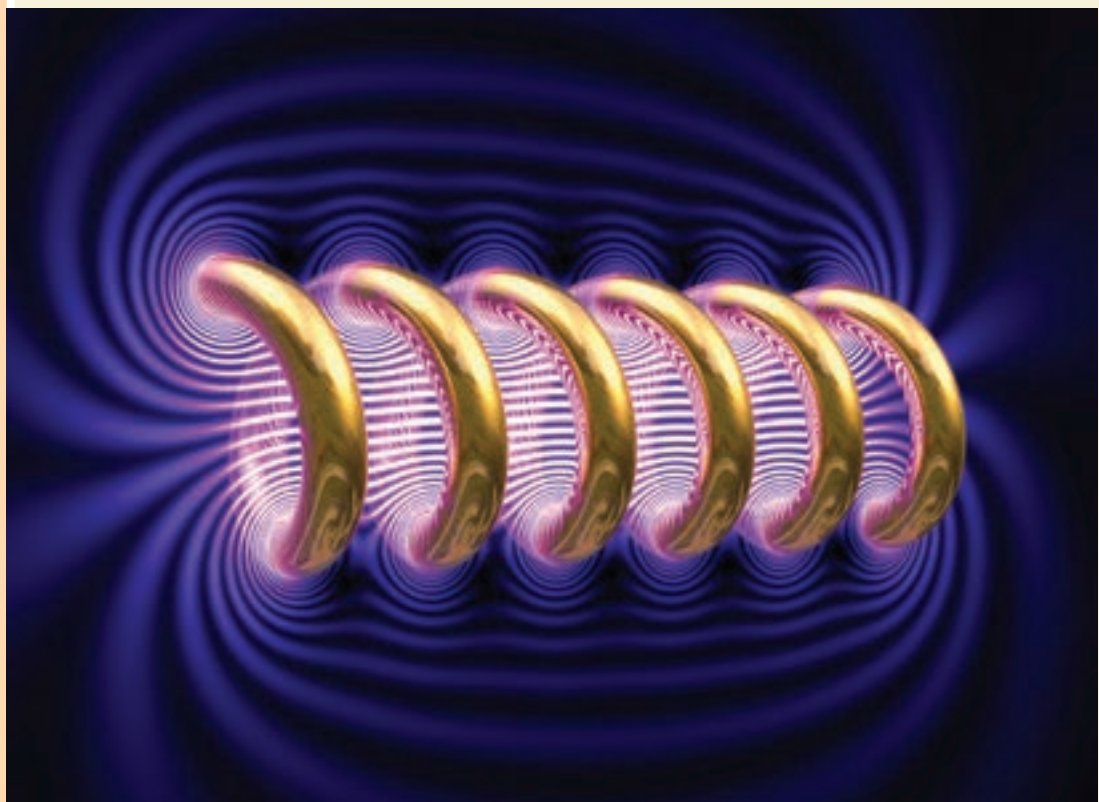


۱۳ در مدار شکل روبه‌رو جریان I_1 چند آمپر است؟



۱۴ در شکل روبه‌رو نیروی محرکه الکتریکی و مقاومت داخلی منبع را که توان خروجی آن به ازای $I_1 = 5/00$ A برابر $9/50$ W و به ازای $I_2 = 7/00$ A برابر $12/6$ W است، محاسبه کنید.

میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی



در فضای اطراف هر رسانای حامل جریان میدان مغناطیسی به وجود می‌آید.

اگر تاکنون یک اسباب بازی مغناطیسی یا یک قطب نما را به کار برده باشید، یا آهنربایی را برای نگهداشتن یک ورق کاغذ روی بدنه یخچال مورد استفاده قرار داده باشید، احتمالاً از مشاهده پدیده های مربوط به آن، شگفت زده شده اید! آهنرباها برای بسیاری از ما جذابیت خاصی دارند.

کاربردهای مغناطیس در جنبه های مختلف زندگی بشر رشدی روزافزون دارد. برای بیش از یک قرن ضبط صدا و تصویر روی صفحه ها و نوارهایی صورت می گرفت که مغناطیس نقش اصلی را در آنها ایفا می کرد. اگرچه فناوری دیجیتال به میزان زیادی جایگزین ضبط مغناطیسی به شیوه های سنتی شده است، با وجود این، ذخیره اطلاعات به صورت صفر و یک هنوز هم به محیط های مغناطیسی وابسته است.

مغناطیس و آهنرباها همچنین در بلندگوی گوشی ها، تلویزیون ها، رایانه ها و اغلب سامانه های هشدار ایمنی کاربرد دارد. پزشکی امروز نیز در تشخیص بیماری ها و جراحی های مختلف بهره فراوانی از مغناطیس و آثار آن می برد (شکل ۱-۳).

۱-۳- مغناطیس و قطب های مغناطیسی

یونانیان باستان، بیش از ۲۵۰۰ سال پیش با پدیده آهنربایی آشنا بودند. تالس که اغلب از او به عنوان پدر علم یونان یاد می شود، ماده کانی مگنتیت (Fe_3O_4) را که ویژگی آهنربایی دارد می شناخت (شکل ۲-۳). همان گونه که می دانید، ماده هایی که این ویژگی را دارند آهنربا می نامند. چینی های باستان نیز با ویژگی های مغناطیسی برخی از سنگ های آهنربا آشنایی داشتند و تکه هایی از این سنگ ها را به صورت قطب نماهای ساده در دریانوردی به کار می بردند.

در سال های گذشته دیدید که هرگاه آهنربایی را درون ظرف محتوی براده آهن فرو ببریم، براده های آهن به مقدار زیادی جذب ناحیه های خاصی از آهنربا می شوند. این ناحیه ها را **قطب های مغناطیسی** یا **قطب های آهنربا** می نامند (شکل ۳-۳).

هرگاه یک آهنربای میله ای را با ریسمان از مرکزش طوری بیاویزیم که بتواند آزادانه بچرخد، یک سر آن به سوی شمال قرار می گیرد (شکل ۴-۳). این سر را قطب شمال یا قطب N و سر دیگر را قطب جنوب یا قطب S می نامند.



شکل ۱-۳ با بهره گیری از دستگاه های MRI^۱ می توان جزئیات بافت نرم (مانند تصویر پای که در اینجا نشان داده شده است) را دید که در تصویربرداری پرتو X قابل مشاهده نیست.



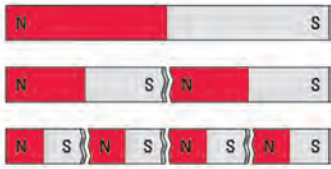
شکل ۲-۳ پدیده های مغناطیسی حدود ۲۵۰۰ سال پیش در تکه هایی از سنگ آهن مغناطیده در نزدیکی شهر مگنسیا (که نام امروزی آن مانیسا و در غرب ترکیه واقع است) مشاهده شد. این تکه ها نمونه هایی هستند از چیزی که امروز آهنربای دائمی خوانده می شود.



شکل ۳-۳ در یک آهنربا، به هر شکلی که باشد، دو ناحیه وجود دارد که خاصیت مغناطیسی در آنها بیش از قسمت های دیگر است.



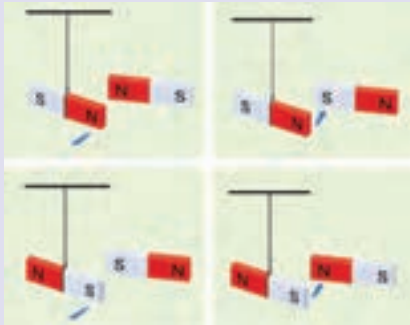
شکل ۴-۳ آهنربا در این وضعیت مانند یک قطب نما رفتار می کند.



شکل ۳-۵ شکستن یک آهنربای میله‌ای به دو بخش. هر بخش یک آهنربای کامل است که دو قطب دارد.

تمام آهنرباها هم قطب N دارند و هم قطب S. اگر یک آهنربای میله‌ای را دو قسمت کنید، هر بخش آن دوباره دارای دو قطب آهنربایی است (شکل ۳-۵). اگر باز هم آنها را به دو بخش تقسیم کنید، چهار آهنربای کامل خواهید داشت. می‌توانید تقسیم کردن را ادامه دهید، ولی هرگز یک قطب تنها یا به عبارتی دیگر **تک قطبی مغناطیسی** نخواهید داشت. حتی وقتی قطعه شما به اندازه یک اتم برسد، دو قطب دارد که نشان می‌دهد خود اتم نیز می‌تواند یک آهنربا باشد!

پرسش ۱-۳



با توجه به شکل روبه‌رو عبارت زیر را با کلمه‌های مناسب کامل کنید. وقتی قطب‌های همنام دو آهنربا را به یکدیگر نزدیک می‌کنیم، یکدیگر را اما اگر قطب‌های ناهمنام آنها را به یکدیگر نزدیک کنیم، یکدیگر را

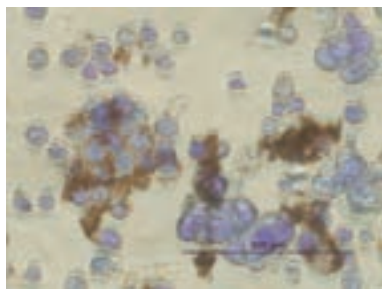
فعالیت ۱-۳



عقربه قطب‌نما آهنربای کوچکی است که می‌تواند آزادانه دور محور خود بچرخد.

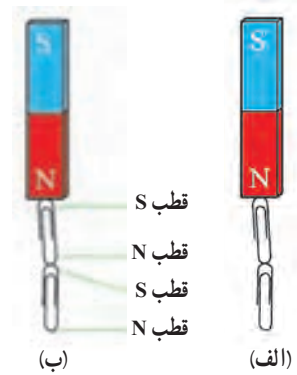
الف) چند آهنربا به شکل‌های مختلف انتخاب کنید. به کمک مقداری براده آهن یا تعدادی سوزن ته‌گرد، محل قطب‌های هر یک از آهنرباها را تعیین کنید.
ب) قطب‌نماهایی که دربانوردان و کوهنوردان برای تعیین جهت به کار می‌برند، در واقع یک آهنربای میله‌ای نازک است که روی پایه‌ای سوار شده است و می‌تواند آزادانه بچرخد و جهت‌های تقریبی شمال و جنوب جغرافیایی را نشان دهد (شکل روبه‌رو). آزمایشی طراحی کنید و به کمک آن، یک قطب‌نمای ساده بسازید و جهت تقریبی شمال و جنوب مکانی را که در آن زندگی می‌کنید تعیین کنید.

نانو ذره‌های مغناطیسی برای درمان



لکه‌های تیره در تصویر میکروسکوپی روبه‌رو، باخته (سلول)‌های سرطانی هستند که از توموری جدا شده‌اند و خطر پخش آنها در سرتاسر بدن بیمار وجود دارد. در یک روش تجربی برای مبارزه با این باخته‌ها از ذره‌های یک ماده مغناطیسی استفاده می‌شود که به بدن تزریق می‌شوند. این ذره‌ها با ماده شیمیایی خاصی پوشیده شده‌اند که به‌طور ترجیحی به سلول‌های سرطانی متصل می‌شوند. سپس با استفاده از یک آهنربا در بیرون از بدن بیمار، این ذره‌ها بیرون «رانده» می‌شوند و سلول‌های سرطانی را با خود می‌برند.

القای مغناطیسی: شکل ۳-۶ الف آهنربایی را نشان می‌دهد که دو گیره آهنی کاغذ را جذب کرده است. این تجربه ساده نشان می‌دهد که ویژگی مغناطیسی درگیره‌های فلزی القا شده است و تا زمانی که گیره‌ها با آهنربا در تماس باشند، این ویژگی را در خود حفظ می‌کنند. این پدیده را **القای مغناطیسی** می‌نامند. ویژگی آهنربایی ناشی از القای مغناطیسی همواره به صورتی است که قطعه‌های آهنی جذب آهنربای اصلی می‌شوند (شکل ۳-۶ ب). القای مغناطیسی تنها در آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهایی از این عناصر تولید می‌شود. در بخش پایانی همین فصل، با تفصیل بیشتری با مواد مغناطیسی و ویژگی‌های آنها آشنا خواهیم شد.



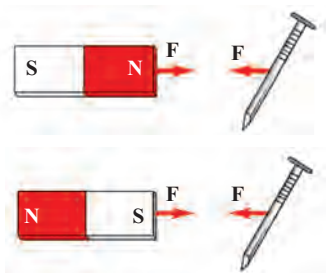
شکل ۳-۶ الف) وقتی آهنربایی در نزد یک گیره آهنی قرار می‌گیرد در آنها خاصیت مغناطیسی القا می‌کند. (ب) در پدیده القای مغناطیسی همواره جذب وجود دارد (به قطب‌های القا شده درگیره‌ها توجه کنید).

پرسش ۲-۳

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

۲-۳-۲ میدان مغناطیسی

با نزدیک کردن آهنربا به میخ آهنی مشاهده می‌کنید که میخ به طرف آهنربا حرکت می‌کند و پس از مدت کوتاهی جذب آن می‌شود (شکل ۳-۷). برای توجیه این پدیده، مشابه آنچه درباره اجسام باردار دیدید، می‌گوییم در فضای اطراف آهنربا **میدان مغناطیسی** وجود دارد. میدان مغناطیسی نیز مانند میدان الکتریکی که در فصل ۱ با آن آشنا شدید، کمیتی برداری است و آن را با نماد \vec{B} نمایش می‌دهیم.



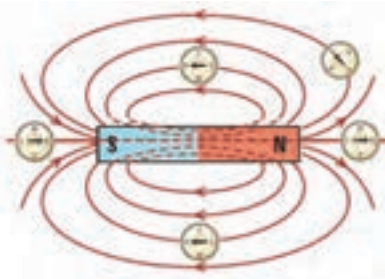
شکل ۳-۷ اطراف یک آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد به طوری که هر جسم آهنی مانند میخ را به سوی خود جذب می‌کند.

فعالیت ۲-۳



یکی از قطب‌های یک آهنربای میله‌ای را به یک عقربه مغناطیسی که روی پایه‌ای قرار دارد، نزدیک کنید (شکل روبه‌رو). آنچه را می‌بینید بیان کنید. با دور کردن آهنربا از عقربه مغناطیسی چه اتفاقی می‌افتد؟ چرا؟ (در صورتی که عقربه مغناطیسی در اختیار ندارید، سوزن ته‌گردی را از یک طرف، چند بار به آهنربایی مالش دهید و آن را روی سطح آب شناور سازید. به این ترتیب سوزن ته‌گرد مانند یک عقربه مغناطیسی رفتار می‌کند!)

میدان مغناطیسی مانند میدان الکتریکی، کمیتی برداری است و دارای بزرگی و جهت است. به کمک عقربه مغناطیسی می‌توان جهت میدان مغناطیسی را در هر نقطه از فضای اطراف یک آهنربا تعیین کرد (شکل ۳-۸).



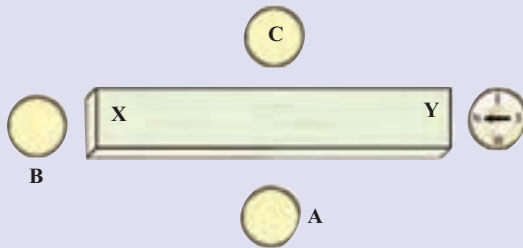
شکل ۳-۸ تعیین جهت میدان مغناطیسی به کمک عقربه مغناطیسی



شکل ۳-۹ خط‌های میدان مغناطیسی در هر نقطه در جهت عقربه مغناطیسی هستند و از قطب N خارج و به قطب S وارد می‌شوند.

بنابر تعریف، بردار میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای پیرامون یک آهنربا در جهتی است که وقتی قطب N عقربه مغناطیسی در آن نقطه قرار می‌گیرد، آن جهت را نشان می‌دهد. با تعیین جهت میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای اطراف آهنربا، می‌توان همان‌گونه که برای میدان الکتریکی انجام دادیم، خط‌های میدان مغناطیسی را رسم کنیم. شکل ۳-۹ خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف یک آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد. این خط‌ها از آهنربا می‌گذرند و هر یک از آنها یک حلقه بسته را تشکیل می‌دهند. افزون بر اینها، خط‌های میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند.

پرسش ۳-۳



شکل روبه‌رو یک آهنربای میله‌ای و چهار عقربه مغناطیسی را نشان می‌دهد که جهت‌گیری یکی از آنها مشخص شده است. الف) کدام سر آهنربا قطب S و کدام سر قطب N است؟ ب) جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی را در نقطه‌های A و B و C تعیین کنید.

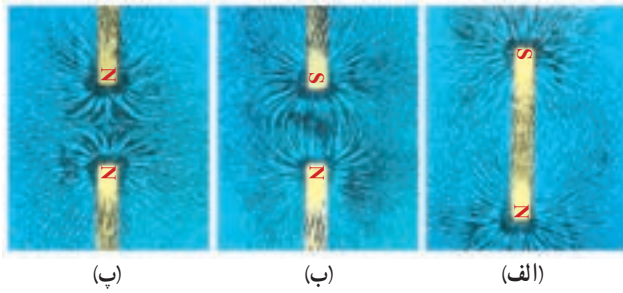
آزمایش ۱-۳

مشاهده مرحله خطوط میدان مغناطیسی

هدف آزمایش: مشاهده طرح خط‌های میدان مغناطیسی با استفاده از براده آهن
وسایله‌های آزمایش: آهنربای میله‌ای (دو عدد)، براده آهن، یک ورقه شیشه‌ای یا مقوایی، نمک پاش (یا وسیله دیگری برای پاشیدن براده آهن)

شرح آزمایش:

- ۱- یکی از آهنرباهای میله‌ای را روی میز قرار دهید و صفحه شیشه‌ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.
- ۲- به کمک نمک پاش براده آهن را به‌طور یکنواخت به ضخامت خیلی کم روی شیشه پاشید.



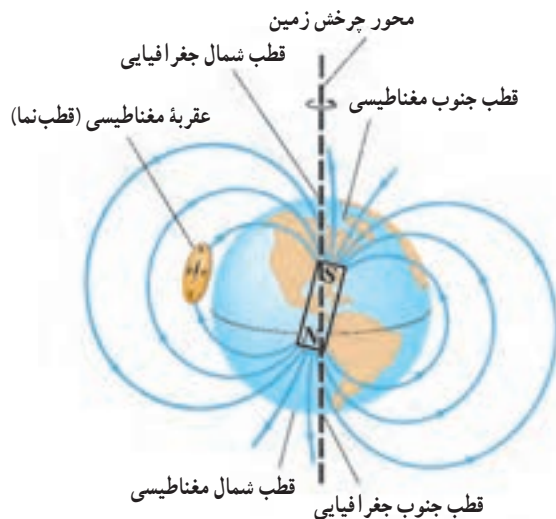
۳- چند ضربه آرام به صفحه شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرحی که روی صفحه شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است (شکل الف).

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

پرسش ۳-۴

با استفاده از ویژگی القای مغناطیسی، توضیح دهید که چرا در آزمایش ۳-۱ براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند.

میدان مغناطیسی زمین: زمین یک آهنربای عظیم و طرح خط‌های میدان مغناطیسی آن مانند آهنربای میله‌ای بزرگی است که در نزدیکی مرکز زمین قرار دارد (شکل ۳-۱). قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. در واقع، قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین فاصله نسبتاً زیادی از یکدیگر دارند. مثلاً قطب جنوب مغناطیسی تقریباً در فاصله 180° کیلومتری قطب شمال جغرافیایی قرار دارد. این بدان معناست که عقربه مغناطیسی در جهت شمال واقعی جغرافیایی قرار نمی‌گیرد و تا حدودی از شمال جغرافیایی انحراف دارد. این انحراف وابسته به مکان را **میل مغناطیسی** می‌نامند.



شکل ۳-۱: طرح ساده‌ای از میدان مغناطیسی زمین. عقربه مغناطیسی در هر نقطه در امتداد این خط‌های میدان قرار می‌گیرد. نشان دادن خط‌های میدان مغناطیسی زمین به صورت خط‌های میدان یک آهنربای میله‌ای، تنها یک توجیه ساده از ساختار پیچیده و ناشناخته عوامل ایجاد میدان مغناطیسی زمین است. شواهد زمین شناختی نشان می‌دهند که جهت این میدان در بازه‌های زمانی نامنظم از 10^4 تا 10^6 سال به طور کامل و آرون می‌شود.

مطالعه آزاد

خرچنگ خاردار کارائیب در برابر میدان‌های مغناطیسی بسیار حساس است. 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.



۳-۳- نیروی مغناطیسی وارد بر رسانای حامل جریان

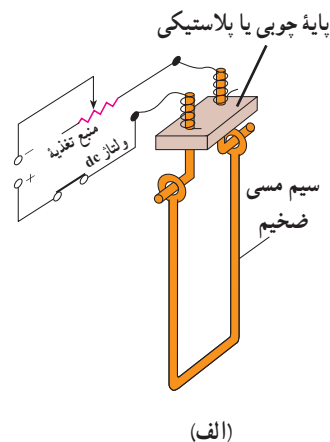
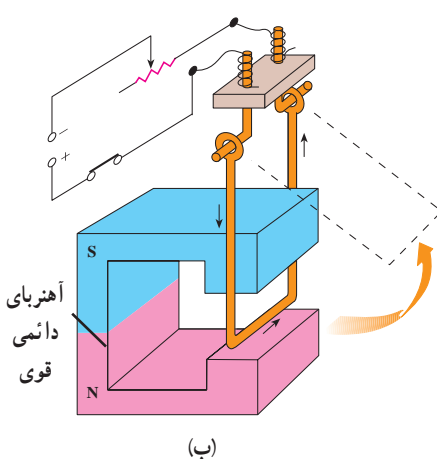
دیدیم که هرگاه یک عقربه مغناطیسی یا هر آهنربای دیگری در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بر آن نیرو وارد می‌شود. در ادامه خواهیم دید که بر سیم‌های حامل جریان الکتریکی نیز در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود، اندازه میدان مغناطیسی و یکای آن را می‌توان با استفاده از این اثر تعریف کرد. برای مشاهده این نیرو، آزمایش زیر را انجام دهید.

آزمایش ۳-۳

بررسی اثر میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان

وسایله‌های آزمایش: یک آهنربای نعلی شکل قوی، سیم مسی ضخیم، سیم رابط، رئوستا و منبع تغذیه
شرح آزمایش:

- ۱- مداري مطابق شکل الف ببندید.
- ۲- آهنربای نعلی شکل را مطابق شکل ب در اطراف سیم مسی قرار دهید.
- ۳- کلید را ببندید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، بنویسید.
- ۴- این آزمایش را چند بار تکرار کنید و هر بار آهنربا را در وضعیت جدیدی در اطراف سیم مسی قرار دهید و با بستن کلید، مشاهده‌های خود را یادداشت کنید.
- ۵- این آزمایش را با یک آهنربای دیگر تکرار کنید.
- ۶- اندازه و جهت جریان الکتریکی را تغییر دهید و آزمایش‌های بالا را تکرار کنید.
- ۷- نتیجه آزمایش را به کلاس گزارش دهید.

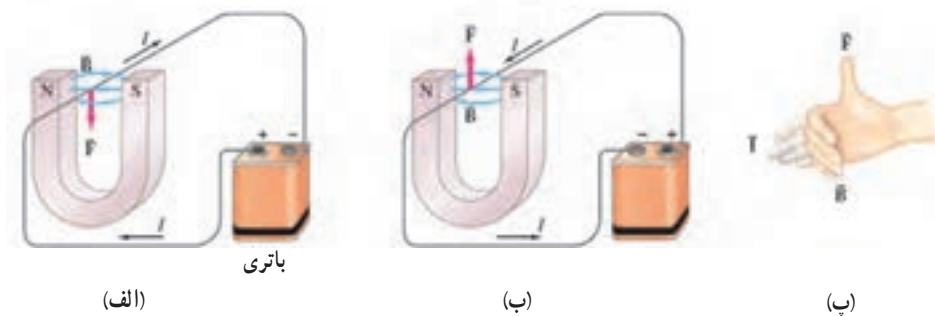


اورستد (فیزیکدان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی شبیه آزمایش ۲-۳ و اندازه‌گیری دقیق نیرویی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد:

نیروی که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، بر راستای سیم و نیز بر راستای میدان مغناطیسی عمود است.

جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی را می‌توان با استفاده از قاعده دست راست به این صورت تعیین کرد:

اگر دست راست خود را باز نگه دارید و چهار انگشت را مطابق شکل ۳-۱۱-پ در جهت جریان بگیرید به طوری که اگر انگشتان خود را خم کنید، در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرد در این صورت، انگشت شست شما جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان را نشان خواهد داد (شکل ۳-۱۱-ب).

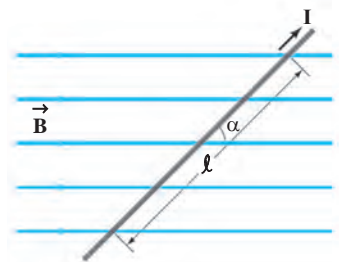


شکل ۳-۱۱ قاعده دست راست برای تعیین جهت نیروی \vec{F} وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی I در میدان مغناطیسی \vec{B}

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

$$F = I\ell B \sin\alpha \quad (۳-۱)$$

در این رابطه ℓ طول بخشی از سیم رساناست که در میدان مغناطیسی \vec{B} قرار دارد. زاویه داده‌ای را که جهت جریان با جهت بردار میدان مغناطیسی \vec{B} می‌سازد را به α نشان داده‌ایم (شکل ۳-۱۲).



شکل ۳-۱۲ سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی. نیروی مغناطیسی وارد بر سیم عمود بر صفحه کتاب و به طرف داخل است.

پرسش ۳-۵

اگر در شکل ۳-۱۲ 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؟



نیکولا تسلا (۱۸۵۶-۱۹۴۳) در کرواسی به دنیا آمد. بعداً او به آمریکا مهاجرت و مدتی با ادیسون همکاری کرد. ادیسون همواره با جریان مستقیم (dc) کار می‌کرد، با این وجود وی کارکردن با جریان متناوب (ac) و با ولتاژهای بسیار بالا را عملی ساخت. تسلا از اینکه جریان متناوب برای اولین بار در صندلی الکتریکی به منظور اعدام مورد استفاده قرار گرفت شدیداً ناراحت بود. وی همچنین طراح تولید برق در آبشار نیاگارا بود. به پاس خدمات وی، یکای میدان مغناطیسی در SI را با تسلا نشان می‌دهند.

یکای میدان مغناطیسی: رابطه ۱-۳ نشان می‌دهد وقتی سیم حامل جریان عمود بر راستای میدان مغناطیسی \vec{B} قرار بگیرد ($\sin\alpha=1$) بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر سیم به طول l و حامل جریان I ، بیشینه می‌شود. در این صورت داریم:

$$F_{\text{بیشینه}} = I\ell B \quad (2-3)$$

معمولاً از رابطه ۲-۳ که به صورت $B = \frac{F_{\text{بیشینه}}}{I\ell}$ بازنویسی می‌شود، برای تعریف یکای میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. یکای میدان مغناطیسی در SI **تسلا** نام دارد و با نماد T نشان داده می‌شود. بنا به تعریف، یک تسلا، بزرگی میدان مغناطیسی است که در آن، بر یک متر از سیمی که حامل جریان یک آمپر است و در راستای عمود بر بردار میدان قرار دارد نیرویی به بزرگی یک نیوتون وارد شود. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$1 \text{ تسلا} = \frac{1 \text{ نیوتون}}{(1 \text{ متر}) \times (1 \text{ آمپر})}$$

تسلا یکای بزرگی است و در کاربردهای عملی از یکای کوچک‌تری به نام **گاوس** استفاده می‌کنند که با نماد G نمایش داده می‌شود.

$$1 T = 10^4 G \quad \text{یا} \quad 1 G = 10^{-4} T$$

مثال ۱-۳

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی به بزرگی 4 mT در راستایی قرار دارد که با جهت میدان زاویه 3° می‌سازد. اگر جریان در سیم پنج آمپر باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر یک متر از این سیم را محاسبه کنید.
پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$B = 4 \text{ mT} = 4 \times 10^{-3} \text{ T} = 4 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$\alpha = 3^\circ, \ell = 1 \text{ m}, I = 5 \text{ A}, F = ?$$

با قراردادن داده‌های بالا در رابطه ۱-۳ داریم:

$$\begin{aligned} F &= I\ell B \sin\alpha \\ &= (5 \text{ A})(1 \text{ m})(4 \times 10^{-5} \text{ T}) \sin 3^\circ \\ &= 1 \times 10^{-5} \text{ N} = 0.1 \text{ mN} \end{aligned}$$

این نیرو بسیار کوچک و مقدار آن تقریباً ده مرتبه از وزن یک سوزن ته‌گرد کمتر است.

پرسش ۳-۴

سیم افقی مستقیم حامل جریانی در یک میدان مغناطیسی یکنواخت افقی که جهت آن از شمال به جنوب است، قرار دارد. جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را تعیین کنید؛ الف) اگر سیم در راستای شمال - جنوب و جریان آن از شمال به جنوب باشد. ب) اگر سیم در راستای شرق - غرب و جریان آن از غرب به شرق باشد.



کارل فریدریش گاوس (۱۷۷۷-۱۸۵۵)، ریاضی‌دان، فیزیک‌دان و ستاره‌شناس آلمانی است که مدتی مدیر رصدخانه گوتینگن بوده است. گاوس یکی از ریاضی‌دان‌های بزرگ و برجسته‌ترین کارش در نظریه اعداد است. او به انجام محاسبه‌های بی‌اندازه بفرنج علاقه‌مند بود. وی همچنین روش‌های تازه‌ای برای محاسبه در مکانیک سماوی به دست آورد. گاوس روی پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی نیز فعالیت زیادی کرد و قانونی به نام وی در مبحث الکتریسیته وجود دارد.

تمرین ۳-۱

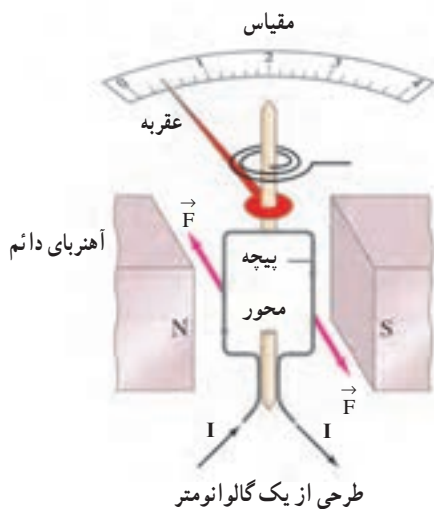
در قسمتی از دیوار خانه‌ای، یک سیم مستقیم $2/5$ متری قرار دارد که در لحظه‌های معینی، حامل جریان $1/5 A$ از شرق به غرب است. بزرگی میدان مغناطیسی زمین در محل این سیم 55° گاوس و جهت آن از جنوب به شمال است. نیروی مغناطیسی وارد بر این سیم، با توجه به شرایط ذکر شده، چقدر است؟

فعالیت ۳-۳

آزمایشی را طراحی کنید که به کمک آن بتوان نیروی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی را اندازه‌گیری کرد.

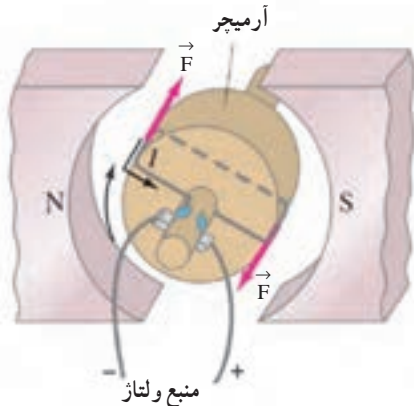
الف) طرز کار گالوانومتر: گالوانومتر وسیله‌ای است که با آن جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک را اندازه می‌گیرند. امروزه وسیله‌های اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی (یعنی شدت جریان، اختلاف پتانسیل، مقاومت و ...) معمولاً عقربه‌ای یا رقمی (دیجیتالی) هستند. با استفاده از مطالبی که تاکنون فراگرفته‌ایم، می‌توان ساز و کار گالوانومتر عقربه‌ای را مورد بررسی قرار داد.

هر گالوانومتر قابی دارد که دور آن سیم پیچیده شده است. این قاب در یک میدان مغناطیسی دائمی قوی قرار دارد. وقتی جریان از این پیچه می‌گذرد، میدان مغناطیسی با وارد کردن نیرو به قاب، آن را می‌چرخاند (شکل روبه‌رو را ببینید) و عقربه متصل به قاب منحرف می‌شود. هر قدر جریان



بزرگ‌تر شود، چرخش پیچه و انحراف عقربه خواهد شد.

اگر جهت جریان وارون شود، جهت چرخش پیچه و انحراف عقربه نیز وارون خواهد شد. با قطع جریان، فنر ظرفی که در پشت پیچه قرار دارد، پیچه و عقربه را به حالت اولیه خود برمی‌گرداند. صفحه گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می‌چرخد را برحسب آمپر مدرج می‌کنند، به این ترتیب که در مقابل هر زاویه، اندازه‌گیری که عقربه را به اندازه آن زاویه منحرف می‌کند، ثبت می‌کنند.



طرحی از یک موتور الکتریکی ساده. در این نوع از موتورها پیچه دور یک استوانه آهنی پیچیده می‌شود که به آن روتور می‌گویند.

(ب) موتور الکتریکی: موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این موتورها در انجام کارهای مختلف روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرند، و اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها نظیر جاروی برقی، مته برقی، آسیاب برقی، ماشین لباسشویی، پنکه و... را تشکیل می‌دهند.

ساختمان برخی از موتورهای الکتریکی مانند ساختمان گالوانومتر است، از این نظر که در این نوع موتور الکتریکی نیز عبور جریان از یک قاب (به نام روتور) واقع در میدان مغناطیسی، باعث چرخش پیچه می‌شود (شکل روبه‌رو). چرخش قطعات در دستگاه‌های نام برده در بالا از این حرکت پیچه ناشی می‌شود.

(پ) میدان‌های مغناطیسی بدن: در بدن انسان سالم با اندام متوسط حدود ۴ گرم عنصر آهن وجود دارد که ۳ گرم آن دائماً در حال واکنش‌های بیوشیمیایی است. یک گرم باقیمانده، ذخیره آهن بدن را تشکیل می‌دهد که عمدتاً در کبد ذخیره می‌شود. اندازه دقیق این ذخیره بستگی به موازنه جذب و دفع آهن در بدن دارد و کم یا زیاد شدنش گویای اختلال‌ها و مرض‌های گوناگون است. مثلاً کاهش این ذخیره باعث کم‌خونی می‌شود. در چند دهه اخیر به دنبال کاربردهای موفقیت‌آمیز روش‌های مغناطیسی در پزشکی، پژوهشگران بسیاری به بررسی تعیین میزان آهن موجود در بدن (بدون متوسل شدن به نمونه‌برداری) از طریق اندازه‌گیری‌های مغناطیسی پرداخته‌اند. تمام یاخته‌های زنده بدن انسان به‌طور الکتریکی فعال‌اند. جریان‌های الکتریکی ضعیف در بدن،



میدان‌های مغناطیسی ضعیف ولی قابل اندازه‌گیری تولید می‌کنند. اندازه میدان‌های حاصل از عضله‌های اسکلتی کوچک‌تر از $10^{-10} T$ ، یعنی در حدود یک میلیونیم میدان مغناطیسی زمین است. میدان‌های مغناطیسی حاصل از مغز بسیار ضعیف‌تر و در حدود $10^{-12} T$ هستند و برای اندازه‌گیری آنها باید مغناطیس‌سنج‌های بسیار حساس به کار برد. در حال حاضر، چنین مغناطیس‌سنج‌هایی به نام اسکویید^۱ ساخته شده‌اند. شکل بالا یک دستگاه اسکویید را نشان می‌دهد که در حال اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تولید شده در مغز است.

۱- SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)

۳-۴- نیروی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی

در بخش پیش دیدیم که بر سیم حامل جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود. اگر جریان صفر شود، نیروی وارد بر سیم نیز صفر می‌شود. در فصل ۲ دیدیم که جریان الکتریکی در واقع حرکت بارهای الکتریکی است و صفر شدن جریان در یک رسانا به طور متوسط به معنای توقف حرکت بارهای الکتریکی است. پس نتیجه می‌گیریم که نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی، در واقع بر بارهای متحرکی وارد می‌شود که در سیم جریان الکتریکی را به وجود می‌آورند.

آزمایش نشان می‌دهد که اگر ذره باردار q با سرعت \vec{v} در میدان مغناطیسی \vec{B} حرکت کند، (به شرط آنکه جهت حرکت آن موازی با میدان نباشد) بر آن نیروی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۳-۱۳ بر راستای \vec{v} و میدان مغناطیسی \vec{B} عمود است. این نیرو را **نیروی مغناطیسی** می‌نامند و جهت آن مطابق شکل به کمک قاعده دست راست تعیین می‌شود. باید توجه کنیم که جهت نیروی وارد بر بار منفی همواره در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت است.

آزمایش نشان می‌دهد اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر یک ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی مطابق رابطه زیر به چهار عامل بستگی دارد:

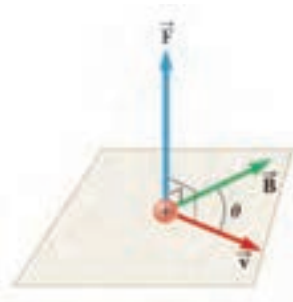
$$F = qvB \sin \theta$$

(۳-۳)

در این رابطه θ زاویه‌ای است که جهت حرکت بار الکتریکی (یعنی بردار \vec{v}) با جهت میدان مغناطیسی (یعنی بردار \vec{B}) می‌سازد (شکل ۳-۱۴).



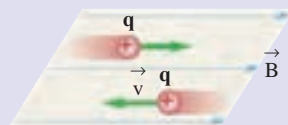
شکل ۳-۱۳ بر ذره باردار q یا $-q$ که با سرعت \vec{v} در میدان مغناطیسی \vec{B} حرکت می‌کند نیروی مغناطیسی \vec{F} وارد می‌شود که جهت آن با قاعده دست راست تعیین می‌شود.



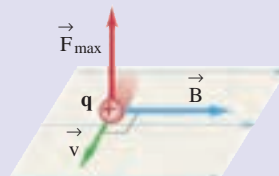
شکل ۳-۱۴ نیروی \vec{F} بر هر دو بردار \vec{v} و \vec{B} عمود است. به عبارت دیگر نیروی \vec{F} بر صفحه‌ای که توسط \vec{v} و \vec{B} تشکیل می‌شود عمود است.

پرسش ۳-۷

با توجه به رابطه ۳-۳ دریافت خود را از هر یک از شکل‌های الف و ب به طور جداگانه بیان کنید.

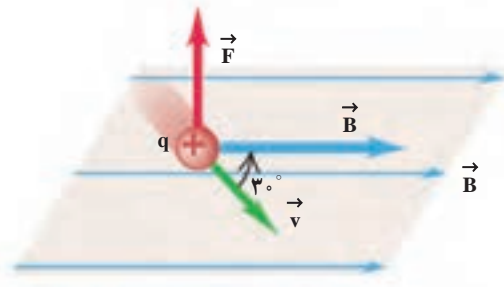


(ب)



(الف)

مثال ۲.۳



ذره‌ای با بار $+4$ میکروکولن و با سرعت $2 \times 10^2 \text{ m/s}$ در جهتی حرکت می‌کند که با میدان مغناطیسی یکنواخت 100 G زاویه 3° می‌سازد (شکل روبه‌رو). بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

پاسخ: با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

$$q = +4 \mu\text{C} = +4 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$v = 2 \times 10^2 \text{ m/s}, B = 100 \text{ G} = 100 \times 10^{-4} \text{ T} = 10^{-2} \text{ T}$$

$$\theta = 3^\circ, F = ?$$

$$F = qvB \sin \theta$$

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

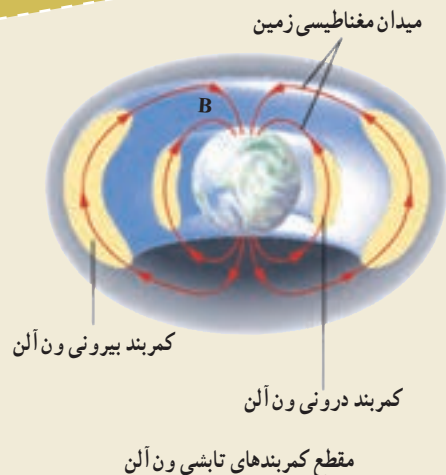
$$= 4 \times 10^{-5} \text{ N}$$

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

تمرین ۲.۳

بر الکترونی ($q = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) که با زاویه 6° نسبت به یک میدان مغناطیسی به بزرگی 35 G حرکت می‌کند، نیروی مغناطیسی به بزرگی $4/6 \times 10^{-15} \text{ N}$ وارد می‌شود. بزرگی سرعت این الکترون چقدر است؟

مطالعه آزاد



کمرندهای تابشی ون آلن

در بیرون از جو زمین، ذره‌های باردار بسیاری با سرعت‌های فوق‌العاده زیادی در حرکت‌اند. این ذره‌های سریع را که معمولاً از جنس پروتون، هسته اتم هلیوم (ذره آلفا) و الکترون هستند **پرتوهای کیهانی** می‌نامند. این پرتوها علاوه بر فضا نوردان، برای سامانه‌های الکترونیکی واقع در فضا نیز خطرناک‌اند. خوشبختانه بیشتر این پرتوهای باردار توسط میدان مغناطیسی زمین منحرف می‌شوند و مانع از آسیب‌رسانی به موجودات و سامانه‌های روی زمین می‌شود. ذرات بارداری که در میدان مغناطیسی زمین به دام می‌افتند،

کمرندهای تابشی ون آلن را تشکیل می‌دهند (شکل صفحه قبل). این کمرندها که دو حلقه کلوچه مانند میان تهی را در اطراف زمین تشکیل می‌دهند، ون آلن در سال ۱۹۵۸ میلادی از داده‌های گردآوری شده توسط ماهواره اکسپلورر I کشف



تصویری خیره کننده از شفق قطبی

کرد و به افتخار او نام گذاری شده‌اند. فضانوردان در فاصله‌های ایمن بسیار پایین تر از این کمرندهای تابشی دور زمین می‌گردند. توفان‌های خورشیدی، ذره‌های باردار را به صورت فواره‌های عظیمی پرتاب می‌کنند که بسیاری از آنها از نزدیکی زمین می‌گذرند و در میدان مغناطیسی آن به دام می‌افتند. **شفق قطبی (نورهای شمالی)** پدیده زیبایی است که بر اثر برخورد ذره‌های باردار موجود در کمرند ون آلن با مولکول‌های جو زمین به وجود می‌آید (شکل روبه‌رو). در نیمکره جنوبی این پدیده **شفق جنوبی** نامیده می‌شود.

۳-۵- آثار مغناطیسی جریان الکتریکی

تا اینجا نیروهایی را بررسی کردیم که بر بارهای متحرک و رساناهای حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شوند. هر چند بی‌بردی که در فضای اطراف آهنرباهای دائمی نیز میدان مغناطیسی وجود دارد. با وجود این، در ادامه این فصل با چشمه‌های دیگر میدان مغناطیسی آشنا خواهیم شد. اورستد دانشمند دانمارکی، در سال ۱۸۲۰ میلادی ضمن انجام برخی آزمایش‌های الکتریسیته، مشاهده کرد که عقربه مغناطیسی در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می‌شود (شکل ۳-۱۵). او با انجام دادن آزمایش‌های بیشتر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم رسانا، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. این کشف اورستد نخستین گام در راه درک رابطه بین الکتریسیته و مغناطیس بود که به گسترش مبحث الکترومغناطیس انجامید. در این بخش، به بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم‌ها می‌پردازیم.



هانس کریستین اورستد (۱۷۷۷-۱۸۵۱)، فیزیک‌دان دانمارکی ابتدا به مطالعه فلسفه طبیعت رو آورد و سپس مطالب بسیاری درباره موضوع‌های فلسفی نوشت. اورستد در مقاله‌ای که به سال ۱۸۱۳ منتشر شد پیش‌بینی کرد که رابطه‌ای میان الکتریسیته و مغناطیس می‌توان یافت. او در سال ۱۸۲۰ قطب‌نمایی را زیر یک سیم حامل جریان گذاشت و کشف کرد که یک میدان مغناطیسی جریان الکتریکی را احاطه می‌کند. در سال‌های بعد او نظر دانشمندان دیگر مبنی بر اینکه کشف او درباره الکترومغناطیس تصادفی بوده است را به شدت انکار کرد.

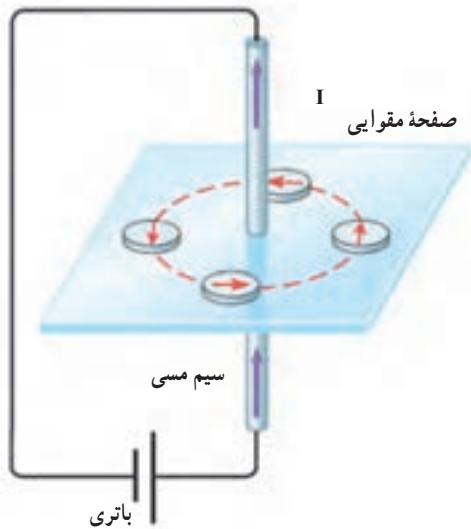


شکل ۳-۱۵ میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را می‌توان با قرار دادن تعدادی عقربه مغناطیسی پیرامون آن نشان داد.

آزمایش ۳-۳

بررسی میدان مغناطیسی در اطراف سیم حامل جریان

آزمایش اورستد



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

شرح آزمایش:

۱- سیم مسی را از صفحه مقوایی بگذرانید و با آن مداری مطابق شکل روبه‌رو تشکیل دهید.

۲- قبل از برقراری جریان الکتریکی، عقربه مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرارگرفتن آن توجه کنید.

۳- با وصل کردن مدار، جریان الکتریکی را از سیم مسی عبور دهید و به جهت‌گیری عقربه مغناطیسی توجه کنید.

۴- عقربه مغناطیسی را در نقطه‌های مختلف روی مقوا قرار دهید و جهت آن را بررسی کنید.

۵- با توجه به جهت‌گیری عقربه در نقاط مختلف صفحه مقوایی، چند خط میدان مغناطیسی را رسم کنید.

۶- این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.

۷- به کمک چند باتری دیگر، تحقیق کنید که افزایش یا کاهش جریان چه تأثیری در نتیجه آزمایش دارد.

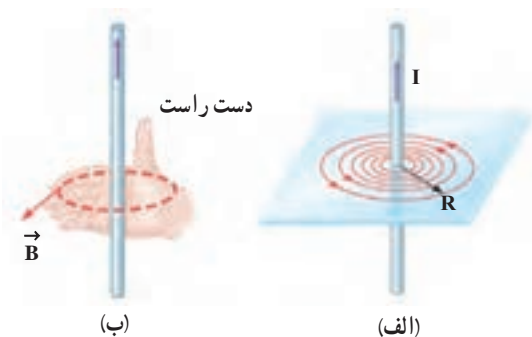
۸- نتیجه این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.

با انجام این آزمایش می‌بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک

سیم حامل جریان، مطابق شکل ۳-۱۶ الف به صورت دایره‌های هم‌مرکزی در اطراف سیم حامل جریان هستند. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقربه مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن، با استفاده از قاعده دست راست نیز می‌توان این جهت را تعیین کرد؛ بنابراین قاعده، اگر سیم را مطابق شکل ۳-۱۶ ب در دست راست خود بگیرید به گونه‌ای که انگشت شست در جهت جریان الکتریکی باشد، جهت خم شدن چهار انگشت دست شما جهت خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف سیم نشان می‌دهد.

آزمایش نشان می‌دهد که اندازه میدان مغناطیسی \vec{B} در اطراف یک سیم نازک دراز مستقیم حامل جریان الکتریکی ای به شدت I در نقطه‌ای که فاصله عمودی آن از سیم برابر R است (شکل ۳-۱۶ الف) با I نسبت مستقیم و با R نسبت وارون دارد؛ یعنی:

$$B \propto \frac{I}{R}$$

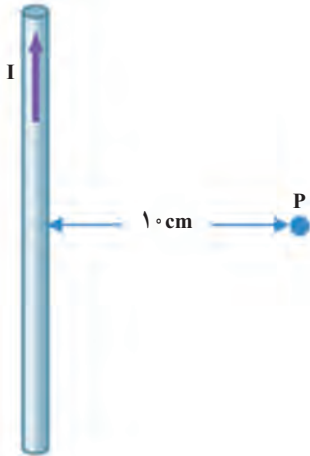


شکل ۳-۱۶ الف) خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف سیم بلند حامل جریان I . ب) استفاده از قاعده دست راست برای تعیین جهت \vec{B} در اطراف یک سیم بلند حامل جریان I .

ضریب تناسب در SI برابر $\frac{\mu_0}{2\pi}$ است که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر با $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$ است؛ در نتیجه داریم:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (4-3)$$

مثال ۳-۳



اندازهٔ میدان مغناطیسی ناشی از جریان ۲۰ آمپر را که از سیمی دراز و مستقیم می‌گذرد، در نقطه‌ای به فاصلهٔ ۱۰ cm از سیم حساب کنید (شکل روبه‌رو).

پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$I = 20 \text{ A}, \quad R = 10 \text{ cm} = 0.10 \text{ m}, \quad B = ?$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطهٔ ۴-۳ داریم:

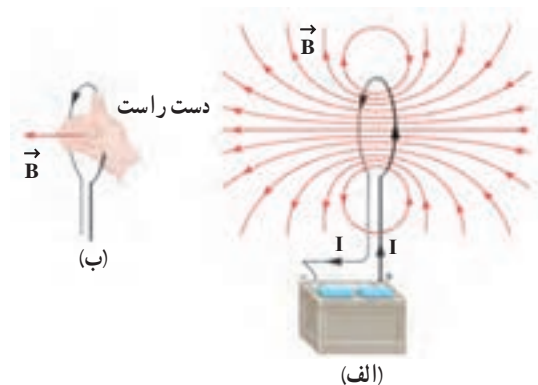
$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A})(20 \text{ A})}{2\pi(0.10 \text{ m})} \\ &= 4.0 \times 10^{-5} \text{ T} = 0.40 \text{ G} \end{aligned}$$

تمرین ۳-۳

سیم مستقیم بلندی حامل جریان ۱ A است. بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از این جریان در چه فاصله‌ای از سیم برابر $B = 0.5 \text{ G}$ (حدود بزرگی میدان مغناطیسی زمین) می‌شود؟

میدان مغناطیسی ناشی از یک حلقهٔ دایره‌ای حامل

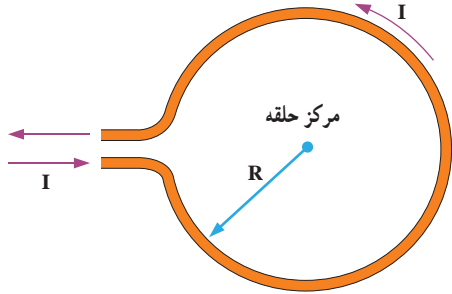
جریان: هرگاه سیم حامل جریانی را به صورت یک حلقه درآوریم، میدان مغناطیسی ناشی از آن در نقاط درون حلقه به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در شکل ۳-۱۷ الف یک حلقهٔ رسانای دایره‌ای به شعاع R که حامل جریان I است نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیهٔ داخل حلقه به یکدیگر نزدیک‌ترند؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است. افزون بر این، در نقطه‌های روی محور حلقه، میدان موازی محور است. جهت خط‌های میدان مغناطیسی حلقه را می‌توان با قاعدهٔ دست راست تعیین کرد که در شکل ۳-۱۷ ب نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۷ الف) خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک حلقهٔ حامل جریان. ب) استفاده از قاعدهٔ دست راست برای تعیین جهت خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقهٔ حامل جریان.

بزرگی میدان مغناطیسی حلقه‌ای به شعاع R و حامل جریان I در مرکز حلقه از رابطه زیر به دست می‌آید (شکل ۳-۱۸).

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (5-3)$$



شکل ۳-۱۸

اگر به یک موتور الکتریکی، آهنربای الکتریکی یا زنگ در بنگرید، پیچه‌هایی از سیم با تعداد زیادی دور را خواهید یافت که آن قدر به هم نزدیک‌اند که با تقریب خوبی می‌توان آن را یک حلقه دایره‌ای مسطح در نظر گرفت. از این پیچه‌ها که معمولاً به آنها **پیچه‌های مسطح** نیز گفته می‌شود، برای تولید میدان مغناطیسی در بسیاری از وسیله‌های برقی استفاده می‌شود.

بزرگی میدان مغناطیسی در مرکز پیچه مسطحی به شعاع R ، دارای N دور و حامل جریان I از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (6-3)$$

مثال ۳-۱۴

از پیچه مسطحی به شعاع $6/3 \text{ cm}$ که از 2000 دور سیم نازک درست شده است، جریان 20 mA می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه به دست آورید.

پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$R = 6/3 \text{ cm} = 6/3 \times 10^{-2} \text{ m} \text{ و } N = 2000 \text{ و } I = 20 \text{ mA} \text{ و } B = ?$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۳-۶ داریم:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A})(2000)(20 \times 10^{-3} \text{ A})}{2 \times (6/3 \times 10^{-2} \text{ m})} = 4/0 \times 10^{-4} \text{ T} = 4/0 \text{ G}$$

تمرین ۳-۱۴

بزرگی میدان مغناطیسی دور سر انسان به تقریب برابر $3/0 \times 10^{-8} \text{ G}$ اندازه‌گیری شده است. اگرچه جریان‌هایی که این میدان را به وجود می‌آورند بسیار پیچیده‌اند، ولی با در نظر گرفتن این جریان‌ها به صورت تک حلقه‌ای دایره‌ای به قطر 16 cm (پهنای یک سر نوعی) می‌توان اندازه آنها را تا حدودی تخمین زد. جریان لازم برای تولید این میدان در مرکز حلقه چقدر است؟

میدان مغناطیسی حاصل از سیملوله حامل جریان : سیملوله چند دور سیم است که

به شکل یک فنر پیچیده شده است (شکل ۳-۱۹-الف). اگر جریان الکتریکی از سیملوله‌ای عبور کند، در فضای اطراف سیملوله میدان مغناطیسی به وجود می‌آید.

طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک سیملوله حامل جریان الکتریکی در داخل و خارج آن در شکل ۳-۱۹-ب نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل می‌بینید، خط‌های میدان داخل سیملوله بسیار متراکم‌تر از خط‌های میدان در خارج آن است و این نشانگر بزرگ‌تر بودن میدان در داخل سیملوله است. علاوه بر این خط‌های میدان در داخل سیملوله، به ویژه در نقطه‌های نسبتاً دور از لبه‌های آن تقریباً موازی و هم‌فاصله‌اند و این نشانگر یکنواخت بودن میدان مغناطیسی درون سیملوله است. همان‌طور که دیده می‌شود، جهت میدان مغناطیسی در داخل سیملوله خلاف جهت میدان مغناطیسی در خارج آن است و مشابه حلقه حامل جریان به کمک قاعده دست راست تعیین می‌شود.

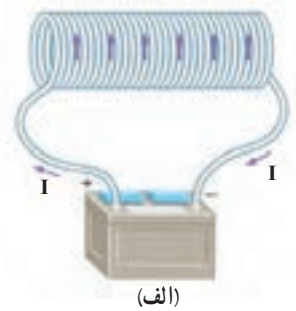
اگر شعاع سیملوله در مقایسه با طول آن، کوچک و حلقه‌های آن، خیلی به هم نزدیک باشند، میدان مغناطیسی داخل سیملوله در نقطه‌های دور از لبه‌ها یکنواخت است و اندازه آن از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$B = \mu_0 n I \quad (۷-۳)$$

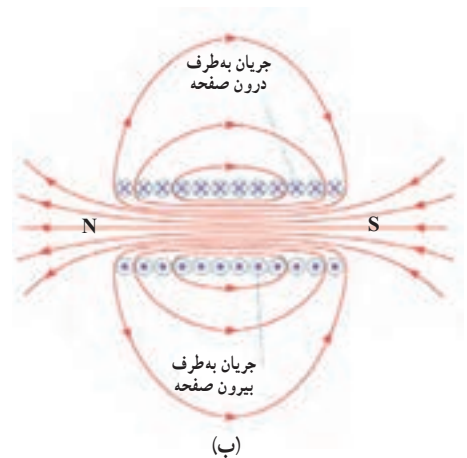
در این رابطه، I جریان و n تعداد دورهای سیملوله به ازای واحد طول است که از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$n = \frac{N}{\ell} \quad (۸-۳)$$

که N تعداد کل دورهای سیملوله و ℓ طول سیملوله است.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۹ الف سیمی که به صورت پیچیده مارپیچی بلند پیچیده شده باشد یک سیملوله است. **ب** میدان مغناطیسی داخل سیملوله (کمی دورتر از لبه‌ها) تقریباً یکنواخت است.

مثال ۳-۵

سیملوله‌ای به طول ۱۵cm و شعاع ۰/۷۵cm، دارای ۶۰۰ حلقه سیم نزدیک به هم است. اگر جریانی ۸۰۰mA از سیملوله بگذرد، بزرگی میدان مغناطیسی را در نقطه‌ای نزدیک به مرکز سیملوله پیدا کنید.

پاسخ : با توجه به داده‌های مسئله داریم :

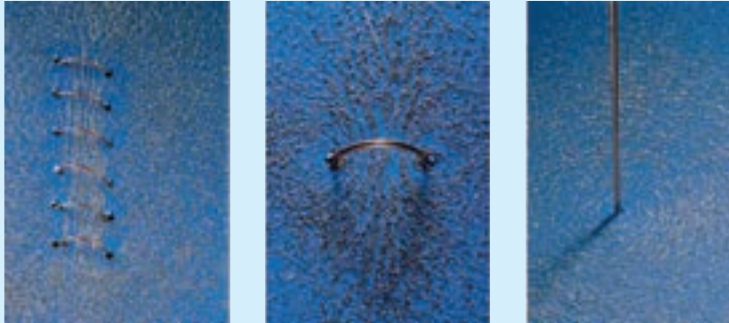
$$I = ۸۰۰\text{mA} \text{ و } B = ? \text{ و } \ell = ۱۵\text{cm} = ۰/۱۵\text{m} \text{ و } R = ۰/۷۵\text{cm} \text{ و } N = ۶۰۰$$

چون شعاع سیملوله خیلی کوچک‌تر از طول سیملوله است (حدود)، می‌توان از رابطه ۳-۷ برای پیدا کردن میدان مغناطیسی درون سیملوله و دور از لبه‌ها، استفاده کرد. به این ترتیب داریم :

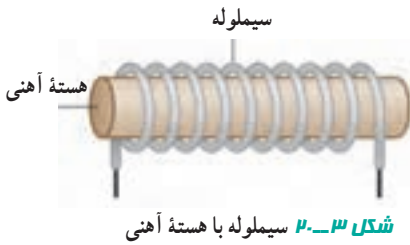
$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \left(\frac{N}{\ell}\right) I \\ = (4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}) \frac{600 \times (800 \times 10^{-3} \text{ A})}{0/15\text{m}} = 4/0 \times 10^{-3} \text{ T} = 40/0 \text{ G}$$

سیملوله‌ای چنان طراحی شده است که میدان مغناطیسی در مرکز آن 27° گاوس باشد. شعاع این سیملوله $1/4$ cm و طول آن 40% cm است. اگر بخواهیم جریان بیشینه‌ای که از آن می‌گذرد $1/2$ A باشد کمترین تعداد دورهای آن در واحد طول چقدر باید باشد؟

فعالیت ۳-۴



آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان با استفاده از براده آهن طرح خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم بلند، یک حلقه دایره‌ای و یک سیملوله حامل جریان به وجود آورد (شکل‌های روبه‌رو).



شکل ۳-۲۰ سیملوله با هسته آهنی

سیملوله با هسته آهنی – آهنربای الکتریکی: در بخش ۳-۱ دیدید با قرار دادن یک میله آهنی در میدان مغناطیسی می‌توان ویژگی مغناطیسی در آن القا کرد. اگر میله آهنی در یک سیملوله حامل جریان که میدان در آنجا از هر جای دیگر در اطراف سیملوله قوی‌تر است قرار گیرد، آن را **هسته سیملوله** می‌نامند (شکل ۳-۲۰). پیش از آنکه جریانی از سیملوله عبور کند، سیملوله و هسته آهنی خاصیت مغناطیسی ندارند. اما وقتی جریانی در سیملوله برقرار شود، میدان مغناطیسی سیملوله، خاصیت مغناطیسی در هسته آهنی القا می‌کند و هسته آهنی، آهنربا می‌شود. این آهنربا را **آهنربای الکتریکی** می‌نامند (شکل ۳-۲۱).

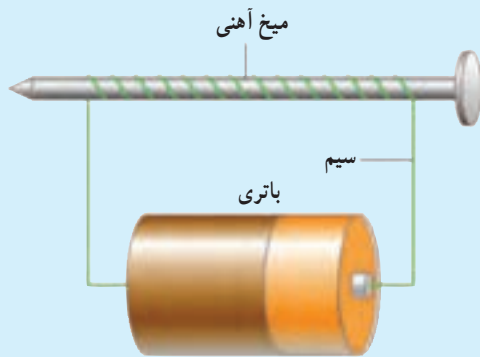
هر چه تعداد دورهای سیملوله در واحد طول و جریانی که از آن می‌گذرد بیشتر باشد، آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود.

وجود هسته آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیملوله می‌شود. میدان مغناطیسی سیملوله بدون هسته آهنی به قدری ضعیف است که در عمل کاربردهای کمی دارد.



شکل ۳-۲۱ این آهنربای الکتریکی صنعتی شامل پیچیده‌ای حامل جریان است که تعداد زیادی دور سیم دارد. میدان مغناطیسی حاصل از آن قادر است مقدار زیادی میله‌های فولادی و دیگر قراضه‌های آهن را بلند کند.

فعالیت ۳-۵



به کمک یک میخ آهنی، یک تکه سیم بلند و یک باتری، یک آهنربای الکتریکی بسازید (شکل روبه‌رو) و اثر آهنربایی آن را روی تعدادی سوزن ته‌گرد، گیره فلزی کاغذی یا مقداری براده آهن بررسی کنید. چه تغییراتی در آهنربای الکتریکی باعث زیاد شدن خاصیت آهنربایی آن می‌شود؟

۳-۶- نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان

در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی وجود دارد. همچنین در بخش ۳-۲ دیدیم که آهنربا بر سیم حامل جریان نیرو وارد می‌کند. 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؟ برای پاسخ دادن به این پرسش، آزمایش ۳-۴ را انجام دهید.

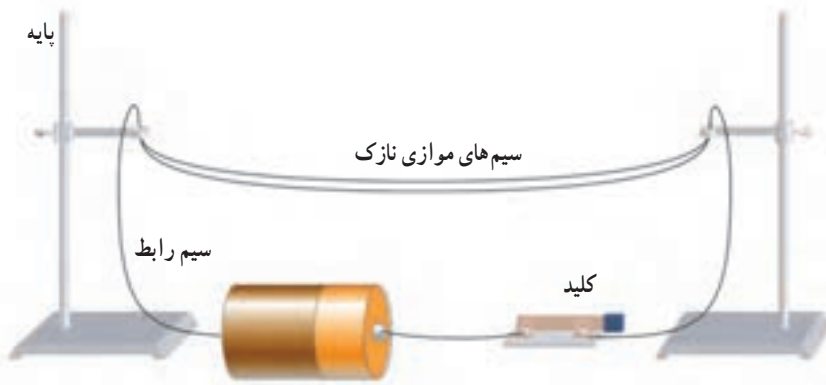
آزمایش ۳-۴

بررسی اثر دو سیم حامل جریان بر یکدیگر

وسایله‌های آزمایش: دو تکه سیم بلند نازک (با قطر کم)، باتری، کلید قطع و وصل، سیم رابط، دو عدد پایه

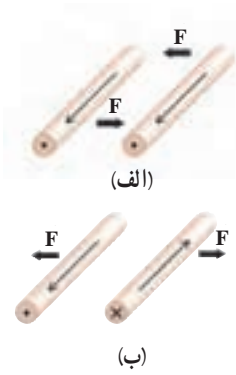
شرح آزمایش:

- ۱- مدار مطابق شکل زیر ببندید.
- ۲- با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. توجه کنید که جریان در دو سیم موازی، همسو است. مشاهده خود را گزارش دهید.

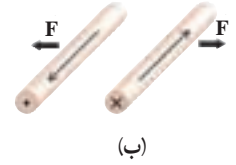


- ۳- مراحل ۱ و ۲ را برای وضعیتی که جریان در دو سیم موازی در جهت‌های مخالف (ناهمسو) باشد انجام دهید و نتیجه آزمایش را گزارش دهید.

میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی



(الف)

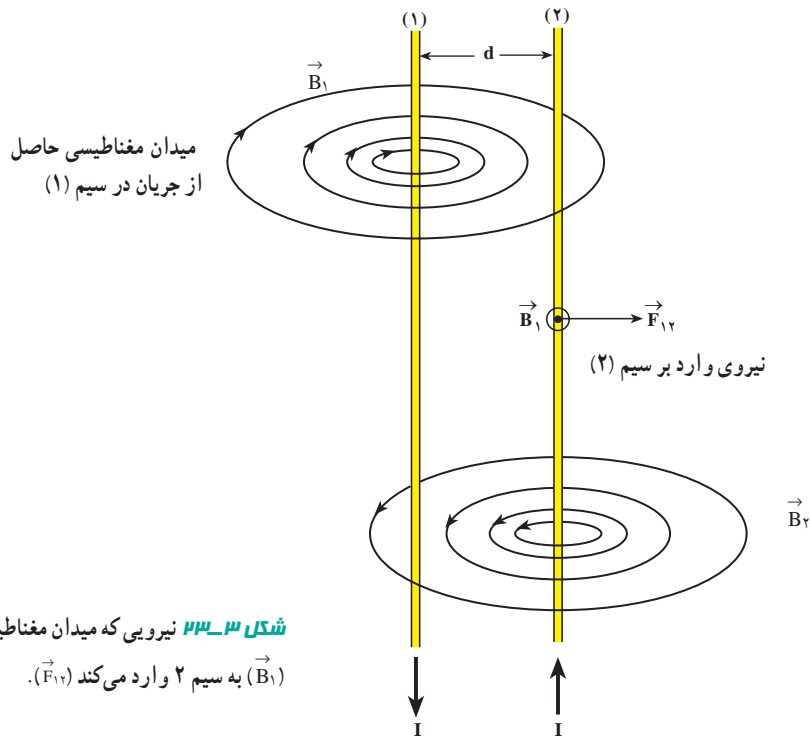


(ب)

شکل ۳-۲۲ الف دو سیم موازی حامل جریان همسو یکدیگر را می‌ربایند. **ب** دو سیم موازی حامل جریان ناهمسو، یکدیگر را می‌رانند.

آزمایش ۳-۴ نشان می‌دهد که سیم‌های حامل جریان الکتریکی بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. هرگاه جریانی که از دو سیم می‌گذرد همسو باشد، دو سیم یکدیگر را می‌ربایند (شکل ۳-۲۲-الف) و اگر جریانی که از دو سیم می‌گذرد در جهت‌های مخالف باشد، دو سیم یکدیگر را می‌رانند (شکل ۳-۲۲-ب).

نیروی وارده بر هر سیم را می‌توان برحسب میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم دیگر توضیح داد. برای این کار، دو سیم مستقیم و خیلی دراز موازی حامل جریان I و به فاصله d از یکدیگر را مطابق شکل ۳-۲۳ در نظر می‌گیریم. جریان الکتریکی در سیم شماره (۱) در فضای اطراف آن، میدان مغناطیسی \vec{B}_1 را به وجود می‌آورد. جهت میدان \vec{B}_1 در محل سیم شماره (۲) همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است برونسو است. چون سیم شماره (۲) نیز حامل جریان الکتریکی I است، میدان \vec{B}_1 بر آن نیرو وارد می‌کند. این نیرو را در شکل با \vec{F}_{12} نشان داده‌ایم، جهت \vec{F}_{12} با استفاده از قاعده دست راست تعیین می‌شود.



شکل ۳-۲۳ نیرویی که میدان مغناطیسی سیم ۱ (\vec{B}_1) به سیم ۲ وارد می‌کند (\vec{F}_{12}).

تمرین ۳-۴

الف) جهت نیروی وارد بر سیم شماره (۱) در شکل ۳-۲۳ را با استدلالی مشابه تعیین کنید.
 ب) جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های همسو را با رسم شکل و استفاده از قاعده دست راست مشخص کنید.
 پ) از دو سیم بلند موازی که به فاصله d از یکدیگر قرار دارند، جریان‌های همسوی I می‌گذرد. نیرویی را که به یک متر از هریک از سیم‌ها وارد می‌شود به دست آورید.

دیدیم که در دو سیم مستقیم دراز و موازی حامل جریان، با توجه به جهت جریان برهم نیروهای ربایشی یا رانشی وارد می‌کنند، این واقعیت، اساس تعریف یکای جریان الکتریکی یعنی آمپر در SI است. مطابق این تعریف :

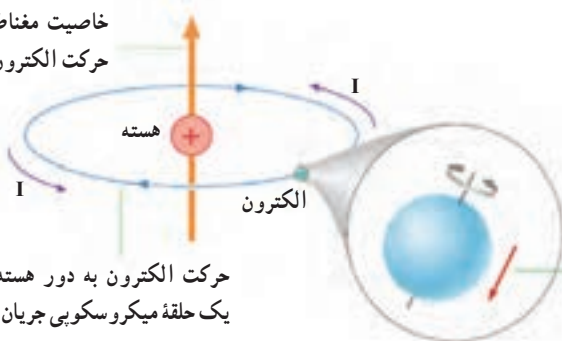
هرگاه از دو سیم نازک، موازی، مستقیم و بسیار دراز که به فاصله یک متر از یکدیگر در خلأ قرار دارند، جریان‌های مساوی به گونه‌ای عبور کند که بر یک متر از طول هریک از سیم‌ها نیرویی برابر 2×10^{-7} نیوتون وارد شود، جریانی که از هریک از سیم‌ها می‌گذرد، برابر یک آمپر است.

۳-۷- خواص مغناطیسی مواد

پیش از این دیدیم که برخی مواد خاصیت آهنربایی دارند، و در برخی مواد دیگر که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند خاصیت آهنربایی القا می‌شود. برای نمونه، هسته آهنی یک آهنربای الکتریکی را به یاد بیاورید (شکل ۳-۲۰). اکنون این پرسش پیش می‌آید که منشأ این رفتار مواد چیست؟ در این بخش به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

وقتی به بررسی ساختمان کوچک‌ترین جزء سازنده ماده، یعنی اتم می‌پردازیم متوجه می‌شویم که منشأ خاصیت مغناطیسی برخی از مواد ناشی از اتم‌های تشکیل دهنده آنهاست. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع به شکل ۳-۲۴ توجه کنید. در این شکل، اتمی با یک الکترون نشان داده شده است که علاوه بر چرخیدن به دور هسته، به دور خودش نیز می‌چرخد. در واقع منشأ خاصیت مغناطیسی اتم ناشی از این دو نوع حرکت است. به این ترتیب می‌توان گفت هر الکترون چرخان درون اتم، یک آهنربای بسیار ریز است. به طوری که اگر اتم، یک زوج الکترون داشته باشد که در یک جهت بچرخند، آهنربای قوی‌تری را به وجود می‌آورند. اما اگر این زوج الکترون در جهت‌های مخالف یکدیگر بچرخند، برخلاف هم عمل و خاصیت مغناطیسی یکدیگر را خنثی می‌کنند. به همین سبب است که برخی مواد خاصیت مغناطیسی دارند و برخی دیگر خواص مغناطیسی ندارند.

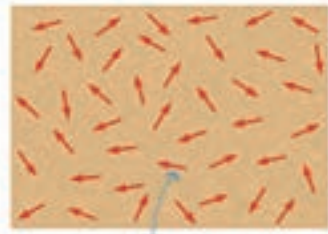
خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون به دور هسته



حرکت الکترون به دور هسته مانند یک حلقه میکروسکوپی جریان است.

خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون به دور خودش

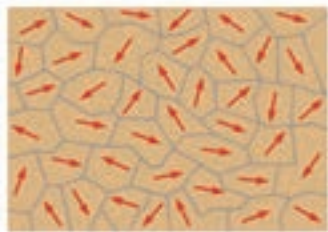
شکل ۳-۲۴ چرخش الکترون به دور هسته و به دور خودش، منشأ خاصیت مغناطیسی اتم است. همان‌طور که دیده می‌شود سهم خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون‌ها به دور هسته، بسیار بیشتر از سهم ناشی از حرکت الکترون‌ها به دور خودشان است.



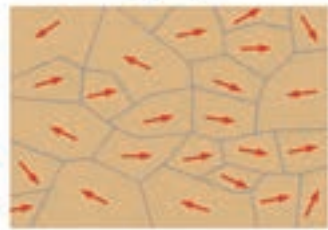
هر ذره سازنده مواد مغناطیسی، یک آهنربای بسیار ریز است که آن را دوقطبی مغناطیسی می نامند.

شکل ۳-۲۵ سمت گیری کاتوره ای دوقطبی های مغناطیسی در یک ماده پارامغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی.

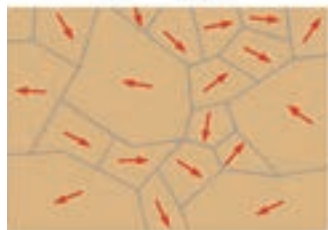
$$\vec{B} = 0$$



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۳-۲۷ (الف) ماده فرو مغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی خارجی ($\vec{B} = 0$). (ب) ماده فرو مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی ضعیف، (پ) ماده فرو مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی قوی.

موادی را که اتم ها یا مولکول های سازنده آنها دارای خاصیت مغناطیسی باشند، **مواد مغناطیسی** می نامند. در واقع می توان گفت کوچک ترین ذره های تشکیل دهنده این مواد (اتم ها یا مولکول ها) هر کدام آهنرباهای بسیار ریزی هستند که به آنها **دوقطبی مغناطیسی** نیز گفته می شود. در این کتاب، دوقطبی های مغناطیسی را با یک پیکان کوچک نشان می دهیم که می تواند جهت گیری های متفاوتی داشته باشد و هر کدام از آنها وابسته به یک اتم یا مولکول اند. در ادامه به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می پردازیم.

مواد پارامغناطیسی: دوقطبی های مغناطیسی در یک ماده پارامغناطیسی سمت گیری مشخص و منظمی ندارند و در جهت های کاتوره ای قرار دارند (شکل ۳-۲۵). در نتیجه این مواد خاصیت مغناطیسی ندارند. اگر آنها را درون یک میدان مغناطیسی (مثلاً نزدیک یک آهنربا) قرار دهیم، دوقطبی های کوچک مانند عقربه های مغناطیسی در نزدیکی آهنربا رفتار می کنند؛ یعنی در راستای خط های میدان مغناطیسی منظم می شوند. هر چه میدان مغناطیسی قوی تر باشد، تعداد بیشتری از این دوقطبی های مغناطیسی کوچک با میدان هم خط می شوند. در نتیجه، خاصیت مغناطیسی ماده بیشتر می شود.

اگر آهنربا را از این مواد دور کنیم، دوقطبی های مغناطیسی دوباره و به سرعت به وضعیت کاتوره ای در غیاب میدان برمی گردند.

به این ترتیب، مواد پارامغناطیسی در میدان های مغناطیسی قوی تا حدودی خاصیت مغناطیسی موقت پیدا می کنند. اورانیم، پلاتین، آلومینیم، سدیم، اکسیژن و اکسید نیتروژن از جمله مواد پارامغناطیسی اند.

مواد فرو مغناطیسی: در برخی از مواد مغناطیسی، دوقطبی های مغناطیسی کوچک خود به خود با دوقطبی های مجاور خود هم خط می شوند. این گونه مواد را **فرو مغناطیسی** می نامند. در عمل، همه بخش های مغناطیسی در یک ماده فرو مغناطیسی در یک راستا قرار ندارند؛ بلکه این گونه مواد از بخش های

بسیار کوچکی به نام **حوزه مغناطیسی** تشکیل شده اند که ابعاد آن در بیشتر مواد فرو مغناطیسی حدود 10^{-4} تا 10^{-6} متر است. هر حوزه از تعداد بسیار زیادی اتم تشکیل شده است به طوری که دوقطبی های مغناطیسی آنها به طور کامل، هم خط اند. ولی سمت گیری دوقطبی های مغناطیسی هر حوزه با حوزه های مجاور آن تفاوت دارد (شکل ۳-۲۶ الف). این گونه مواد را می توان با قرار دادن در یک میدان مغناطیسی آهنربا

کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی بر حوزه های مغناطیسی باعث می شود که دوقطبی های مغناطیسی هر حوزه تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند و جهت آنها به جهت میدان خارجی متمایل شود. علاوه بر این حوزه هایی که نسبت به میدان در وضع مناسبی قرار دارند (با میدان همسو هستند) رشد می کنند؛ یعنی

حجمشان زیاد می شود و در نتیجه، حوزه هایی که سمت گیری آنها نسبت به میدان مناسب نیست، کوچک می شوند؛ یعنی مرز بین حوزه ها جابه جا می شود، و در نتیجه ماده در مجموع خاصیت آهنربایی پیدا می کند.

در شکل ۳-۲۶ ب ماده فرو مغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی \vec{B} قرار داده ایم: مرزهای حوزه ها جابه جا شده اند و در نتیجه، ماده در مجموع خاصیت مغناطیسی پیدا کرده است. در

شکل ۳-۲۶ پ میدان مغناطیسی خارجی آن قدر قوی است که بیشتر حجم ماده را حوزه های با سمت گیری مناسب (همسو با میدان) اشغال کرده اند.

در برخی از مواد فرو مغناطیسی مانند آهن، کبالت و نیکل در صورتی که خالص باشند، حجم حوزه ها به سهولت تغییر می کند و در نتیجه با این روش به آسانی آهنربا می شوند و خاصیت آهنربایی خود را

نیز به راحتی از دست می‌دهند. این مواد را **فرومغناطیسی نرم** می‌نامند. از این گونه مواد در هسته سیمولوله‌ها استفاده می‌شود. مواد فرومغناطیس نرم با حذف میدان مغناطیسی خارجی خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهند و به دلیل همین خاصیت، آنها برای ساختن آهنرباهای الکتریکی (آهنرباهای غیر دائم) مناسب‌اند. برخی مواد دیگر مانند فولاد (آهن به اضافه دو درصد کربن)، آلیاژهای آهن، کبالت و نیکل به سختی آهنربا می‌شوند؛ یعنی حجم حوزه‌ها در آنها به سختی تغییر می‌کند. این مواد را **فرومغناطیسی سخت** می‌نامند. در این گونه مواد برای افزایش حجم حوزه‌هایی که سمت‌گیری مناسب دارند (یعنی با میدان خارجی همسو هستند) به میدان‌های مغناطیسی خارجی قوی‌تری نیازمند است. در این مواد، سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها پس از حذف میدان خارجی به سهولت تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، پس از برداشتن میدان مغناطیسی خارجی، ماده فرومغناطیسی سخت، خاصیت آهنربایی خود را تا اندازه قابل توجهی حفظ می‌کند. به همین دلیل این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب‌اند.

برای خاصیت آهنربایی هر ماده فرومغناطیسی، مقدار اشباع یا بیشینه‌ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی به وجود می‌آید که ماده فرومغناطیسی در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد؛ به طوری که درصد بالایی از دوقطبی‌های مغناطیسی اتمی به موازات یکدیگر هم‌خط شوند. به عبارت دیگر حجم حوزه‌هایی که با میدان مغناطیسی خارجی همسو هستند به بیشترین مقدار خود برسد.

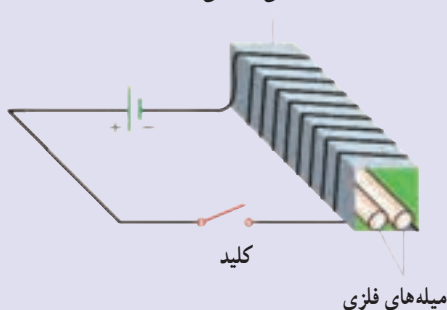
مطالعه آزاد

مواد مغناطیسی آلاینده

ذره‌های ریز مواد غیر آلی به طور عمده از طریق استنشاق به طور پیوسته وارد بدن ما می‌شوند. معدن چیان، جوش کاران و گروه‌های دیگر که به علت حرفه خود در معرض غبارها و دودهای صنعتی قرار دارند، ممکن است بر اثر جمع شدن ذره‌های ریز در مجاری تنفسی و کیسه‌های هوایی به اختلال‌های ریوی دچار شوند. بیشتر غبارهای صنعتی و معدنی حاوی مقادیر قابل ملاحظه‌ای از ترکیب‌های فرومغناطیسی‌اند که این مواد می‌توانند در میدان مغناطیسی خارجی ویژگی آهنربایی به دست آورند یا اصطلاحاً مغناطیده شوند. با اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ناشی از ذره‌های مغناطیده می‌توان مقدار و توزیع آلودگی در شش‌ها را تعیین کرد. این روش که مغناطونوموگرافی (MPG) نامیده می‌شود، در سطح جمعیت‌های بزرگ، برای نظارت و کنترل سطح آلودگی دراز مدت ریوی به کار گرفته می‌شود. اخیراً با دقیق‌تر کردن این روش، فیزیولوژیست‌ها توانسته‌اند به بررسی سازوکار پاک‌سازی شش‌ها در سطح سلولی بپردازند.

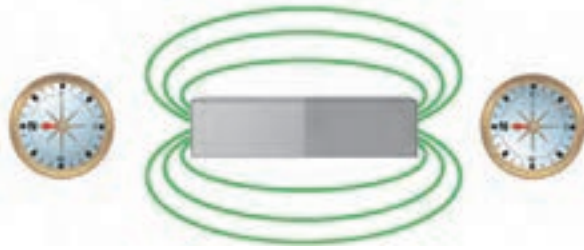
پرسش ۳-۸

قوای متوازی



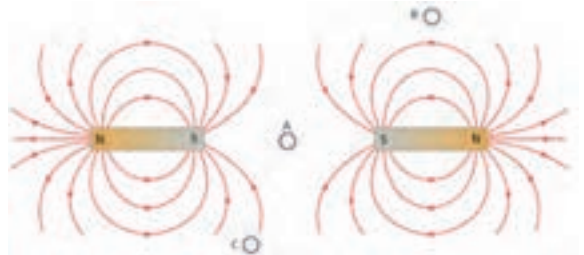
دو میله فلزی بلند مطابق شکل زیر درون پیچۀ درازی قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از این پیچ، مشاهده می‌شود دو میله از یکدیگر دور می‌شوند و هنگامی که کلید باز و جریان قطع می‌شود، میله‌ها به محل اولیه بازمی‌گردند. الف) چرا با عبور جریان از پیچ، میله‌ها از یکدیگر دور می‌شوند؟ ب) با دلیل توضیح دهید میله‌های فلزی از نظر مغناطیسی چه نوعی هستند.

پرسش‌ها



۱ الف) با توجه به جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی در شکل روبه‌رو، قطب‌های آهنربای میله‌ای و جهت خط‌های میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

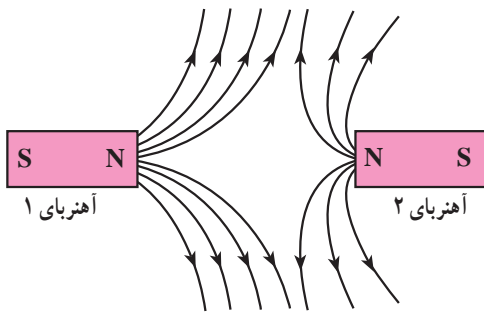
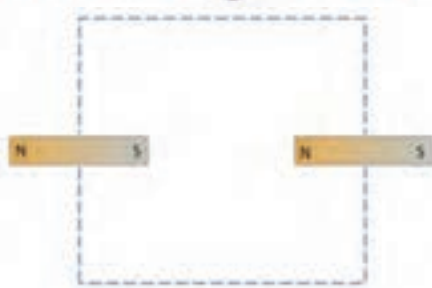
ب) آیا خط‌های میدان در داخل آهنربای میله‌ای نیز وجود دارند؟ در صورتی که پاسخ مثبت است، آنها را رسم کنید.



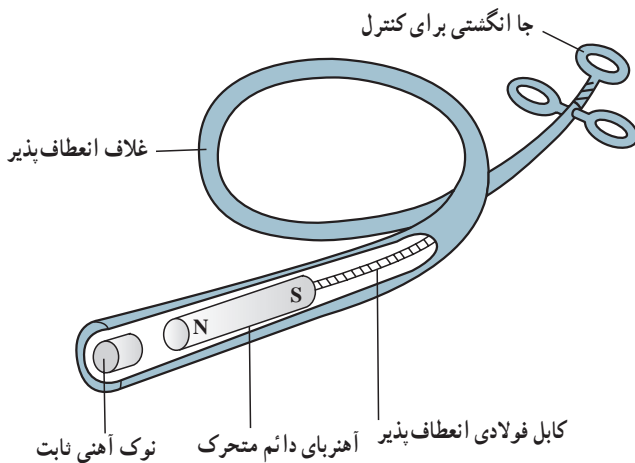
۲ شکل روبه‌رو، خط‌های میدان مغناطیسی را در نزدیکی دو آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد.

الف) دربارهٔ میدان مغناطیسی در قسمت A چه می‌توان گفت؟
ب) با رسم شکل نشان دهید عقربهٔ قطب‌نما در قسمت‌های B و C به ترتیب در کدام جهت قرار می‌گیرد؟

پ) اگر مانند شکل روبه‌رو یکی از آهنرباها را بچرخانیم تا جای قطب‌های آن عوض شود، خط‌های میدان مغناطیسی را در ناحیهٔ نقطه‌چین رسم کنید.



۳ الف) آهنربایی 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 روبه‌رو نشان داده شده است؛ میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب‌های کدام آهنربا ضعیف‌تر است؟



۴ یک قطعهٔ کوچک فلز در گلولی کودکی که آن را بلعیده است گیر کرده است. پزشک می‌خواهد آن را با دستگاه شکل روبه‌رو بیرون بیاورد.

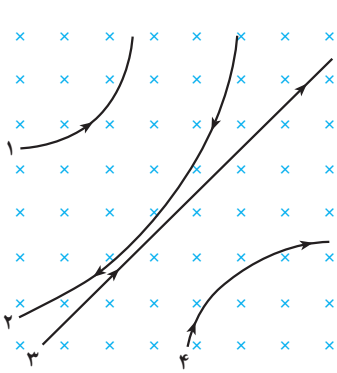
الف) هنگامی که آهنربای دائمی به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟

ب) ساختن نوک ثابت آهنی چه مزیتی دارد؟

پ) این وسیله را باید به درون گلولی کودکی وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد؛ چرا غلاف باید انعطاف‌پذیر باشد؟

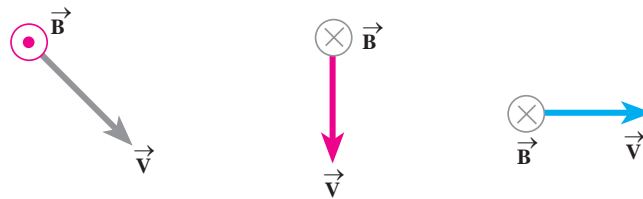
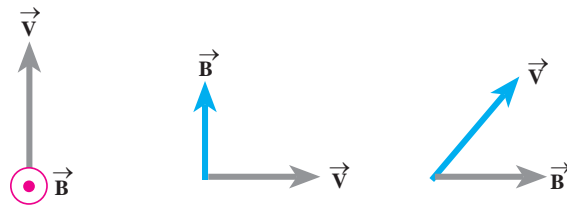
ت) پزشک می‌خواهد یک گیرهٔ آهنی کاغذ و یک واشر

آلومینیومی را از گلولی کودکی بیرون بیاورد؛ کدام یک را می‌تواند بیرون آورد؟ چرا؟

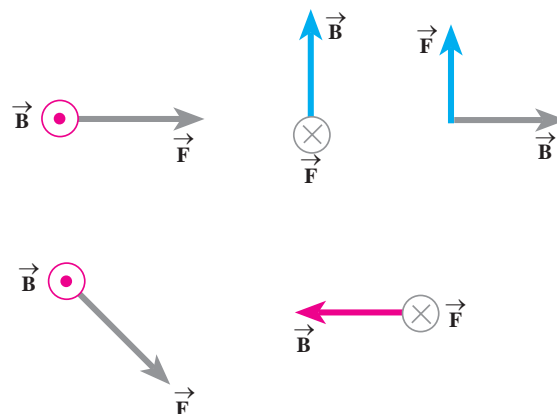


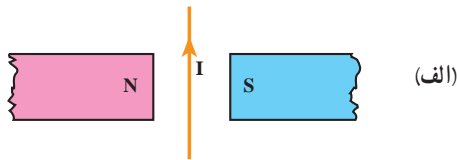
۵ چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون سو مسیرهایی مطابق شکل روبه‌رو می‌پیمایند. درباره نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟

۶ جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هر یک از حالت‌های نشان داده شده در شکل زیر تعیین کنید.

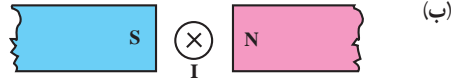


۷ نیروی مغناطیسی \vec{F} وارد بر الکترونی که در میدان مغناطیسی \vec{B} در حرکت است، در شکل زیر نشان داده شده است. فرض کنید راستای حرکت الکترون بر میدان مغناطیسی عمود است؛ در هر یک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید.

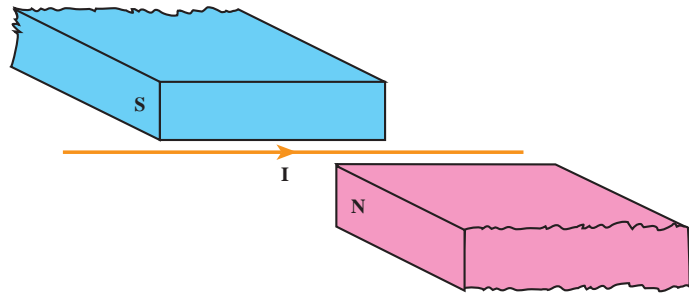




(الف)



(ب)



(پ)

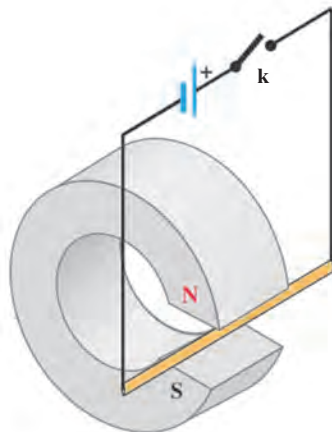
۸ جهت نیروی الکترومغناطیسی بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های الف، ب و پ با استفاده از قاعده دست راست بیابید.



۹ کدام باتری را در مدار شکل روبه‌رو قرار دهیم تا عقربه قطب‌نما که روی سیم قرار دارد، در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت بچرخد؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.

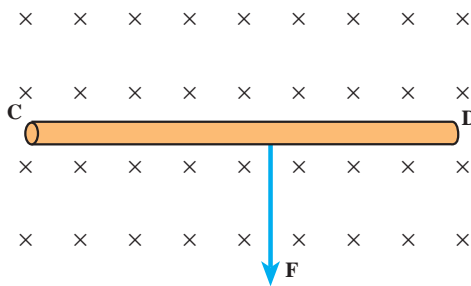


۱۰ کدام باتری را در مدار شکل روبه‌رو قرار دهیم تا آهنربای میله‌ای آویزان شده به طرف سیملوله جذب شود؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.

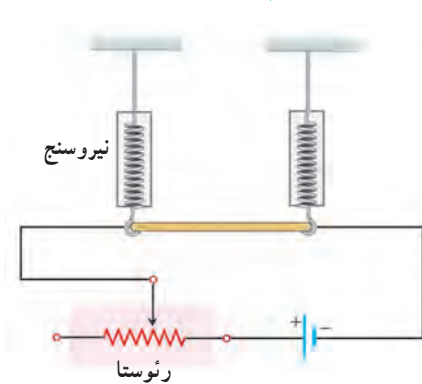


۱۱ یک میله رسانا به پایانه‌های یک باتری وصل شده و مطابق شکل در فضای بین قطب‌های یک آهنربای نعلی شکل آویزان شده است؛ با بستن کلید K، چه اتفاقی برای میله رسانا رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.

مسئله‌ها



۱ سیم رسانای CD به طول ۲m مطابق شکل روبه‌رو عمود بر میدان مغناطیسی با اندازه $5T$ قرار گرفته است؛ اگر نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم برابر ۱N باشد، جهت و اندازه جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.



۲ یک سیم حامل جریان $1/6$ آمپر مطابق شکل روبه‌رو با دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به‌طور افقی و در راستای غرب به شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را افقی و یکنواخت و درست به‌طرف شمال با بزرگی $5mT$ بگیرد.

الف) نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را تعیین کنید.
ب) اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور کند؟ جرم یک متر از طول این سیم ۸ گرم است ($g = 10 N/kg$).

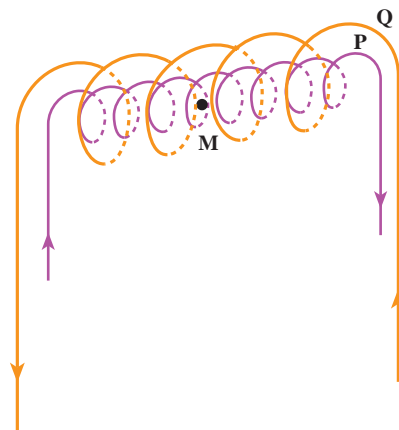
۳ پروتونی با سرعت $10^6 m/s$ در زاویه $4/4$ در زاویه 53° با میدان مغناطیسی $18mT$ در حرکت است. الف) بزرگی نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

ب) اگر تنها این نیرو بر پروتون وارد شود، شتاب پروتون را حساب کنید. (بار الکتریکی پروتون $10^{-19} C$ و جرم آن $10^{-27} kg$ است.)

۴ از پیچه مسطحی به شعاع ۵cm که از ۲۰۰ دور سیم نازک درست شده است، جریان $1/2 A$ می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه حساب کنید.

۵ سیم‌لوله‌ای شامل ۲۵۰ دور حلقه است که دور یک لوله پلاستیکی توخالی به طول ۱۴m متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیم‌لوله $8A$ باشد، بزرگی میدان مغناطیسی درون سیم‌لوله را حساب کنید.

۶ در (شکل روبه‌رو) دو سیم‌لوله P و Q هم‌محور، طول برابر و تعداد دور متفاوت دارند. تعداد دور سیم‌لوله P برابر ۲۰۰ و تعداد دور سیم‌لوله Q برابر ۳۰۰ است. اگر جریان ۱A از سیم‌لوله Q عبور کند، از سیم‌لوله P چه جریانی باید عبور کند تا برآیند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیم‌لوله در نقطه M (روی محور دو سیم‌لوله) صفر شود؟



۷ الکترونی با سرعت $10^5 m/s$ در یک میدان مغناطیسی در حرکت است. نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند.

الف) اگر این نیروی بیشینه بالاسو و برابر $10^{-14} N$ باشد، بزرگی و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

ب) چه میدان الکتریکی‌ای همین نیرو را ایجاد می‌کند؟ (بار الکتریکی الکترون $10^{-19} C$ است.)

القای الکترومغناطیسی



القای الکترومغناطیسی، اساس تولید انرژی الکتریکی در همهٔ نیروگاه‌های برق است که جریان متناوب را تولید، منتقل و توزیع می‌کند. پالش مهم مهندسان برق، طراحی و سافت سامانه‌هایی است که به کمک آنها توان الکتریکی را به‌طور مؤثر و با اتلاف کم منتقل کنند.

یک تکه سیم مسی را به صورت سیملوله یا پیچه دور یک مداد بپیچید. اگر این پیچه را در مداری قرار دهید خواهید دید که رفتاری کاملاً متفاوت از یک تکه سیم راست خواهد داشت. در یک موتور بنزینی اتومبیل، پیچه‌ای شبیه این باعث می‌شود باتری ۱۲ ولتی اتومبیل، هزاران ولت اختلاف پتانسیل برای تولید جرقه در سر شمع‌ها تأمین کند و موتور اتومبیل را به راه اندازد. پیچه‌های دیگری شبیه این برای روشن کردن لامپ‌های کم مصرف یا مهتابی به کار می‌روند. پیچه‌های بزرگی که زیر سطح خیابان‌های شهری برای کنترل رفت و آمد و به کار انداختن چراغ‌های راهنمایی قرار داده می‌شوند نیز نمونه دیگری از کاربرد القای الکترومغناطیسی است که در این فصل با آن آشنا خواهیم شد.

۴-۱- پدیده القای الکترومغناطیسی

در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که با استفاده از روش القای الکتریکی می‌توان اجسام رسانا را باردار کرد. در فصل گذشته نیز با پدیده القای مغناطیسی آشنا شدیم. در مورد اول بر اثر القا، بار الکتریکی در ماده رسانا پدیدار می‌شود. در مورد دوم، بر اثر القا در ماده فرومغناطیسی خاصیت مغناطیسی به وجود می‌آید. پدیده القایی دیگری نیز وجود دارد که در آن، جریان الکتریکی در یک رسانا القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده آشنا می‌شوید.

آزمایش ۱-۴

بررسی پدیده القای الکترومغناطیسی

وسایله‌های آزمایش: میلی آمپرسنج صفر وسط (گالوانومتر)، آهنربای میله‌ای، سیملوله یا پیچه و سیم رابط
شرح آزمایش:

- ۱- با سیملوله و گالوانومتر مداری مانند شکل زیر را ببندید.
- ۲- قطب N آهنربای میله‌ای را مطابق شکل به سیملوله نزدیک کنید. مشاهدات خود را هنگام انجام دادن این عمل، یادداشت کنید.
- ۳- قطب N آهنربای میله‌ای را نزدیک سیملوله نگه دارید. سپس آن را از سیملوله دور کنید؛ مشاهده خود را بنویسید.
- ۴- بندهای ۲ و ۳ را با قطب S آهنربا نیز انجام دهید.
- ۵- آزمایش بالا را در حالی انجام دهید که آهنربا ثابت باشد و سیملوله نسبت به آن دور و نزدیک شود؛ آیا در نتیجه آزمایش تغییری رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.





شکل ۱-۴ با حرکت آهنربا به طرف سیمولوله یا پیچه گالوانومتر جریان القایی را نشان می‌دهد.

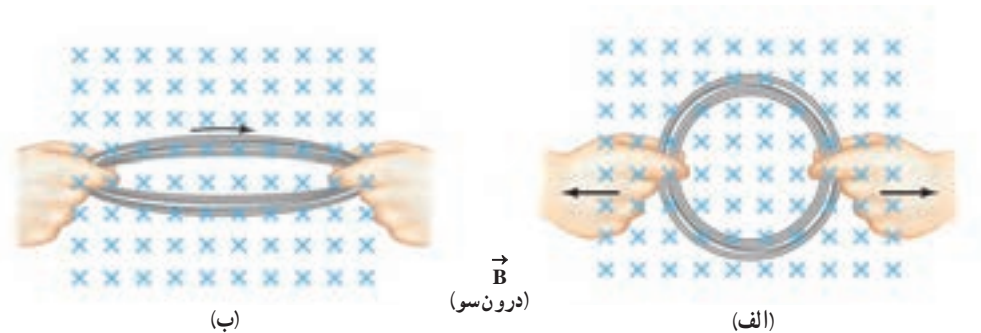
در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام دادن آزمایش‌هایی مانند آزمایش ۴-۱ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه میلی آمپرسنج منحرف می‌شود، و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ مانند وقتی که مولد در مدار وجود داشته باشد. یعنی با حرکت آهنربا نسبت به پیچه، یک جریان الکتریکی در مدار القا می‌شود. این پدیده را **القای الکترومغناطیسی** و جریان تولید شده را **جریان الکتریکی القایی** می‌نامند. القای الکترومغناطیسی اساس کار مولد جریان متناوب، دینام، مبدل‌ها و بسیاری از وسیله‌های الکتریکی است.

دور یا نزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می‌شود (شکل ۴-۱)؛ و همین امر جریان الکتریکی را در پیچه القا می‌کند. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که **تغییر اندازه میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می‌شود.**

آزمایش نشان می‌دهد که علاوه بر روش گفته شده، به روش‌های دیگر نیز می‌توان در یک پیچه جریان الکتریکی القا کرد.

اگر پیچه‌ای از یک سیم انعطاف‌پذیر را مطابق شکل ۴-۲ در میدان مغناطیسی یکنواخت B قرار دهیم، سپس شکل پیچه را تغییر دهیم تا مساحت حلقه آن تغییر کند، خواهیم دید که در هنگام این کار نیز جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که:

تغییر مساحت مدار بسته در میدان مغناطیسی نیز می‌تواند جریان القایی در مدار تولید کند.



شکل ۲-۴ با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

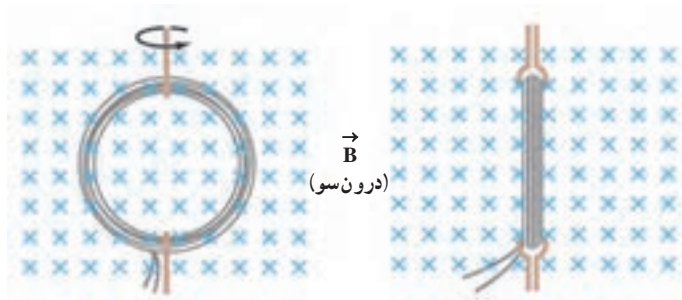
با انجام دادن فعالیت زیر، با یک روش دیگر تولید جریان القایی آشنا می‌شوید.

فعالیت ۱-۴

یک آهنربای میله‌ای را در نزدیکی پیچه‌ای قرار دهید. بدون تغییر فاصله آهنربا از پیچه، آن را بچرخانید. هر تغییری را که در گالوانومتر مشاهده می‌کنید، گزارش دهید.

با چرخاندن پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت مطابق شکل ۳-۴، اندازه میدان مغناطیسی و مساحت حلقه مدار تغییر نمی کند، ولی زاویه بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می کند. از این فعالیت می توان نتیجه گرفت که :

تغییر زاویه بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی نیز سبب برقراری جریان الکتریکی القایی می شود.



شکل ۳-۴ هنگام چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه بین پیچه و میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می شود.

مثال ۱-۴

دریافت خود را از شکل های زیر بنویسید.



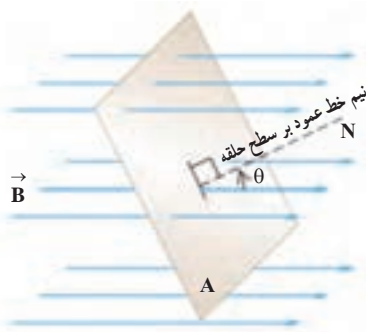
پاسخ : در شکل الف با ورود آهنربا به پیچه، جریانی در آن القا شده است. در شکل ب، آهنربا با همان شرایط قسمت الف، وارد پیچه ای با تعداد دور بیشتر شده است. در نتیجه همان طور که در شکل نیز دیده می شود جریان بزرگ تری در پیچه القا شده است.

پرسش ۱-۴

دریافت خود را از شکل های زیر بنویسید.



۲-۴- شار مغناطیسی



شکل ۱۴-۱۴ نیم خط عمود بر سطح

A با میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} زاویه θ می‌سازد.

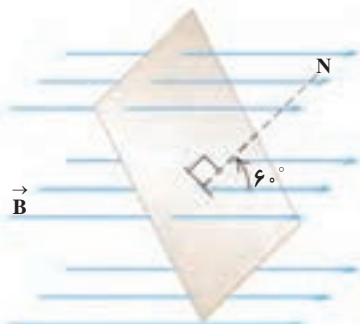
در آزمایش‌های قبل دیدیم که بر اثر تغییر میدان مغناطیسی در حلقه، تغییر مساحت حلقه و یا تغییر زاویه بین سطح حلقه و جهت میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. کمیت موسوم به شار مغناطیسی، این سه کمیت را در بر دارد. این کمیت نرده‌ای به صورت زیر معرفی می‌شود. فرض کنید حلقه‌ای به مساحت A مطابق شکل ۴-۴ در میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارد. شار میدان مغناطیسی یکنواخت^۱ که از سطح حلقه می‌گذرد به صورت زیر تعریف و با نماد Φ نشان داده می‌شود.

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۱-۴)$$

که در آن، θ زاویه بین بردار میدان مغناطیسی \vec{B} و نیم خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم خط را می‌توان به طور اختیاری در هر یک از دو طرف سطح حلقه رسم کرد، ولی پس از انتخاب نباید جهت آن را عوض کرد). یکای شار مغناطیسی در SI ویر (Wb) است. از معادله ۱-۴ چنین برمی‌آید:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$$

مثال ۲-۴



(الف)



(ب)

الف) شار مغناطیسی عبوری از سطح یک قاب مستطیلی شکل به ابعاد $3 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ را به دست آورید که نیم خط عمود بر آن با میدان مغناطیسی یکنواخت 100 G مطابق شکل الف زاویه 6° می‌سازد.

ب) اگر این قاب را بچرخانیم به طوری که زاویه نیم خط عمود بر آن با خط‌های میدان مغناطیسی از 6° به 3° کاهش یابد، شار مغناطیسی چقدر تغییر می‌کند؟

پاسخ: الف) مطابق شکل الف زاویه بین خط‌های میدان و نیم خط عمود بر سطح برابر 6° است. بنابراین داریم:

$$A = 3 \times 2 = 6 \text{ cm}^2 = 6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$B = 100 \text{ G} = 10^{-2} \text{ T}$$

$$\Phi = BA \cos \theta = (10^{-2} \text{ T}) \times (6 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \cos 6^\circ = 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

ب) در وضعیت شکل ب، $\theta = 3^\circ$ است. به این ترتیب داریم:

$$\Phi' = BA \cos \theta' = (10^{-2} \text{ T}) \times (6 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \cos 3^\circ$$

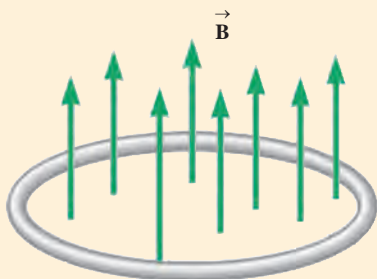
$$\Phi' = 5/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

به این ترتیب تغییر شار حاصل از این چرخش برابر است با:

$$\Delta \Phi = \Phi' - \Phi = 5/2 \times 10^{-4} \text{ Wb} - 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Delta \Phi = 2/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

۱- اگر میدان مغناطیسی یکنواخت نباشد، رابطه مربوط به شار مغناطیسی پیچیده‌تر می‌شود که فراتر از سطح این کتاب است.



حلقه‌ای به مساحت 5 cm^2 مطابق شکل روبه‌رو در یک میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارد، به طوری که خط‌های میدان مغناطیسی \vec{B} بر سطح حلقه عمودند. اگر اندازه میدان مغناطیسی بدون تغییر جهت به 3 T افزایش یابد، شار مغناطیسی عبوری از سطح حلقه چقدر تغییر می‌کند؟

تا اینجا دیدیم که تغییر هر یک از کمیت‌های A ، B و زاویه بین \vec{B} و نیم‌خط عمود بر سطح پیچیده باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، و تغییر شار مغناطیسی جریان الکتریکی القایی در مدار به وجود می‌آورد. این وضعیت درست شبیه به حالتی است که یک مولد در مدار باشد، و نیروی محرکه آن جریانی در مدار ایجاد کرده باشد. علاوه بر این، آزمایش نشان می‌دهد که هرچه تغییر شار سریع‌تر باشد، جریان القایی بزرگ‌تر خواهد شد؛ مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۲-۴ تا ۴-۴ هرچه حرکتی که باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربه گالوانومتر بیشتر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان القایی بزرگ‌تری به وجود آمده است.

قانون القای الکترومغناطیسی فارادی، که موضوع بخش بعدی است، نشان می‌دهد که هنگام تغییر شار مغناطیسی، یک نیروی محرکه الکتریکی که آن را **نیروی محرکه القایی** می‌نامیم در پیچ ایجاد می‌شود.

۴-۳- قانون القای الکترومغناطیسی فارادی

عامل مشترک در تمام اثرهای القای الکترومغناطیسی که در بخش قبل دیدیم، تغییر شار مغناطیسی عبوری از یک مدار بسته است. بنابر قانون فارادی هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است؛ یعنی هرچه آهنگ تغییر شار مغناطیسی بیشتر باشد، نیروی محرکه القایی و در نتیجه جریان القایی تولید شده در مدار بیشتر خواهد بود. قانون فارادی را برای یک مدار بسته تک حلقه می‌توان با رابطه زیر بیان کرد.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2-4)$$

در این رابطه \mathcal{E} نیروی محرکه القایی بر حسب ولت و $\frac{d\Phi}{dt}$ آهنگ تغییر شار مغناطیسی (یعنی مشتق شار نسبت به زمان) بر حسب ویر بر ثانیه ($\frac{\text{Wb}}{\text{s}}$) است.



مایکل فارادی (۱۸۶۷-۱۷۹۱)

پسر یک آهنگر انگلیسی بود. به گفته خود او: «تحصیلات من بسیار معمولی بود. خواندن را کمی بیشتر از حد مقدماتی و نوشتن و ریاضیات را در حد شاگرد یک مدرسه روزانه می‌دانستم. ساعت‌های خارج از مدرسه من در خانه و خیابان‌ها می‌گذشت.» او در سن ۱۲ سالگی به عنوان شاگرد در یک کتابفروشی مشغول به کار شد. پس از آن با یک صحافی همکاری داشت.

فارادی ۱۹ ساله بود که به او اجازه داده شد تا در جلسه سخنرانی بیرهمفوری دیوی که در مؤسسه سلطنتی لندن برگزار می‌شد، حضور یابد. مؤسسه سلطنتی یک مرکز مهم پژوهش و آموزش علوم بود. فارادی به شدت علاقه‌مند علوم شد و پیش خود به تحصیل علم شیمی پرداخت. در سال ۱۸۱۳ تقاضای شغلی در مؤسسه سلطنتی کرد و دیوی او را به عنوان یک همکار در امور پژوهشی استخدام کرد. فارادی به زودی نوع خود را به عنوان یک آزمایشگر نشان داد. او مقاله‌های مهمی در شیمی، خواص مغناطیسی، الکتریسیته و نور نوشت و سرانجام به عنوان رئیس مؤسسه سلطنتی برگزیده شد. فارادی را به سبب کشف‌های بسیارش یکی از بزرگ‌ترین دانشمندان تجربی عصر خود می‌دانند.

اگر مدار از پیچهای با N دور مشابه تشکیل شده باشد، قانون القای فارادی به صورت زیر

نوشته می شود :

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-4)$$

اگر مقاومت پیچه برابر R باشد، جریان القا شده در آن از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (4-4)$$

همچنین اگر شار مغناطیسی که از پیچه می گذرد در بازه زمانی Δt به اندازه $\Delta\Phi$ تغییر کرده باشد،

آهنگ متوسط تغییر شار مغناطیسی در بازه زمانی Δt با $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ متناسب خواهد بود. نیروی محرکه القایی

متوسط (که با $\bar{\mathcal{E}}$ نمایش داده می شود) در این پیچه از رابطه زیر به دست می آید :

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5-4)$$

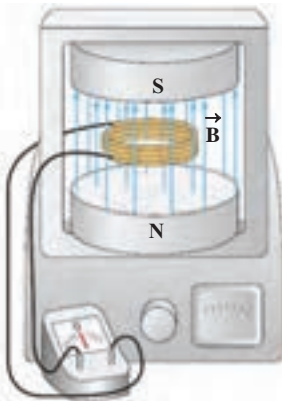
همان طور که از رابطه (4-4) دیده می شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار

مغناطیسی تغییر می کند، بیشتر باشد، جریان القایی کوچک تر می شود. لازم به توجه است که

برای پیدا کردن جریان القایی متوسط در پیچه به جای رابطه 4-4، باید از رابطه $\bar{I} = -\frac{N}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

استفاده کنیم.

مثال ۳-۴



پیچه ای شامل 200 دور که مساحت هر حلقه آن 24 cm^2 است مطابق شکل روبه رو بین قطب های یک آهنربای الکتریکی قرار گرفته است که میدان مغناطیسی یکنواخت تولید می کند. خط های میدان بر سطح پیچه عمودند. اگر بزرگی میدان \vec{B} در بازه زمانی $3/2 \text{ ms}$ از 0.18 T به 0.22 T افزایش یابد،

الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط ایجاد شده در پیچه چقدر است؟

ب) اگر مقاومت پیچه 1Ω باشد، اندازه جریان القایی متوسط که از پیچه می گذرد

چقدر است؟

پاسخ: الف) با توجه به داده های مسئله داریم :

$$N=200 \text{ دور}, A=24 \text{ cm}^2=24 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \theta=0$$

$$B_1=0.18 \text{ T}, B_2=0.22 \text{ T}, \Delta t=3/2 \text{ ms}=3/2 \times 10^{-3} \text{ s}, \bar{\mathcal{E}}=?$$

ابتدا شار مغناطیسی را در دو حالت اولیه و نهایی پیدا می کنیم.

$$\Phi_1 = B_1 A \cos\theta = (0.18 \text{ T})(24 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \cos 0^\circ \simeq 4/3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_2 = B_r A \cos\theta = (0.22 \text{ T})(24 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \cos 0^\circ \approx 5.3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

تغییر شار مغناطیسی برابر است با :

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (5.3 \times 10^{-4} \text{ Wb}) - (4.3 \times 10^{-4} \text{ Wb}) = 1.0 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

با قرار دادن این مقدار و داده‌های بالا در رابطه ۴-۵ داریم :

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(200) \frac{(1.0 \times 10^{-4} \text{ Wb})}{(3/2 \times 10^{-3} \text{ s})} = -6/2 \text{ V}$$

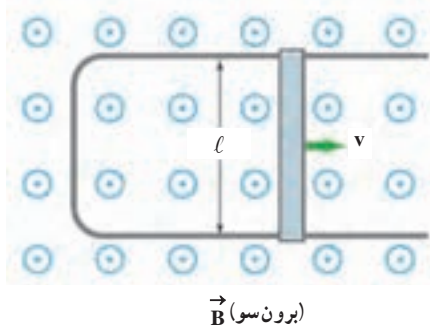
و اندازه آن برابر است با :

$$|\bar{\mathcal{E}}| = |-6/2| \text{ V} = 6/2 \text{ V}$$

ب) اندازه جریان متوسط که در پیچ برقرار می‌شود برابر است با :

$$\bar{I} = |\bar{\mathcal{E}}|/R = (6/2 \text{ V})/(10 \Omega) = 0.62 \text{ A}$$

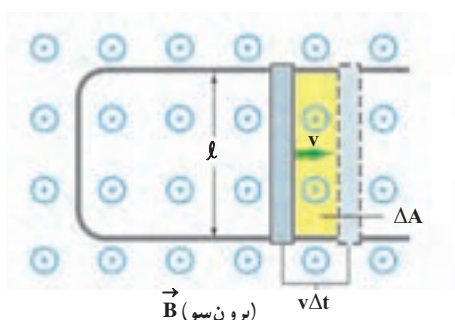
مثال ۱۴-۴



شکل روبه‌رو رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} به بزرگی 0.18 T نشان می‌دهد که عمود بر صفحه شکل و رو به بیرون است. میله‌ای فلزی (سیم لغزنده) به طول $l = 20 \text{ cm}$ بین دو بازوی رسانا قرار دارد و مداری را تشکیل می‌دهد. میله را با سرعت ثابت $v = 20 \text{ m/s}$ به طرف راست حرکت می‌دهیم. بزرگی نیروی محرکه القایی متوسط را پیدا کنید.

پاسخ : با حرکت میله فلزی و به دلیل افزایش سطح حلقه، شار مغناطیسی تغییر می‌کند. چون میدان مغناطیسی در سطح حلقه یکنواخت است، پس می‌توانیم شار مغناطیسی را از رابطه $\Phi = BA \cos\theta$ محاسبه کنیم. از طرفی زاویه نیم خط عمود بر سطح حلقه با جهت میدان \vec{B} صفر است ($\theta = 0^\circ$). در نتیجه $\Phi = BA$. از قانون القای فارادی داریم :

$$\bar{\mathcal{E}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = -B \frac{\Delta A}{\Delta t}$$



برای محاسبه $\Delta A/\Delta t$ ، توجه کنید که میله فلزی لغزنده در مدت Δt مسافت $v\Delta t$ را طی می‌کند (شکل روبه‌رو) و سطح حلقه به مقدار $\Delta A = l v \Delta t$ افزایش می‌یابد. به این ترتیب نیروی محرکه القا شده برابر است با :

$$\bar{\mathcal{E}} = -B \frac{l v \Delta t}{\Delta t} = -B l v$$

با قرار دادن مقادیر داده شده، در رابطه بالا، داریم :

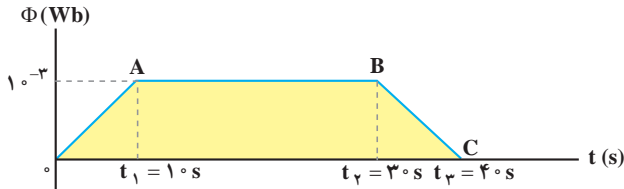
$$\bar{\mathcal{E}} = -(0.18 \text{ T})(20 \times 10^{-2} \text{ m})(20 \text{ m/s}) = -0.72 \text{ V}$$

و اندازه آن برابر است با :

$$|\bar{\mathcal{E}}| = 0.72 \text{ V} = 720 \text{ mV}$$

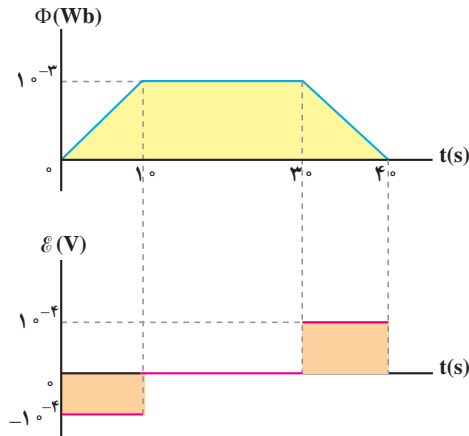
توجه کنید که به علت ثابت بودن سرعت میله لغزنده، نیروی محرکه القایی ثابت است. از این رو، رسانای U شکل با سیم لغزنده یک مولد جریان مستقیم است. سرانجام چون میله از رسانای U شکل خارج و تماس آن قطع و جریان متوقف می شود، این وسیله کاربرد چندانی ندارد.

مثال ۴-۵



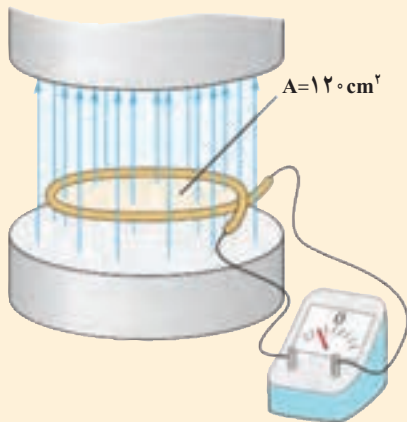
تغییرات شار مغناطیسی برحسب زمان که از یک حلقه می گذرد در نمودار شکل روبه رو داده شده است. نمودار نیروی محرکه القا شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.

پاسخ: نمودار شار مغناطیسی برحسب زمان نشان



می دهد که در بازه زمانی 0 تا t_1 شار به صورت خطی افزایش می یابد. در نتیجه، در این بازه نیروی محرکه القایی که برابر است با $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ، مقداری ثابت (برابر شیب خط OA) و منفی خواهد داشت و برابر است با 10^{-4} ولت. در بازه زمانی t_1 تا t_2 شار ثابت مانده است. بنابراین، $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0$ و نیروی محرکه القایی در این بازه برابر صفر است. در بازه زمانی t_2 تا t_3 ، شار به صورت خطی کاهش یافته است، $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$ ؛ در نتیجه، نیروی محرکه القایی در این بازه مثبت و برابر است با 10^{-4} ولت. نمودار نیروی محرکه القایی برحسب زمان در شکل روبه رو رسم شده است.

تمرین ۲-۴

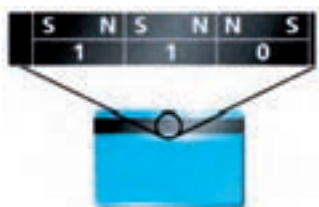


میدان مغناطیسی بین قطب های آهنربای الکتریکی شکل روبه رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می کند و در مدت $\Delta t = 0.5$ S از 0.28 T به -0.12 T می رسد (تغییر علامت نشان می دهد که جهت میدان \vec{B} وارون شده است). الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را به دست آورید. ب) اگر مقاومت حلقه 2Ω باشد بزرگی جریان القایی متوسط در حلقه را پیدا کنید.

پرسش ۲-۴



سرعت سنج دوچرخه‌های مسابقه‌ای شامل یک آهنربای کوچک و یک پیچه است. آهنربا به یکی از پره‌های چرخ جلو و پیچه به دو شاخ فرمان متصل است (شکل روبه‌رو). دو سر پیچه با سیم‌های رسانا به سرعت سنج (که در واقع یک رایانه کوچک است) وصل شده است. به نظر شما سرعت سنج دوچرخه چگونه کار می‌کند؟ این موضوع را در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس درس ارائه دهید.



(الف) ذره‌های فرومغناطیسی، که در واقع هر کدام آهنربای بسیار کوچکی هستند، داده‌ها را به صورت صفر یا یک در خود ذخیره می‌کنند. در نوار مغناطیسی پشت هر کارت میلیاردی ذره فرومغناطیسی وجود دارد.



(ب) با کشیدن کارت در دستگاه کارت خوان، میدان مغناطیسی ناشی از ذره‌های فرومغناطیسی، جریان اندکی در پیچه تعبیه شده در دستگاه کارت خوان القا می‌کند.

کارت‌های اعتباری و دستگاه‌های کارت خوان

نوار مغناطیسی پشت کارت‌های اعتباری حاوی میلیاردها ذره فرومغناطیسی (آهنربای بسیار کوچک) است که نوعی چسب خاص آنها را به هم متصل می‌کند. داده‌ها را که به صورت دودویی، یا صفر و یک به رمز درآورده‌اند، در این ذره‌های مغناطیسی ذخیره می‌کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری شما درون دستگاه کارت خوان کشیده می‌شود، میدان مغناطیسی ناشی از ذره‌های مغناطیسی، روی پیچه تعبیه شده در دستگاه کارت خوان اثر می‌گذارد و جریان اندکی را در آن القا می‌کند (شکل ب). این جریان بسیار کوچک توسط دستگاه دیگری تقویت و داده‌های ذخیره شده در آن رمزگشایی می‌شود. پس از رمزگشایی داده‌ها، دستور مورد نظر انجام می‌شود.

تکنولوژی و کاربرد

مطالعه آزاد



برانگیزش مغناطیسی فرا جمجمه‌ای (TMS)^۱ روشی برای بررسی عملکرد بخش‌های مختلف مغز است. در این روش پیچه‌ای روی سر شخص بیمار قرار داده می‌شود که جریان الکتریکی متغیری از آن می‌گذرد و در نتیجه میدان مغناطیسی متغیری تولید می‌کند. این میدان نیروی محرکه القایی به وجود می‌آورد و باعث فعالیت الکتریکی مغز در ناحیه‌ای می‌شود که در زیر پیچه قرار دارد. با مشاهده واکنش TMS مغز (مثلاً اینکه کدام عضله‌ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می‌کنند) پزشک می‌تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بیازماید.

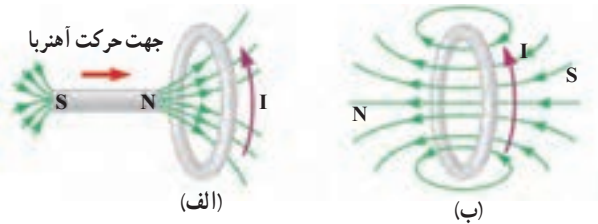
۱- Transcranial Magnetic Simulation (TMS)

۴-۴- قانون لنز

سه سال پس از آنکه فارادی قانون القای الکترومغناطیسی را ارائه کرد، هاینریش لنز دانشمند روس تبار در سال ۱۸۳۴ میلادی قاعده‌ای را موسوم به **قانون لنز**، برای تعیین جهت جریان القایی در یک مدار پیشنهاد کرد. قانون لنز حاکی از آن است که: **جریان حاصل از نیروی محرکه القایی در یک مدار یا پیچ در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن با عامل به وجودآورنده جریان القایی، یعنی تغییر شار مغناطیسی، مخالفت می‌کند.**

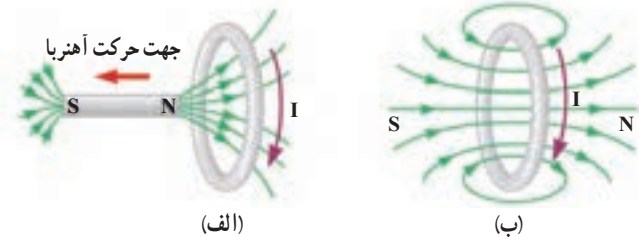
علامت منفی در رابطه ۴-۵ نشان دهنده همین مخالفت است که دلیل آن توسط قانون لنز بیان می‌شود. توضیح دقیق‌تر این مطلب فراتر از سطح این کتاب است و در اینجا تنها به ذکر مثال‌هایی از چگونگی استفاده از قانون لنز برای تعیین جهت جریان القایی اکتفا می‌کنیم.
شکل ۴-۵ الف آهنربایی را در حال نزدیک شدن به یک حلقه رسانا نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود جریان در حلقه در جهتی القا شده است که میدان مغناطیسی حلقه با نزدیک شدن آهنربا به حلقه مخالفت می‌کند (شکل ۴-۵ ب).

شکل ۴-۵ الف با نزدیک شدن آهنربا به حلقه رسانا، در آن جریان القایی ایجاد می‌شود. ب) جریان حاصل از نیروی محرکه القایی در حلقه در جهتی است که با نزدیک شدن آهنربا مخالفت می‌کند. در شکل ب برای سادگی، آهنربا نشان داده نشده است.



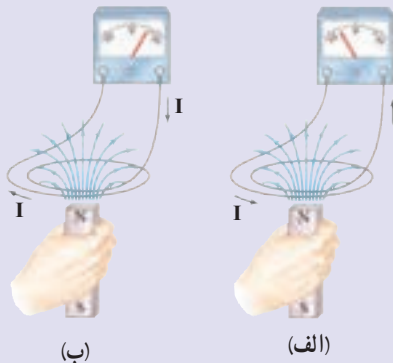
همچنین اگر مطابق شکل ۴-۶ الف، قطب N آهنربا را از حلقه رسانا دور کنیم، باز هم جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، در مقابل قطب N آهنربا قطب S ایجاد و رپایش بین این دو قطب با دور شدن قطب N آهنربا مخالفت کند (شکل ۴-۶ ب).

شکل ۴-۶ الف با دور شدن آهنربا از حلقه، جریانی در آن القا می‌شود. ب) میدان مغناطیسی حاصل از جریان القایی در حلقه، با دور شدن آهنربا از حلقه مخالفت می‌کند. در شکل ب برای سادگی، آهنربا نشان داده نشده است.



پرسش ۳-۴

با توجه به جهت جریان القایی در هر یک از شکل‌های الف و ب، و با توجه به قانون لنز، در هر مورد توضیح دهید که آیا آهنربا رو به بالا حرکت می‌کند یا رو به پایین.



ممالعه آزاد

اثر دیامغناطیسی

در فصل قبل با مواد پارامغناطیسی و فرومغناطیسی آشنا شدیم. همان طور که دیدیم در این مواد هر اتم دارای یک دو قطبی مغناطیسی دائمی است.

از دیدگاه فیزیک کلاسیک، گردش هر الکترون به دور هسته اتم را می توان به صورت یک حلقه بسیار کوچک جریان در نظر گرفت. هرگاه ماده ای در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، بنا بر قانون لنز در این حلقه های کوچک جریان، یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی القا می شود. به این ویژگی که در اتم های همه مواد در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی رخ می دهد، پدیده یا اثر دیامغناطیسی گفته می شود.

اثر دیامغناطیسی در موادی که اتم های آن دارای دو قطبی های مغناطیسی دائم نباشند، بهتر نمایان می شود. این اثر در مواد فرو مغناطیسی و پارامغناطیسی نمود کمتری دارد؛ زیرا اثر دو قطبی های مغناطیسی دائم این گونه مواد بسیار بیشتر از اثر دو قطبی های القایی است که بر اثر میدان مغناطیسی خارجی در اتم های ماده القا می شود.

در موادی نظیر بیسموت، جیوه، نقره، سرب، مس، نمک طعام و شیشه اثر دیامغناطیسی به خوبی نمایان می شود. به همین جهت به این گونه مواد، مواد دیامغناطیسی نیز گفته می شود.

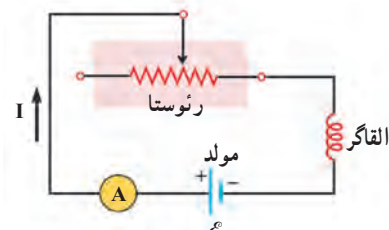
۴-۵- القاگرها و اثر خودالقایی

در فصل ۲ دیدیم که در فضای بین صفحه های یک خازن میدان الکتریکی ایجاد می شود و انرژی الکتریکی توسط همین میدان در خازن ذخیره می شود. به همین ترتیب، می توان از القاگر که در ادامه معرفی خواهد شد، برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیره انرژی مغناطیسی توسط میدان مغناطیسی استفاده کرد. افزون بر این، القاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای الکترونیکی است. در مدار جریان مستقیم، القاگر به پایا نگه داشتن جریان در برابر افت و خیزهای emf اعمال شده کمک می کند؛ در مدار جریان متناوب (که در پایان همین فصل با آن آشنا خواهید شد)، القاگر از تغییرات جریان که سریع تر از مقدار تعیین شده باشد جلوگیری می کند. شکل ۴-۷ تصویر چند القاگر را در اندازه ها و شکل های متفاوت نشان می دهد. نماد مداری معمول برای القاگر به صورت $\text{---}\text{---}\text{---}$ است.



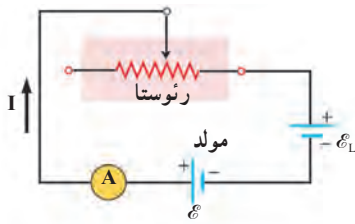
شکل ۴-۷ تصویری از چند القاگر در اندازه ها و شکل های متفاوت

برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر، مداری را مطابق شکل ۴-۸ در نظر بگیرید. این مدار شامل یک مولد (باتری)، یک رئوستا و القاگری است که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده اند. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان در مدار تغییر می کند (چرا؟). تغییر جریان در مدار، سبب تغییر جریان عبوری از القاگر می شود و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از القاگر تغییر می کند. این فرایند سبب القای نیروی محرکه خودالقایی در القاگر می شود که بنا به قانون لنز با هرگونه تغییر جریان عبوری از آن مخالفت می کند. این پدیده که می تواند در هر القاگری (از قبیل پیچه یا سیملوله) رخ دهد اثر خودالقایی نامیده می شود.



شکل ۴-۸ مداری ساده برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر

القای الکترومغناطیسی



شکل ۴-۹ اثر خودالقایی سبب می‌شود که القاگر مانند مولدی با نیروی محرکه \mathcal{E}_L در مدار عمل کند.

در مدار شکل ۴-۸، بنابه قانون لنز جهت نیروی محرکه خودالقایی چنان است که می‌خواهد مانع تغییر شار مغناطیسی‌ای شود که مولد ایجاد می‌کند. برای مثال، اگر مقاومت رئوستا کاهش یابد، جریان و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از القاگر می‌خواهد افزایش یابد. در نتیجه نیروی محرکه خودالقایی در جهتی ایجاد می‌شود که با افزایش شار مخالفت می‌کند. به عبارت دیگر در این حالت نیروی محرکه خودالقایی معادل نیروی محرکه باتری‌ای عمل می‌کند که در جهت مخالف مولد در مدار قرار گرفته باشد (شکل ۴-۹).

پرسش ۴-۱۴

فرض کنید در مدار شکل ۴-۹، به جای کاهش مقاومت رئوستا، مقاومت آن را افزایش دهیم. دلیل ایجاد نیروی محرکه خودالقایی و جهت آن را مورد بحث قرار دهید.

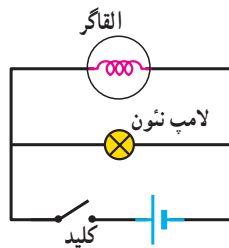
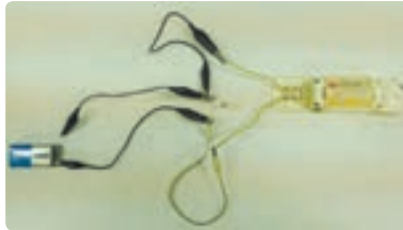
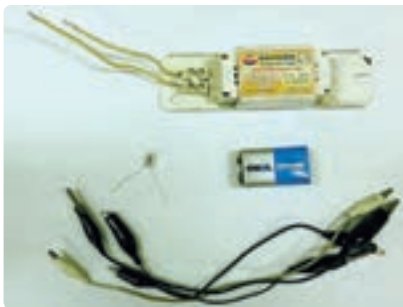
آزمایش ۴-۲

بررسی اثر خود القایی در یک پیچ

وسایله‌های آزمایش: لامپ نئون (لامپ فازمتری)، القاگر (۱۰۰۰ دور یا بالاتر)، باتری ۹ ولتی، سیم رابط

شرح آزمایش:

۱- مداری مطابق شکل روبه‌رو ببندید. (لامپ، باتری و القاگر با یکدیگر موازی اند.)



۲- سر آزاد سیم رابط را به‌طور بی‌دری به قطب دیگر باتری تماس داده و جدا کنید. دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

توجه: مطابق شکل، به جای القاگر می‌توانید از القاگر لامپ‌های مهتابی (که به اشتباه ترانس نامیده می‌شوند) استفاده کنید.

مطالعه آزاد



القاگر، انتقال انرژی الکتریکی و آذرخش

برخورد آذرخش به بخشی از یک سامانه انتقال توان الکتریکی (برق) موجب افزایش ناگهانی ولتاژ می‌شود و می‌تواند به اجزای سامانه و هر چیز دیگری که به آن وصل باشد (برای مثال، وسایله‌های برقی خانگی) آسیب برساند. برای کمینه کردن این آثار، القاگرهای بزرگی را در مسیر سامانه انتقال قرار می‌دهند. این کار باعث می‌شود که یک القاگر با هر تغییر سریع در جریان مخالفت کند و آن را فرو نشاند!

ضریب خودالقایی : آزمایش نشان می‌دهد که نیروی محرکه خودالقایی القاگر، به عواملی که در رابطه زیر آمده است بستگی دارد.

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (۶-۴)$$

در این رابطه L ضریب خودالقایی یا القایدگی القاگر است و یکای آن به افتخار جوزف هانری، کاشف قانون القای الکترومغناطیسی و هم‌عصر با فارادی، هانری نامیده و با نماد H نشان داده می‌شود. ضریب خودالقایی L از ویژگی‌های ساختمانی القاگر است و به تعداد دور، طول، سطح مقطع و... القاگر بستگی دارد (مثال ۴-۸ را ببینید). رابطه ۶-۴ همچنین روشی به نسبت ساده برای اندازه‌گیری ضریب خودالقایی نامعلوم یک مدار را در اختیار ما می‌گذارد. به این منظور کافی است جریان را در مداری با آهنگ معلوم dI/dt تغییر دهیم و \mathcal{E}_L را اندازه بگیریم. نسبت این دو مقدار فیزیکی برابر L است.

مثال ۴-۶

جریان در یک القاگر با آهنگ 1 A/s تغییر می‌کند. اگر ضریب خودالقایی القاگر 1 H باشد، بزرگی نیروی محرکه خودالقایی در القاگر چقدر است؟
پاسخ: از داده‌های مسئله داریم:

$$\frac{dI}{dt} = 1 \frac{\text{A}}{\text{s}}, \quad L = 1\text{ H}, \quad |\mathcal{E}_L| = ?$$

با قراردادن این مقادیر در رابطه ۶-۴ داریم:

$$|\mathcal{E}_L| = \left| -L \frac{dI}{dt} \right| \\ = |-(1\text{ H})(1\text{ A/s})| = 1\text{ V}$$

به این ترتیب می‌توان گفت: یک هانری (1 H) ضریب خودالقایی القاگری است که اگر جریان عبوری از آن با آهنگ یک آمپر بر ثانیه (1 A/s) تغییر کند، نیروی محرکه خودالقایی برابر یک ولت (1 V) در آن القا می‌شود.

مثال ۴-۷

از سیملوله‌ای به ضریب خودالقایی 0.4 H ، جریان متغیری می‌گذرد که با زمان به صورت $I = (4t - 3) \times 10^{-3}$ تغییر می‌کند (I بر حسب آمپر و t بر حسب ثانیه است). بزرگی نیروی محرکه خودالقایی را محاسبه کنید.
پاسخ: از داده‌های مسئله داریم:

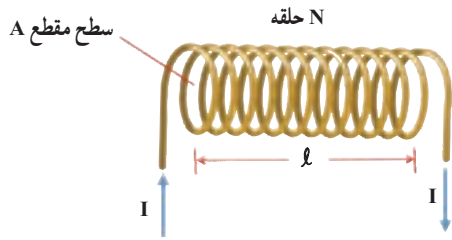
$$L = 0.4\text{ H}, \quad I = (4t - 3) \times 10^{-3}, \quad |\mathcal{E}_L| = ?$$

ابتدا آهنگ تغییر جریان نسبت به زمان (dI/dt) را به دست می‌آوریم:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} [(4t - 3) \times 10^{-3}] = 4 \times 10^{-3} \text{ A/s} = 4\text{ mA/s}$$

با استفاده از رابطه ۶-۴ داریم:

$$|\mathcal{E}_L| = \left| -L \frac{dI}{dt} \right| = \left| -(0.4\text{ H})(4 \times 10^{-3} \text{ A/s}) \right| \\ = 1/6 \times 10^{-3} \text{ V} = 1/6\text{ mV}$$



شکل روبه‌رو سیملوله‌ای حامل جریان \$I\$ به طول \$l\$ و سطح مقطع \$A\$ را نشان می‌دهد که از \$N\$ حلقهٔ نزدیک به هم تشکیل شده است. ضریب خودالقایی این سیملوله را پیدا کنید.

پاسخ: در فصل ۳ دیدیم که میدان مغناطیسی درون سیملولهٔ حامل جریان \$I\$ از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

با توجه به اینکه میدان مغناطیسی درون سیملوله یکنواخت و موازی با محور آن است، شار مغناطیسی حاصل از آن، که از سیملوله می‌گذرد برابر است با:

$$\Phi = BA = \mu_0 \frac{NA}{l} I$$

با تغییر جریان، شار مغناطیسی عبوری از سیملوله نیز تغییر می‌کند. در این صورت نیروی محرکهٔ خودالقایی برابر است با:

$$\mathcal{E}_L = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$= -N \frac{d}{dt} \left(\mu_0 \frac{NA}{l} I \right)$$

$$\mathcal{E}_L = -\mu_0 \frac{N^2 A}{l} \frac{dI}{dt}$$

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

از مقایسهٔ این رابطه با رابطهٔ ۴-۶ داریم:

همان‌طور که انتظار داشتیم این رابطه نشان می‌دهد که القابیدگی یا ضریب خودالقایی یک القاگر، تنها تابع ویژگی‌های ساختاری آن است.

توجه: در فصل ۳ دیدیم که اگر سیملوله هسته داشته باشد، میدان مغناطیسی حاصل از آن تقویت می‌شود. به همین دلیل وجود هسته درون القاگر نیز سبب تقویت القابیدگی آن می‌شود و در نتیجه برای سیملولهٔ دارای هسته داریم:

$$L = K \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

در این رابطه، \$K\$ ضریبی بدون یکا است که به جنس هستهٔ داخل سیملوله بستگی دارد و به آن **ضریب تراوایی مغناطیسی نسبی هسته** می‌گویند.

ضریب خودالقایی سیملولهٔ بدون هسته به طول \$5 \text{ cm}\$ و سطح مقطع \$1 \text{ cm}^2\$ متشکل از \$2000\$ حلقهٔ نزدیک به هم را پیدا کنید.

پاسخ: از داده‌های مسئله داریم:

$$l = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m} \text{ و } A = 1 \text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ و } N = 2000$$

$$L = ?$$

با استفاده از نتیجه مثال ۴-۸ و قراردادن مقادیر بالا در آن داریم :

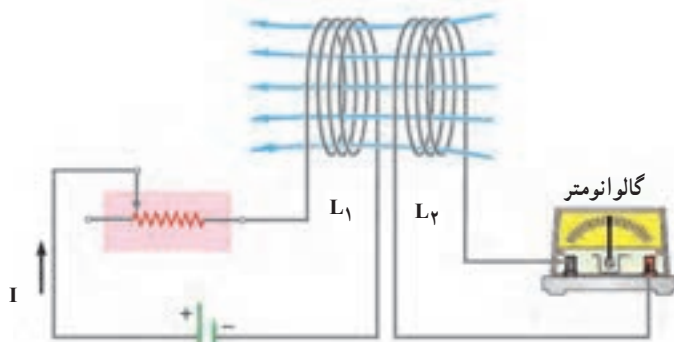
$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{\ell} = (4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m / A}) \frac{(2000)^2 \times (10^{-3} \text{ m}^2)}{0.5 \text{ m}}$$

$$= 10^{-2} \text{ H} = 10 \text{ mH}$$

تمرین ۳-۴

دو سیملوله بدون هسته با سطح مقطع و تعداد دور یکسان را در نظر بگیرید. اگر طول یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، نسبت ضریب خودالقایی آنها را محاسبه کنید.

القای متقابل : دو پیچه مجاور هم را مطابق شکل ۴-۱ در نظر بگیرید. جریان عبوری در پیچه ۱، میدان مغناطیسی \vec{B} را به وجود می‌آورد و در نتیجه این میدان یک شار مغناطیسی از پیچه ۲ می‌گذراند. اگر جریان در پیچه ۱ تغییر کند، شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند؛ بنابر قانون فارادی، این تغییر شار نیروی محرکه‌ای در پیچه ۲ القا می‌کند. این فرایند **القای متقابل** نامیده می‌شود و به کمک آن می‌توان انرژی را از پیچه‌ای به پیچه دیگر منتقل کرد.



شکل ۴-۱ با تغییر جریان عبوری از القاگر L_1 ، شار مغناطیسی عبوری از القاگر L_2 نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار مغناطیسی یک نیروی محرکه القایی در القاگر L_2 تولید می‌کند که می‌توان جریان ناشی از آن را با یک گالوانومتر مشاهده کرد.



هانری (۱۸۷۸-۱۷۹۷)

هانری در آمریکا به دنیا آمد. او در خانواده فقیری می‌زیست و از جوانی مجبور بود کار کند و در نتیجه تحصیلات مرتبی نداشت. او در سیزده سالگی شاگرد ساعت‌سازی شد و شبانه به تحصیل می‌پرداخت. پس از آن با کوشش بسیار توانست در یکی از مدارس روستایی به شغل معلمی بپردازد. سپس به تحصیل طب و مهندسی علاقه‌مند شد و سرانجام به سمت استاد ریاضیات و فیزیک انتخاب گردید. او از سال ۱۸۶۸ تا پایان عمر ریاست آکادمی ملی علوم را عهده‌دار بود. او تجربیات زیادی در مورد الکترومغناطیس داشت و با پیچیدن سیم‌های ظریف عایق‌بندی شده به تعداد زیاد به دور هسته‌های آهنی، آهنرباهای الکتریکی بر قدرتی را ساخت. سپس موفق به کشف پدیده خودالقایی شد. او همچنان یک موتور الکتریکی ساخت که بعداً در تلگراف مورد استفاده زیادی قرار گرفت. یکای القاییدگی به احترام او هانری نامیده می‌شود.

اگر در شرایط آرمانی تمام شار مغناطیسی پیچه ۱ از پیچه ۲ بگذرد، ضریب القای متقابل که آن را با نماد M نشان می‌دهند، از رابطه $M = \sqrt{L_1 L_2}$ به دست می‌آید. از آنجا که تغییرات جریان در یک مدار می‌تواند نیروهای محرکه ناخواسته‌ای در دیگر مدارهای مجاور القا کند، القای متقابل می‌تواند مزاحمتی در مدارهای الکتریکی باشد. برای هرچه کم کردن این اثرها، سامانه‌های چندمداری باید به گونه‌ای طراحی شوند تا M تا حد ممکن کوچک باشد. القای متقابل کاربردهای مفید بسیاری نیز دارد. مثلاً در مبدل‌ها که در پایان همین فصل با آنها آشنا خواهید شد مقدار M نقش مهمی در مقدار ولتاژ خروجی آنها ایفا می‌کند.

کاربرد القاها در لامپ‌های فلورئوسان



چون القاها با تغییرات جریان مخالفت می‌کنند، نقش مهمی در لامپ‌های فلورئوسان (موسوم به لامپ‌های مهتابی) دارند (شکل روبه‌رو). در این لامپ‌ها، جریان الکتریکی از گازی که فضای درون لامپ را پر کرده است می‌گذرد، گاز را یونیده می‌کند و باعث درخشش آن می‌شود؛ ولی گاز یونیده یک رسانای کاملاً غیراھمی است. هرچه جریان بیشتر باشد، گاز را بیشتر یونیده می‌کند و مقاومت آن کمتر می‌شود. اگر ولتاژ به حد کافی بالایی به گاز اعمال شود، جریان می‌تواند بسیار زیاد شود و به مدار بیرونی لامپ

فلورئوسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر یا متعادل‌کننده مغناطیسی را به‌طور متوالی با لامپ فلورئوسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل‌کننده همچنین امکان کار لامپ فلورئوسان با ولتاژ متناوب را فراهم می‌سازد. این ولتاژ به‌طور سینوسی تغییر می‌کند؛ به‌طوری که با توجه به ویژگی‌های برق تولیدی در ایران، در هر ثانیه ولتاژ یک‌صد بار به‌طور لحظه‌ای صفر می‌شود. اگر متعادل‌کننده وجود نداشته باشد، با صفرشدن ولتاژ، گاز داخل لامپ به سرعت وایونیده (غیر یونیده) و لامپ خاموش می‌شود. متعادل‌کننده، نیروی محرکه خود القاایی جریان را برقرار می‌سازد و لامپ را روشن نگه می‌دارد.

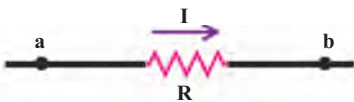
۴-۶- انرژی ذخیره‌شده در القاگر

وقتی در دو سر القاگری اختلاف پتانسیل برقرار شود، مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی در مقاومت الکتریکی سیم‌های القاگر به‌صورت گرما تلف و بقیه آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود که مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

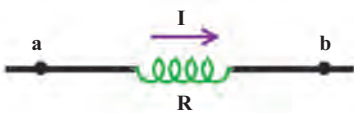
$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4-7)$$

لازم است توجه کنید که رفتار مقاومت و القاگر را به لحاظ انرژی اشتباه نگیرید (شکل ۴-۱۱). هنگام عبور جریان از مقاومت، انرژی وارد آن می‌شود، جریان چه پایا باشد و چه تغییر کند، این انرژی در مقاومت به‌صورت گرما تلف می‌شود. برخلاف آن، انرژی تنها وقتی وارد یک القاگر آرمانی با مقاومت صفر می‌شود که جریان در آن/فزیس یابد. این انرژی تلف نمی‌شود، بلکه در القاگر ذخیره شده و هنگام کاهش جریان، آزاد می‌شود. هنگام عبور جریان پایا از یک القاگر، انرژی به آن وارد یا از آن خارج نمی‌شود.

مقاومت با جریان I : انرژی تلف شده است.



القاگر با جریان I : انرژی ذخیره شده است.



شکل ۴-۱۱ مقاومت قطعه‌ای است که در آن انرژی به‌طور غیرقابل برگشت تلف می‌شود. برخلاف آن، انرژی ذخیره شده در القاگر حامل جریان را می‌توان وقتی جریان به صفر کاهش می‌یابد بازیافت کرد.

مثال ۱-۴

متخصصان صنعت برق، علاقه‌مندند راه‌های مؤثری را برای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی در ساعت‌های کم مصرف بیابند تا با استفاده از آن، نیاز مشتریان را در ساعت‌های پر مصرف تأمین کنند. یک ایده این است که: شاید بتوان از یک القاگر بزرگ استفاده کرد. ضریب خودالقایی این القاگر چقدر باشد تا بتواند 1 kW.h انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان 20° A ذخیره کند؟
پاسخ: مقدار انرژی ذخیره شده مورد نیاز $U = 1 \text{ kW.h}$ و جریان $I = 20^\circ \text{ A}$ داده شده است. از معادله $4 - 7$ ضریب خودالقایی L را به دست می‌آوریم:

$$U = 1 \text{ kW.h} = (1 \times 10^3 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow L = \frac{2U}{I^2}$$

$$L = \frac{2 \times 3.6 \times 10^6 \text{ J}}{(20^\circ \text{ A})^2} = 180 \text{ H}$$

همان‌طور که نتیجه بالا نشان می‌دهد ضریب خودالقایی لازم، صدها هزار برابر بیشتر از ضریب خودالقایی یک القاگر معمولی است که در آزمایشگاه از آن استفاده می‌کنیم. سیم‌های معمولی که حامل 20° A جریان‌اند، برای اجتناب از اتلاف ناخواسته انرژی ناشی از گرمای RI^2t باید قطر بزرگی داشته باشند تا مقاومت القاگر پایین بیاید. در نتیجه اندازه یک القاگر 180 H که از سیم‌های معمولی ساخته شده باشد، باید خیلی بزرگ (به اندازه یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری‌های موجود این طرح غیر عملی است و توجیه اقتصادی ندارد.

تمرین ۱۴-۱۴

سیملوله بدون هسته به طول 25 cm و مساحت سطح مقطع 0.5 cm^2 ، شامل 400 حلقه حامل جریان $1/5 \text{ A}$ است. مطلوب است:

- (الف) ضریب خودالقایی سیملوله
- (ب) انرژی ذخیره شده در القاگر

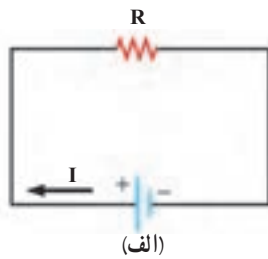
مطالعه آزاد



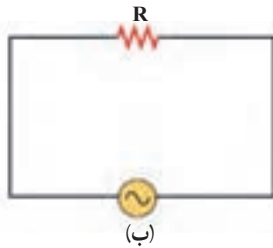
انرژی لازم برای جرقه زدن شمع اتومبیل، از انرژی مغناطیسی ذخیره شده در پیچه احتراق تأمین می‌شود.

انرژی میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه‌های احتراق اتومبیل‌های با موتور بنزینی دارد. پیچه اولیه با حدود 25° دور به باتری اتومبیل بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی‌ای تولید می‌کند. این پیچه را یک پیچه ثانویه با 2500 دور سیم خیلی نازک احاطه کرده است. هنگام جرقه زدن شمع برای انفجار، جریان در پیچه اولیه قطع می‌شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر فرو می‌افتد و نیروی محرکه ده‌ها هزار ولتی در پیچه ثانویه القا می‌کند. در نتیجه انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی به صورت جریان لحظه‌ای بسیار زیاد از پیچه ثانویه به طرف شمع می‌رود و جرقه‌ای تولید می‌کند که سبب احتراق مخلوط سوخت - هوا در سیلندرهای موتور می‌شود (شکل روبه‌رو).

۷-۴- جریانی متناوب



(الف)

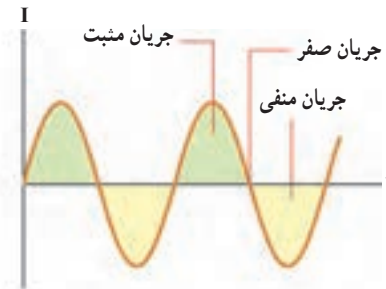


(ب)

شکل ۱۳-۴ الف) مدار ساده جریانی مستقیم و ب) مدار ساده جریانی متناوب

در سال ۱۸۸۰ میلادی بحث‌های داغی بین دو مخترع دربارهٔ بهترین روش توزیع توان الکتریکی صورت گرفت. توماس ادیسون موافق جریانی مستقیم (dc)، یعنی جریانی بود که با زمان تغییر نمی‌کند. جورج وستینگهاوس از جریانی متناوب (ac) حمایت می‌کرد که در آن ولتاژ و جریانی به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. سرانجام، وستینگهاوس پیروز شد و پس از آن بیشتر وسایل خانگی و سامانه‌های توزیع برق با جریانی متناوب کار می‌کنند.

شکل ۴-۱۲ دو مدار ساده جریانی مستقیم و جریانی متناوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید جهت جریانی در مدار جریانی مستقیم مشخص است در حالی که در مدار جریانی متناوب، به دلیل تغییر جهت جریانی بر حسب زمان، نمی‌توان جهت مشخص و دائمی را برای جریانی در نظر گرفت. تمامی نیروگاه‌های تولید برق در دنیا و از جمله ایران، جریانی متناوب تولید می‌کنند که تابعی سینوسی از زمان است و به همین دلیل جریانی متناوب سینوسی نامیده می‌شود (شکل ۴-۱۳).

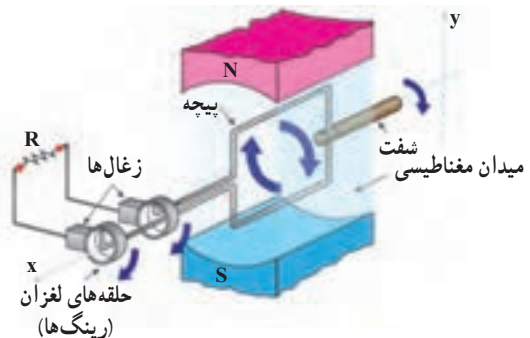


شکل ۱۳-۴ جریانی متناوب سینوسی، متداول‌ترین شکل جریانی متناوب است.

یکی از کاربردهای مهم القای الکترومغناطیسی، تولید جریانی متناوب است. دیدیم که برای تولید نیروی محرکه القایی باید شار عبوری از مدار تغییر کند، و شار مغناطیسی که از یک پیچه می‌گذرد از رابطه $\Phi = AB \cos \theta$ محاسبه می‌شود که در آن θ زاویهٔ بین نیم‌خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

ساده‌ترین راه برای تغییر شار، تغییر زاویهٔ θ است. به همین دلیل متداول‌ترین روش تولید جریانی القایی، تغییر زاویهٔ θ است.

شکل ۴-۱۴ پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت دور محور x بچرخد. محور y را منطبق بر راستای میدان مغناطیسی انتخاب کرده‌ایم.



شکل ۱۴-۴ اجزای یک مولد (ژنراتور) ساده ac. حرکت مکانیکی از طریق میل‌گردان، سبب چرخیدن پیچه در میدان مغناطیسی می‌شود و جریانی متناوبی را در مدار به وجود می‌آورد.

اگر زمان یک دور چرخش پیچه T ثانیه باشد، پیچه در مدت t ثانیه، به اندازه $\frac{t}{T}$ دور خواهد چرخید. هر دور کامل برابر 2π رادیان است. در نتیجه اگر پیچه در لحظه $t=0$ در وضعیت عمود بر میدان مغناطیسی ($\theta=0$) باشد، پس از گذشت t ثانیه زاویه θ برابر است با:

$$\theta = 2\pi \frac{t}{T} \text{ رادیان}$$

T یعنی زمان چرخش یک دور کامل را «دوره» یا «زمان تناوب» می‌نامند. $\frac{2\pi}{T}$ را با ω نمایش می‌دهند و به آن **بسامد زاویه‌ای** می‌گویند. در نتیجه داریم:

$$\theta = \omega t$$

به این ترتیب شار مغناطیسی $\Phi = AB \cos \theta$ که در لحظه t از پیچه عبور می‌کند برابر است با:

$$\Phi = AB \cos \omega t$$

نیروی محرکه القاشده در پیچه با توجه به قانون فارادی از رابطه ۳-۴ محاسبه می‌شود:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NAB \frac{d(\cos \omega t)}{dt}$$

یا:

$$\mathcal{E} = NAB\omega \sin \omega t$$

یعنی نیروی محرکه‌ای که در پیچه القا می‌شود با زمان تغییر می‌کند. بیشترین مقدار این نیروی

محرکه مربوط به زمانی است که برای آن $\sin \omega t = 1$ باشد و برابر است با $\mathcal{E}_m = NAB\omega$; در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t \quad (۸-۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه القاشده به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند.

اگر مقاومت مدار برابر R باشد، جریان حاصل از این نیروی محرکه از رابطه زیر به‌دست

می‌آید:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin \omega t$$

این رابطه نشان می‌دهد که جریان نیز با زمان تغییر می‌کند. بیشترین مقدار جریانی که از مدار

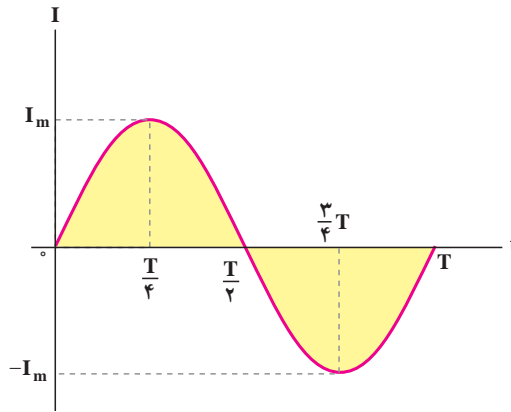
می‌گذرد، مربوط به زمانی است که $\sin \omega t = 1$ باشد، و برابر است با $I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R}$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (۹-۴)$$

رابطه ۹-۴ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیچه به‌طور سینوسی تغییر

می‌کند. به چنین جریانی، **جریان متناوب** می‌گوییم. نمودار این جریان برحسب زمان، در یک دوره در

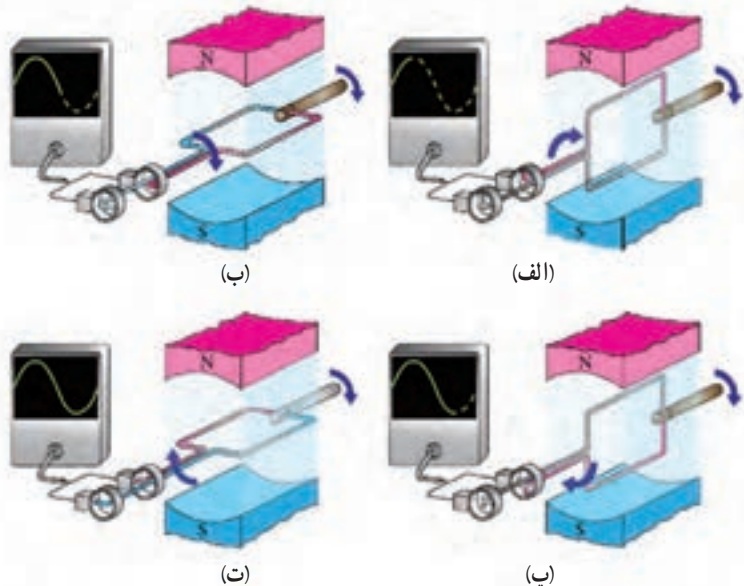
شکل ۱۵-۴ رسم شده است.



شکل ۴-۱۶ نمودار جریان متناوب سینوسی در یک دوره

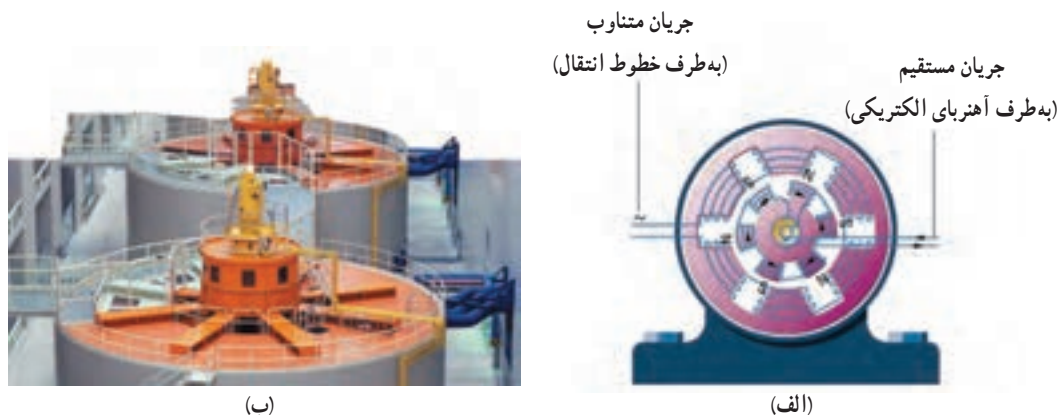
اکنون خواهیم دید که چگونه جریان متناوب سینوسی توسط مولد در یک چرخه کامل تولید می‌شود. این موضوع در شکل ۴-۱۶ در چهار مرحله یا به عبارت دیگر چهار ربع چرخه نشان داده شده است.

در $t=0$ سطح پیچه بر خطوط میدان مغناطیسی عمود است و جریانی در مدار وجود ندارد. پیچه به اندازه $\frac{1}{4}$ دور می‌چرخد تا در وضعیت شکل ۴-۱۶ الف قرار بگیرد. در حین این چرخش، شار مغناطیسی عبوری، از پیچه تغییر می‌کند و جریان از صفر به مقدار بیشینه مثبت می‌رسد (اولین ربع چرخه). پیچه به چرخیدن ادامه می‌دهد تا در وضعیت شکل ۴-۱۶ ب قرار بگیرد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه مثبت به صفر می‌رسد (دومین ربع چرخه). پس از آن پیچه از وضعیت شکل ۴-۱۶ ب به وضعیت شکل ۴-۱۶ پ می‌رسد. در حین این چرخش، جریان از صفر به مقدار بیشینه منفی می‌رسد (سومین ربع چرخه). سرانجام پیچه یک دور دیگر می‌چرخد و یک چرخه کامل طی می‌کند و به وضعیت شکل ۴-۱۶ ت می‌رسد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه منفی به صفر می‌رسد. این حرکت به طور متناوب (پی در پی) در پیچه ادامه می‌یابد و جریان متناوب تولید می‌کند.



شکل ۴-۱۷ تولید جریان متناوب در یک چرخه کامل

در نیروگاه‌های تولید برق، برای تولید جریان متناوب از مولدهای خاصی استفاده می‌شود که به آنها **مولدهای صنعتی جریان متناوب** می‌گویند. در مولدهای صنعتی پیچ‌ها ساکن‌اند و آهنربای الکتریکی در آنها می‌چرخد (شکل ۴-۱۷). در ایران بسامد برق تولیدشده ۵۰ Hz است که این عدد نشان می‌دهد آهنربای الکتریکی در هر ثانیه، ۵۰ مرتبه به‌طور کامل در پیچ می‌چرخد.



شکل ۴-۱۷ الف) در مولدهای صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچ‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود. (ب) نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق

مثال ۱۱-۴



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 ms طی شده است، دورهٔ تناوب برابر $T = 20 \text{ ms}$ است و در نتیجه بسامد زاویه‌ای برابر است با:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi \text{rad}}{20 \times 10^{-3} \text{s}} = 100\pi \text{ rad/s}$$

با توجه به نمودار بیشینهٔ جریان برابر $I_m = 4 \text{ A}$ است. به این ترتیب از رابطهٔ ۴-۹ داریم:

$$I = 4 \sin 100\pi t$$

توجه کنید که رابطهٔ بالا برحسب یکاهای SI نوشته شده است.

تمرین ۵-۴

معادلهٔ جریان - زمان یک مولد جریان متناوب برحسب یکاهای SI به‌صورت زیر است:

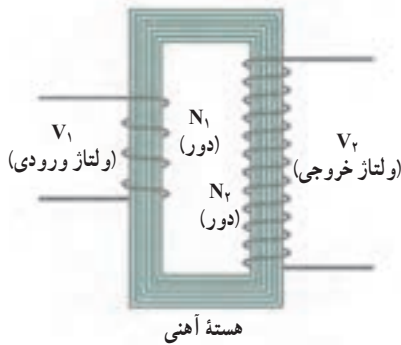
$$I = 2 \times 10^{-2} \sin 20\pi t$$

الف) مقدار جریان در لحظهٔ $t = \frac{1}{30} \text{ s}$ چقدر است؟

ب) نمودار جریان برحسب زمان را در یک چرخهٔ کامل رسم کنید.

مبدل‌ها: یکی از امتیازهای مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac بسیار آسان‌تر از dc است. در انتقال توان در فاصله‌های دور می‌خواهیم تا حد امکان از ولتاژ هرچه بالاتر و جریان هرچه کمتری استفاده کنیم، این کار اتلاف RI^2 را در خط‌های انتقال کم می‌کند و می‌توان از سیم‌های نازک‌تری استفاده و در مصرف مواد اولیه صرفه جویی کرد. خط‌های انتقال توان الکتریکی به‌طور معمول از ولتاژهای در حدود ۴۰۰ کیلوولت استفاده می‌کنند (شکل ۴-۱۸). از طرف دیگر، ملاحظات ایمنی و الزامات عایق‌بندی در ساخت وسایل خانگی و صنعتی، ولتاژهای به نسبت پایین‌تری را 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**، که به دو صورت کاهنده و افزایشنده ساخته می‌شوند، صورت می‌گیرد.

شکل ۴-۱۸ قبل از انتقال توان الکتریکی از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزایشنده، ولتاژ را تا حدود ۴۰۰ کیلوولت افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.



شکل ۴-۱۹ مبدلی شامل دو پیچه با تعداد دورهای متفاوت را نشان می‌دهد که به دور یک هسته آهنی (فرومغناطیس نرم) پیچیده شده‌اند (پیچه‌ها نسبت به هسته عایق‌بندی شده‌اند). در عمل پیچه اولیه با N_1 دور به یک مولد جریان متناوب بسته شده است که ولتاژ بیشینه آن V_1 است. پیچه ثانویه با N_2 دور به مصرف‌کننده‌ای وصل شده است که ولتاژ بیشینه V_2 را تأمین کند. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچه‌های آن ناچیز است، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (۴-۱۰)$$

شکل ۴-۱۹ یک مبدل آرمانی شامل دو پیچه که روی یک هسته آهنی پیچیده شده‌اند.

مثال ۴-۱۲



شکل روبه‌رو یک مبدل ۲۲۰ ولت به ۱۲ ولت را نشان می‌دهد. تعداد دورهای پیچه ثانویه را پیدا کنید.

پاسخ: با توجه به داده‌های روی شکل داریم:

$$N_2 = ? \text{ و } V_2 = 12V \text{ و دور } N_1 = 8000 \text{ و } V_1 = 220V$$

با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه ۴-۱۰ داریم:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

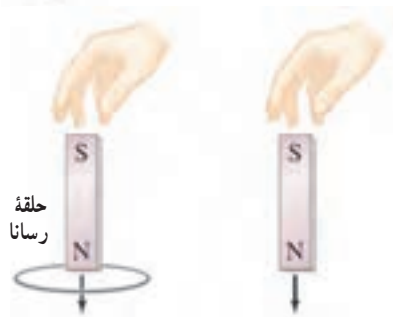
$$\frac{12V}{220V} = \frac{N_2}{8000} \Rightarrow N_2 = 436 \text{ دور}$$

پرسش‌ها

۱ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل روبه‌رو به یک حلقهٔ رسانا نزدیک می‌کنیم. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



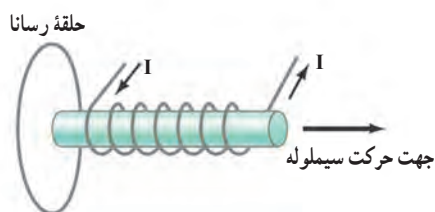
۲ دو آهنربای میله‌ای مشابه را به‌طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می‌کنیم (شکل روبه‌رو). اگر سطح زمین در محل برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرورفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. (تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.)



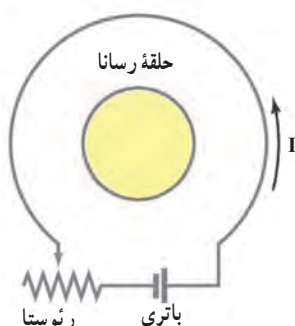
۳ جهت جریان القایی در هریک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل روبه‌رو در چه جهتی است؟

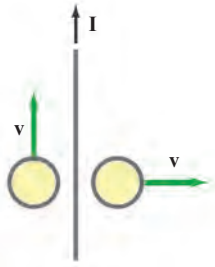


۴ شکل روبه‌رو سیم‌لولهٔ حامل جریانی را نشان می‌دهد که در حال دور شدن از یک حلقهٔ رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



۵ اگر در مدار شکل روبه‌رو مقاومت رئوستا افزایش یابد، جهت جریان القایی را در حلقهٔ رسانا با ذکر دلیل تعیین کنید.

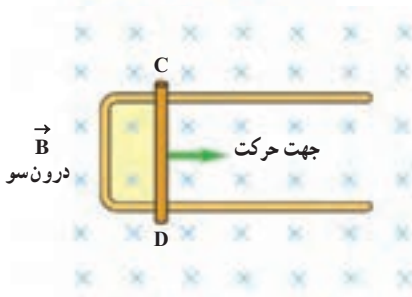




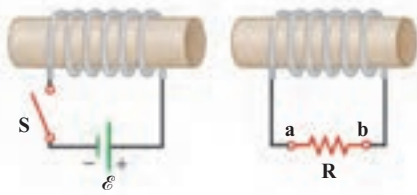
۶ دو حلقهٔ رسانا در مجاورت یک سیم دراز حامل جریان ثابت I قرار دارند؛ این دو حلقه با سرعت ثابت، ولی جهت‌های متفاوت مطابق شکل روبه‌رو حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



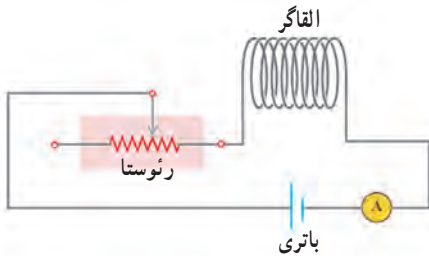
۷ حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل روبه‌رو به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی درون سویی خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



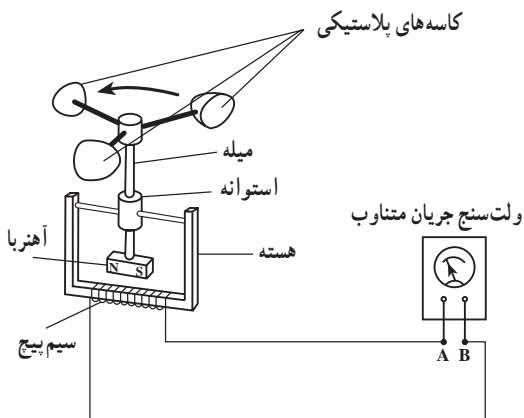
۸ شکل روبه‌رو رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} که عمود بر صفحهٔ شکل و روبه داخل صفحه است نشان می‌دهد. وقتی میلهٔ فلزی CD به طرف راست حرکت کند، جهت جریان القایی در مدار در چه جهتی است؟



۹ در مدار نشان داده شده در شکل روبه‌رو، جهت جریان القایی را در مقاومت R در هریک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید:
الف) در لحظهٔ بستن کلید S،
ب) در لحظهٔ باز کردن کلید S.



۱۰ شکل روبه‌رو مداری را نشان می‌دهد که شامل یک القاگر (سیملوله)، باتری، رنوستا و آمپرسنج که به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ مولد، انرژی ذخیره شده در القاگر را زیاد کنیم چه راه‌هایی پیشنهاد می‌کنید؟



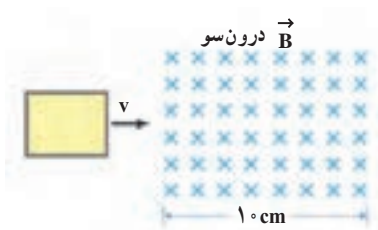
۱۱ شکل روبه‌رو ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میلهٔ آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربهٔ ولت‌سنج می‌شود؟

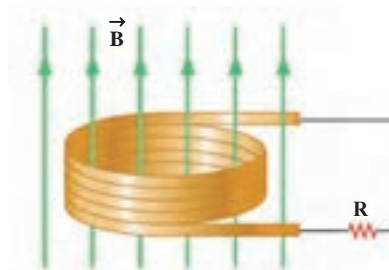
ب) آیا با افزایش سرعت باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.

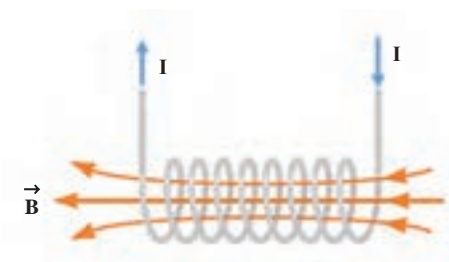
مسئله‌ها



۱ حلقه فلزی مستطیلی شکلی به ابعاد $3\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ مطابق شکل روبه‌رو با سرعت ثابت 2 m/s وارد میدان مغناطیسی یکنواخت 2 T می‌شود و از طرف دیگر آن خارج می‌شود. نمودار شارسی که از حلقه می‌گذرد و همچنین نیروی محرکه القا شده در آن را برحسب زمان رسم کنید.



۲ شکل روبه‌رو بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. در این مدار با افزایش شار مغناطیسی عبوری از القاگر (پیچه) در مدت 2 ms ، جریانی که آمپرسنج می‌خواند از صفر به 1 A می‌رسد. اگر ضریب خودالقایی القاگر 5 H باشد، بزرگی نیروی محرکه خودالقایی متوسط القاگر چند ولت است؟



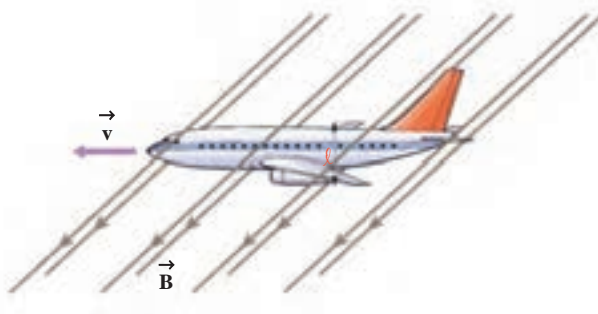
۳ سطح مقطع و طول سیملوله شکل روبه‌رو به ترتیب 2 cm^2 و 8 cm است. اگر این سیملوله از 1000 حلقه نزدیک به هم تشکیل شده باشد، الف) ضریب خودالقایی آن را پیدا کنید.

ب) چه جریانی از سیملوله بگذرد تا در میدان مغناطیسی آن 4 J انرژی ذخیره شود؟

۴ پیچه‌ای که دارای 1000 حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که

اندازه آن 4 T و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت 1 s تغییر می‌کند و به 4 T در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه 5 cm^2 باشد، الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در پیچه را حساب کنید. ب) شکلی برای پیچه رسم کنید و جهت جریان القایی را روی این شکل تعیین کنید.

۵ شکل زیر هواپیمایی را نشان می‌دهد که در راستای افق درون میدان مغناطیسی زمین در حال حرکت است. نیروی محرکه الکتریکی بین دو طرف انتهایی بال‌های هواپیما را که به فاصله l از یکدیگر واقع پیدا کنید. فرض کنید $B = 5\text{ }\mu\text{T}$ ، $l = 3\text{ m}$ ، $v = 200\text{ m/s}$ و $\theta = 3^\circ$. (راهنمایی: به مثال ۴-۴ توجه کنید.)



القای الکترومغناطیسی

۶ پیچ‌های با سطح مقطع 3 cm^2 و متشکل از 1000 حلقه، در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت 0.2 s پیچ‌ها بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه متوسط القایی در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را 5 G در نظر بگیرید.

۷ اگر شار مغناطیسی عبوری از حلقه‌ای مطابق رابطه زیر (در SI) تغییر کند، بزرگی نیروی محرکه القایی در حلقه در لحظه $t = 2 \text{ s}$ چقدر است؟

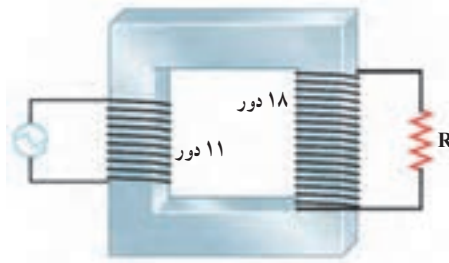
$$\Phi_B = (4t^2 + 3t - 1) \times 10^{-3}$$

۸ جریان متناوبی که بیشینه آن 2 A و دوره آن 0.2 s است از یک رسانای 5 اهمی می‌گذرد.

الف) در چه لحظه‌هایی جریان بیشینه است؟ در این لحظه‌ها نیروی محرکه القایی چقدر است؟

ب) در لحظه $t = \frac{1}{40} \text{ s}$ ، جریان چقدر است؟

۹ در مبدل آرمانی شکل زیر، اگر بیشینه ولتاژ دوسر مقاومت R برابر 6 V باشد، بیشینه ولتاژ مولد چقدر است؟



عملیات چهارگانه با رقم‌های بامعنا

در محاسبه‌ها چنانچه تعداد رقم‌های بامعناى عددهایی که به کمک آنها یکی از عمل‌های چهارگانه (جمع، تفریق، ضرب و تقسیم) را انجام می‌دهیم، برابر نباشند، حاصل عملیات باید به گونه‌ای بیان شود که دقتی بیشتر از دقت عددهای اندازه‌گیری شده را بیان نکند. اگر بخواهیم دو مقدار $58/3 \text{ m}$ و $13/24 \text{ m}$ را با هم جمع کنیم، باید توجه داشته باشیم که عدد اول با دقت $0/1$ متر اندازه‌گیری شده است، یعنی رقم غیرقطعی آن (۳) دارای دقت از مرتبه دهم متر است و عدد دوم با دقت $0/1$ متر اندازه‌گیری شده است و رقم غیرقطعی آن (۴) دارای دقت از مرتبه صدم متر است. اگر حاصل جمع این دو مقدار را برابر $71/54 \text{ m}$ بیان کنیم، دقت یکصدم متر را برای عدد اول هم به کار برده‌ایم، در حالی که در اندازه‌گیری اول، دقت ما تا دهم متر بوده است. حاصل جمع این دو عدد را باید برابر $71/5 \text{ m}$ بیان کنیم، یعنی عدد ۵ را بزرگ‌ترین مرتبه عدم قطعیت دار نگاه داشته‌ایم و از رقم ۴ صرف‌نظر کرده‌ایم. برای اجتناب از هرگونه اشتباه در بیان نتیجه محاسبه‌های عددهای بامعنا، تعداد رقم‌های بامعناى حاصل عملیات را به کمک قاعده‌های کلی زیر تعیین می‌کنیم:

۱- تعداد رقم‌های بامعنا که از ضرب یا تقسیم چند عدد به دست می‌آید باید برابر باشد با تعداد رقم‌های بامعناى عددی که کمترین تعداد رقم‌های بامعنا را دارد.

۲- هنگام جمع (یا تفریق)، مرتبه آخرین رقم سمت راست حاصل جمع (یا حاصل تفریق) برابر با مرتبه آخرین رقم سمت راست بامعناى عددی است که مرتبه غیرقطعی آن بیشتر است، یعنی دقت اندازه‌گیری آن کمتر بوده است. به بیان دیگر در هنگام جمع (یا تفریق) عددها که با یک یا یکا بیان شده‌اند، تعداد رقم‌های پشت ممیز عدد حاصل، باید برابر تعداد رقم‌های پشت ممیز عددی باشد که کمترین رقم بعد از ممیز دارد.

مثال

شعاع یک کره $12/5 \text{ cm}$ برآورد شده است. حجم این کره را محاسبه کنید.

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$V = \frac{4}{3} (\pi/14) (12/5 \text{ cm})^3$$

$$V = 8177/083333 \text{ cm}^3$$

با توجه به اینکه شعاع کره با سه رقم بامعنا بیان شده است، حجم کره برابر $8/17 \times 10^3 \text{ cm}^3$ خواهد بود.

پاسخ:

مثال

جمع زیر را انجام دهید.

$$4/326\text{kg} + 25/13\text{kg}$$

پاسخ: مقدار عدد اول با دقت هزارم کیلوگرم و مقدار دومی تا صدم کیلوگرم دقت دارد. در نتیجه، مرتبه رقم غیرقطعی در عدد دوم بیشتر است و رقم غیرقطعی حاصل جمع باید با دقت صدم بیان شود. در نتیجه خواهیم داشت:

$$4/326\text{kg} + 25/13\text{kg} = 29/45\text{kg}$$

در هنگام جمع و یا تفریق دو عدد که یکای آنها یکسان نیست، باید بدون آنکه در تعداد رقم‌های بامعناى آنها تغییری ایجاد شود، ابتدا همه را برحسب یکای مشترکی بنویسیم. آنگاه با توجه به قاعده کلی که بیان شد، محاسبه موردنظر را انجام دهیم.

مثال

یک سنگ $2/5$ کیلوگرمی را درون یک جعبه 264 گرمی قرار می‌دهیم. جرم کل چند گرم می‌شود؟
پاسخ: ابتدا هر دو عدد را برحسب یکای گرم و به صورت توان یکسان ده می‌نویسیم.

$$m_1 = 2/5\text{kg} = 2/5 \times 10^2\text{g}$$

$$m_2 = 264\text{g} = 264 \times 10^0\text{g}$$

$$m = m_1 + m_2$$

$$m = 2/5 \times 10^2\text{g} + 264 \times 10^0\text{g} = 2/8 \times 10^2\text{g}$$

در نوشتن حاصل جمع، ضمن به کارگیری قاعده بیان شده، از روش گرد کردن نیز استفاده کرده‌ایم و حاصل جمع را به جای $2/764 \times 10^2$ به صورت $2/8 \times 10^2$ نوشته‌ایم.

برخی از رابطه‌ها ضریب‌های ثابتی دارند که از محاسبه به دست نیامده‌اند. مانند عدد ۲ در رابطه زیر

(عرض مستطیل + طول مستطیل) $\times 2$ = (محیط مستطیل)

$$\text{حجم کره} = \frac{4}{3} \pi R^3$$

یا عددهای ۳ و ۴ در رابطه

این گونه ضریب‌ها که رقم غیرقطعی ندارند، به هنگام تعیین تعداد رقم‌های بامعناى حاصل یک محاسبه در نظر گرفته

نمی‌شوند.

واژه‌نامه فارسی - انگلیسی

| | | | |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Electric current | جریان الکتریکی | Alternating Current | جریان متناوب |
| Equivalent resistance | مقاومت معادل | Angular frequency | بسامد زاویه‌ای |
| Faraday's law of electromagnetic induction | قانون القای الکترومغناطیسی فارادی | Attraction | ربایش |
| Ferromagnetism | فرومغناطیس | Bar magnet | آهنربای میله‌ای |
| Horseshoe magnet | آهنربای نعلی شکل | Capacitance | ظرفیت |
| Inclination angle | زاویه شیب | Coefficient of resistivity | ضریب دمایی مقاومت ویژه |
| Induced current | جریان القایی | Coil | پیچ |
| Inductance | ضریب خودالقایی (القایدگی) | Capacitor | خازن |
| Inductor | القاگر | Conservation of charge | پایستگی بار |
| Insulator | عایق | Cosmic ray | پرتو کیهانی |
| Internal resistance | مقاومت درونی | Coulomb's Law | قانون کولن |
| Iron core | هسته آهنی | Cycle | چرخه |
| Kirochhoff's laws | قانون‌های کیرشهف | Declination Angle | زاویه میل |
| Lenz's law | قانون لنز | Dielectric constant | ثابت دی الکتریک |
| Loop | حلقه | Efficiency | بازده |
| Macroscopic quantities | کمیت‌های ماکروسکوپی | Electric breakdown | فروریزش الکتریکی |
| Magnetic axis | محور مغناطیسی | Electric dipole | دوقطبی الکتریکی |
| Magnetic declination | میل مغناطیسی | Electric field lines | خط‌های میدان الکتریکی |
| Magnetic dipole | دوقطبی مغناطیسی | Electric field | میدان الکتریکی |
| Magnetic domain | حوزه مغناطیسی | Electric force | نیروی الکتریکی |
| Magnetic energy | انرژی مغناطیسی | Electric motor | موتور الکتریکی |
| Magnetic field lines | خط‌های میدان مغناطیسی | Electric potential energy | انرژی پتانسیل الکتریکی |
| Magnetic field | میدان مغناطیسی | Electric resistance | مقاومت الکتریکی |
| Magnetic flux | شار مغناطیسی | Electro Motive Force (E.M.F.) | نیروی محرکه الکتریکی |
| | | Electromagnetic induction | القای الکترومغناطیسی |

| | | | |
|------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Resistivity | مقاومت ویژه | Magnetic induction | القای مغناطیسی |
| Resistor | مقاومت | Magnetic permeability | تراوایی مغناطیسی |
| Rheostat | رئوستا | Mechanism | سازوکار |
| Right hand rule | قاعده دست راست | Net charge | بار خالص |
| Self – induction | خودالقایی | Node | گره |
| Series circuits | مدارهای متوالی | North pole | قطب شمال |
| Solenoid | سیملوله | Parallel circuits | مدارهای موازی |
| South pole | قطب جنوب | plate capacitor parallel | خازن تخت (خازن با صفحه های موازی) |
| Surface charge density | چگالی سطحی بار | Paramagnetism | پارامغناطیس |
| Temporary magnet | آهنربای موقت | Permanent magnet | آهنربای دائمی |
| Thermal equilibrium | تبادل گرمایی | Permittivity | ضریب گذردهی |
| to charge | پر کردن – شارژ (خازن) | Polarized | قطبیده |
| to discharge | خالی کردن (خازن) | Potential difference | اختلاف پتانسیل |
| Variable resistor | مقاومت متغیر | Relative magnetic permeability | تراوایی نسبی مغناطیسی |
| Voltage drop | افت پتانسیل | Repulsion | رانش |

فهرست منابع

منابع فارسی

- ۱- مبانی فیزیک (جلدهای اول و دوم)، ویرایش دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیگ و یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر.
- ۲- فیزیک دانشگاهی (جلدهای اول و دوم)، ویرایش دوازدهم و سیزدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاسی، روح الله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۳- درک فیزیک با رویکرد تصویری، بریان آرنولد، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و مریم عباسیان. چاپ سوم ۱۳۹۲، انتشارات مدرسه.
- ۴- حرارت و ترمودینامیک، مارک زیمانسکی و ریچارد دیتمن، ترجمه حسین تونچی، حسن شریفیان عطار و محمدهادی هادی زاده، چاپ اول ۱۳۶۴، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۵- دوره درسی فیزیک (جلد اول) گ. س. لندسبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.
- ۶- اصول فیزیک (جلد اول)، هانس سی. اوهانیان، ترجمه یوسف امیرارجمند و نادر رابط، چاپ اول ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۷- فیزیک مفهومی، ویرایش دهم، پل جی. هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
- ۸- فیزیک، مارچلو آلونسو و ادوارد جی. فین، ترجمه لطیف کاشیگر، چاپ اول ۱۳۶۷، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۹- دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ترجمه محمدابراهیم ابوکاظمی و دیگران، چاپ اول ۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
- ۱۰- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویرایش دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری تژاد، چاپ اول ۱۳۹۱.

منابع انگلیسی

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, McGraw – Hill.
2. Holt Physics, Serway and Faughn, 1999, Holt Rinehart and Winston.
3. Physics, Giambattista and Richardson, Second Edition, 2008, McGraw– Hill.
4. University Physics, Wolfgang Bauer and Gray D. Westfall, 2011, McGraw – Hill.
5. Physics, Eugene Hecht, Second Edition, 1997, Brooks / Cole Publishing Company.
6. University Physics, Hugh D. Young, 1992, Addison – Wesley.
7. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th Edition, 2014, Prentice – Hall International.
8. Principles of Physics, Frank J. Blatt, 1989, Allyn and Bacon.
9. Introduction to physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 9th Edition, 2013, John Wiley & Sons.
10. Contemporary College, Edwin Jones and Richard Childers, 2001, McGraw–Hill.
11. Glencoe physics, Paul W. Zizewitz, 2000, McGraw– Hill.



اصلاحیه کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه (رشته علوم تجربی) - چاپ ۱۳۹۴ و ۲۵۶/۳

صفحه ۱۴ ← خط دوم به صورت زیر اصلاح شود.

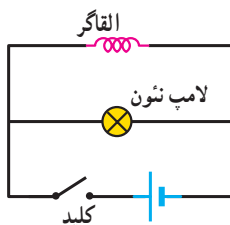
$$\vec{E}_B = \vec{E}_1 + \vec{E}_\gamma = -E_1 \vec{i} + E_\gamma \vec{i}$$

صفحه ۶۰ ← در دومین خط پس از معادله (۲-۵): عبارت «داخلی» حذف شود
 یعنی درون آنها مقاومتی در برابر حرکت بارها وجود دارد

صفحه ۶۸ ← شکل ۲-۲۴: جهت جریان های I_p و I_γ وارونه شود.

صفحه ۸۶ ← در توضیح شکل ۳-۱۲ عبارت «یکنواخت» بعد از عبارت «میدان مغناطیسی» اضافه شود و در اولین خط پس از رابطه (۳-۱) عبارت «زاویه حاده‌ای» با عبارت «زاویه‌ای» جایگزین شود.
 زاویه‌ای را که جهت جریان با جهت بردار میدان مغناطیسی \vec{B} می‌سازد با α نشان داده‌ایم (شکل ۳-۱۲).
شکل ۳-۱۲ سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواخت. نیروی مغناطیسی وارد بر سیم عمود بر صفحه کتاب و به طرف داخل است.

صفحه ۱۰۰: در توضیح شکل ۳-۲۴ جمله دوم در (خط‌های دوم و سوم) حذف شود.
شکل ۳-۲۴ چرخش الکترون به دور هسته و به دور خودش، منشأ خاصیت مغناطیسی اتم است.



صفحه ۱۱۹: شکل روبه‌رو به آزمایش ۴-۲ اضافه شود.

صفحه ۱۱۴ و صفحه ۱۱۵، در مثال‌های ۴-۴ و ۴-۵: کلیه «d» ها به «Δ» تبدیل شود (مثلاً $dt \rightarrow \Delta t$).

صفحه ۱۲۱: خط‌های آخر مثال ۴-۸: عبارت «تراوایی مغناطیسی نسبی هسته» به «ضریب تراوایی مغناطیسی نسبی هسته» تبدیل شود.
 در این رابطه، K ضریبی بدون یکا است که به جنس هسته داخل سیملوله بستگی دارد و به آن **ضریب تراوایی مغناطیسی نسبی هسته** می‌گویند.

صفحه ۱۲۲ شکل ۴-۱۰: جهت خط‌های میدان مغناطیسی برعکس شود.

صفحه ۱۳۲، مسئله ۲، سطر سوم: کلمه «توسط» به «متوسط» تبدیل شود.
 اگر ضریب خودالقایی القاگر $\frac{d\Phi}{dI}$ باشد، بزرگی نیروی محرکه خودالقایی متوسط القاگر چند ولت است؟