بسم الله الرحمن الرحیم

اَللّٰهُمَّ صَلِّ عَلیٰ مُحَمَّدٍ وَ آلِ مُحَمَّدٍ وَ عَجِّلْ فَرَجَهُمْ

فیزیک (۲)

رشته‌های ریاضی و فیزیک ــ علوم تجربی

راهنمای معلّم

پایهٔ یازدهم

دوره دوم متوسطه

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب: راهنمای معلّم فیزیک (۲) ـ پایهٔ یازدهم دورهٔ دوم متوسطه ـ ۱۱۱۳۷۵

پدیدآورنده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

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

شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف: محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، احمد احمدی (فصل‌های ۱ و ۲) و روح‌الله خلیلی بروجنی (فصل‌های ۳ و ۴) (اعضای گروه تألیف)

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

شناسه افزوده آماده‌سازی: احمد رضا امینی(مدیر امور فنی و چاپ) ـ جواد صفری (مدیر هنری) ـ رضوان جهانی فریمانی، زهرا راست نسب (صفحه‌آرا) ـ زهره برهانی زرندی، زهرا ایمانی نصر، شهلا دالایی، سیما لطفی و حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)

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

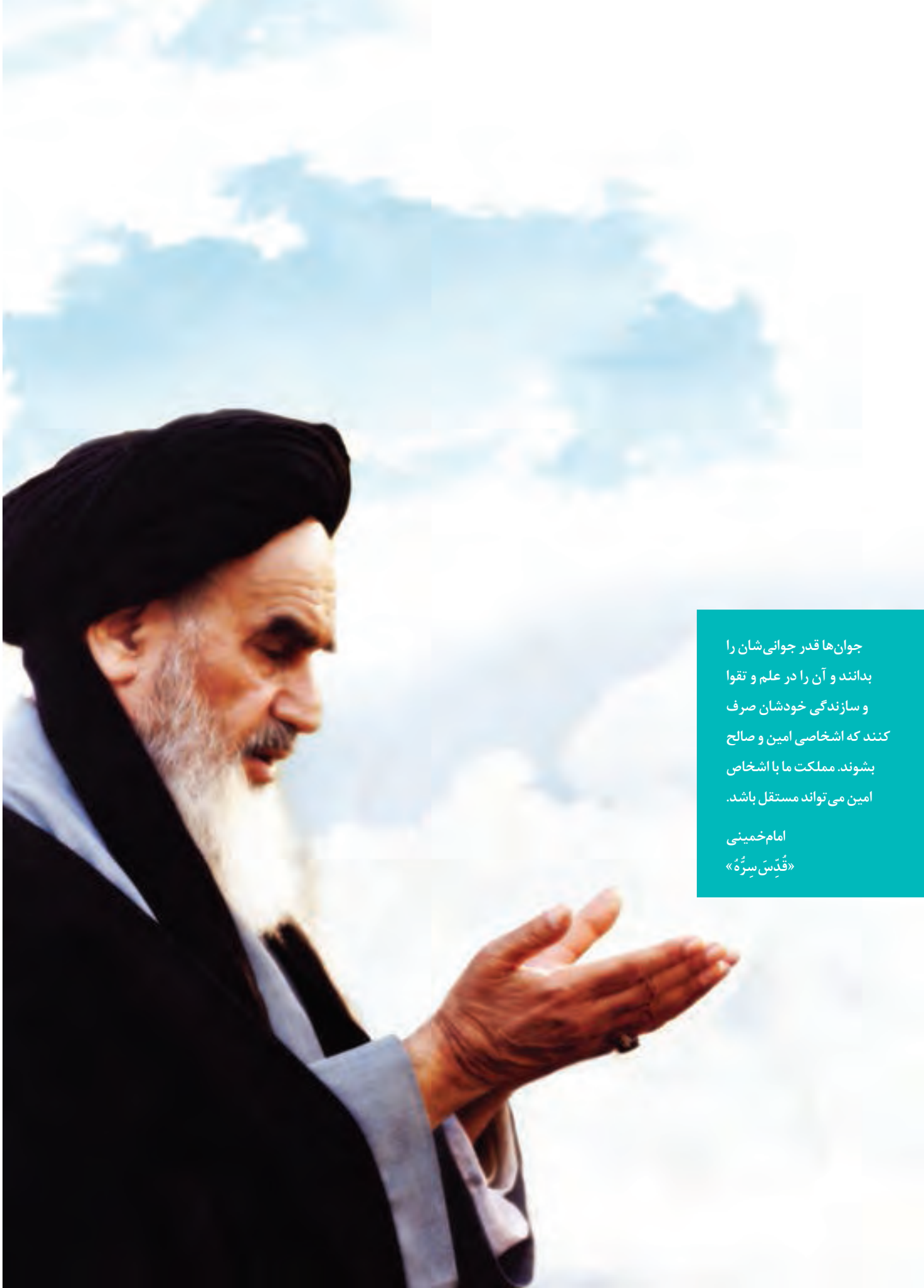
ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش) تلفن: ۵ـ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵

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

سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ اوّل ۱۳۹۸

شابک ۹ـ۳۴۲۲ـ۰۵ـ۹۶۴ـ۹۷۸

ISBN: 978_964_05_3422 _9



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

امام‌خمینی
«قُدِّسَ سِرُّهُ»

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

جهت دانلود رایگان منابع استخدامی دبیر علوم تجربی - فیزیک آزمون آموزش و پرورش، اینجا بزنید.

فهرست

فصل ۱ : الکتریستهٔ ساکن ۱

۱ـ۱ـ بارالکتریکی ۵
۱ـ۲ـ پایستگی و کوانتیده بودن بار الکتریکی ۶
۱ـ۳ـ قانون کولن ۱۳
۱ـ۴ـ میدان الکتریکی ۲۵
۱ـ۶ـ خطوط میدان الکتریکی ۳۴
۱ـ۷ـ انرژی پتانسیل الکتریکی ۴۰
۱ـ۸ـ پتانسیل الکتریکی ۴۳
۱ـ۹ـ میدان الکتریکی در داخل رسانا ۴۷
۱ـ۱۰ـ خازن ۶۴
۱ـ۱۱ـ خازن با دی الکتریکی ۶۶
۱ـ۱۲ـ انرژی خازن ۷۹
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ..... ۸۵

فصل ۲ : جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم ۹۹

۲ـ۱ـ جریان الکتریکی ۱۰۳
۲ـ۲ـ مقاومت الکتریکی وقانون اهم ۱۰۷
۲ـ۳ـ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی ۱۰۸
۲ـ۴ـ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها ۱۱۹
۲ـ۵ـ توان در مدارهای الکتریکی ۱۳۱
۲ـ۶ـ ترکیب مقاومت‌ها ۱۴۰
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ..... ۱۵۸

فصل ۳ : مغناطیس ۱۷۳

۳ـ۱ـ مغناطیس و قطب‌های مغناطیسی ۱۷۸
۳ـ۲ـ میدان مغناطیسی ۱۷۹
۳ـ۳ـ نیروی مغناطیسی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک در میدان مغناطیسی ۱۹۱
۳ـ۴ـ میدان مغناطیسی برسیم حامل جریان ۱۹۵
۳ـ۵ـ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی ۲۰۰

۳ـ۶ـ ویژگی‌های مغناطیسی مواد ۲۰۴
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل۳ ..... ۲۱۵

فصل ۴ : القای الکترومغناطیسی و جریان متناوب ۲۱۹

۴ـ۱ـ پدیدهٔ القای الکترو مغناطیس ۲۲۳
۴ـ۲ـ قانون القای الکترو مغناطیسی فاراده ۲۲۴
۴ـ۳ـ قانون لنز ۲۳۲
۴ـ۴ـ القاگرها ۲۳۶
۴ـ۵ـ جریان متناوب ۲۳۸
راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل۴ ..... ۲۴۶

سخنی با همکاران

در دنیای امروز، دسترسی به دانش و اطلاعات، بسیار متنوع و آسان شده است؛ از این‌رو، بی‌اطلاعی از دانش و فنّاوری روز، ناتوانی در به‌کارگیری و پردازش آنها، عدم مهارت در دستیابی و تحلیل اطلاعات، عدم مهارت در برخورد با یک مسئلهٔ جدید و عدم تصمیم‌گیری مبتنی بر پردازش اطلاعات، برای شهروندان دنیای امروز غیرقابل قبول است. به همین منظور، نقش معلمان نسبت به سابق تغییر اساسی کرده است. نقش معلمان دیگر انتقال صرف دانش نیست، بلکه ایجاد نگرش مثبت و یاد دادن چگونگی برخورد با مسئله است؛ یعنی، دانش‌آموزان باید یاد بگیرند که سؤال‌های اساسی در یک مسئله یا یک موضوع را استخراج و اطلاعات موردنیاز خود را جمع‌آوری، پردازش و نتیجه‌گیری کنند. در این راستا، ابتدا معلم با طرح پرسش، نشان دادن یک تصویر و یا فیلم، طرح یک فعالیت، آزمایش یا ... در دانش‌آموزان ایجاد انگیزه کرده و آنها را با موضوع درگیر می‌کند و سپس آنها را هدایت می‌کند تا در تولید مفاهیم علمی مشارکت کنند. آموزش باید به‌گونه‌ای باشد که دانش‌آموزان نحوهٔ برخورد منطقی و علمی با مسائل را بیاموزند؛ لذا شایسته است، ما هم در به‌کارگیری شیوه‌های نوین آموزشی، آشنا شدن با دانش‌های جدید، کسب مهارت‌های مورد نیاز، استفاده از شبکه‌های اطلاعاتی، افزایش خلاقیت خود و... بکوشیم.

ساختار این کتاب پس از مطالعه، تحقیق، بررسی و بحث‌های مفصل بین کارشناسان آموزشی و همچنین مطالعه و بررسی کتاب‌های راهنمایی معلم چند کشور مختلف تنظیم شده است و با ارائهٔ الگوهایی، مشارکت هرچه بیشتر دانش‌آموزان را در فرایند یاددهی ــ یادگیری و کسب تجربه، فراهم می‌کند. در ادامه، به شرح مختصر عناوین مطرح شده در این کتاب می‌پردازیم.

الف) هدف‌ها : در مواردی که هدف یک بخش، فصل، آزمایش و یا ... خیلی مشخص نیست، پیامدها، هدف‌های دانشی، مهارتی و نگرشی آن آورده شده است.

ب) دانسته‌های قبلی : در این قسمت، دانسته‌های قبلی دانش‌آموزان که در پایه‌های تحصیلی پایین‌تر مطرح شده و مرتبط با بخش است، آورده شده است.

پ) محدودهٔ بحث : به‌منظور تأکید روی مفاهیمی که در کتاب درسی به آنها پرداخته شده است، حوزه و محدودهٔ یادگیری در موارد ضروری، تعیین شده است.

ت) نشانگر (آیکون)های فیلم : برای عمق بخشیدن به مطالب نظری، فیلم‌های آموزشی تدارک دیده شده است که در کتاب با نشانگر (آیکون)هایی مشخص شده است. کلیهٔ فیلم‌ها در سایت گروه بارگذاری شده است.

ث) راهنمای تدریس : در این قسمت، روش‌هایی برای شروع درس به معلم پیشنهاد شده است. این روش‌ها کاملاً انعطاف‌پذیرند و معلم می‌تواند با توجه به امکانات، شرایط و اقتضای کلاس، هر روش دیگری را که بتواند دانش‌آموزان را بیشتر ترغیب کرده و آنها را به موضوع درس علاقه‌مند کند، به‌کار گیرد. همچنین به منظور شفاف شدن مطالب درسی توصیه‌هایی نیز ارائه شده است.

ج) فعالیت‌های پیشنهادی : به منظور درک عمیق‌تر مفاهیم درسی و درگیر کردن دانش‌آموزان به منظور تولید مفهوم، در هر واحد یادگیری، تعدادی فعالیت پیش‌بینی شده است که برخی از آنها به صورت فعالیت‌های خارج از کلاس تدارک دیده شده است. تأکید می‌شود که انجام همهٔ این فعالیت‌ها ضروری نیست و یک معلم مجرب، با توجه به وضعیت کلاس یا امکاناتی که در اختیار دارد می‌تواند هر فعالیت دیگری را که مؤثر واقع شود، به‌دانش‌آموزان پیشنهاد کند.

چ) آزمایش‌های پیشنهادی : در اغلب موارد، قسمت عمده‌ای از یادگیری توسط انجام دادن آزمایش و کارهای عملی صورت می‌گیرد. برای افزایش عمق یادگیری و لذت بیشتر از آموختن و یادگیری تجربی، به آزمایش‌های متنوع و متعددی نیاز است؛ از این‌رو، در مواردی، آزمایش‌های کتاب تعمیم یافته یا آزمایش‌های ساده و جدیدی پیشنهاد شده است که دانش‌آموزان می‌توانند آنها را در گروه‌های خود انجام دهند.

ح) تمرین‌های پیشنهادی : برای عمق بخشیدن به بخش دانشی مطالب کتاب، تمرین‌های پیشنهادی نیز ارائه شده است که دبیران محترم می‌توانند از آنها به عنوان تکالیف درسی یا مثال استفاده کنند.

خ) دانستنی‌های معلم : برای آشنایی همکاران با برخی از موضوعات مرتبط با هر فصل، مطالبی در غالب «دانستنی‌های ضروری» تدارک دیده شده است. ضرورتی در انتقال این مفاهیم به دانش‌آموزان نیست و تنها می‌توان تحقیق در مورد برخی از آنها را به عنوان فعالیت خارج از کلاس به گروه‌های دانش‌آموزی واگذار کرد. در این کتاب در اغلب موارد نام دانستنی و اینکه در مورد چه موضوعی بحث می‌شود، در جعبه‌هایی آورده شده است و برای دسترسی به آزمایشگاه‌های مجازی و شبیه‌سازهای مناسب هر فصل و همچنین مجموعه آزمایش‌های مرتبط با مفاهیم فصل‌های فیزیک ۲، و همچنین کل دانستنی می‌توانید به سایت گروه فیزیک به آدرس http: //physics-dep.talif.sch.ir مراجعه نمایید.

د) پاسخ فعالیت‌ها و تمرین‌ها : در بسیاری از موارد ابتدا اهداف تمرین‌ها و فعالیت‌های داخل هر فصل تعیین شده و سپس پاسخ آنها و پاسخ تمرین‌های آخر فصل آورده شده است.

فصل اول

الکتریسیتهٔ ساکن

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- با بار الکتریکی، اصول حاکم بر آن، قانون کولن و پیامدهای آن آشنا می شوند.
- با میدان الکتریکی، آثار آن و چگونگی نمایش آن با خطوط آشنا می‌شوند.
- با میدان الکتریکی در داخل رساناها و تفاوت آن با میدان الکتریکی در داخل دی‌الکتریک‌ها آشنا می شوند و به شناختی از چگالی سطحی بار الکتریکی و چگونگی توزیع بار در رسانا می‌رسند.
- با مفاهیم انرژی پتانسیل الکتریکی، پتانسیل الکتریکی، و اختلاف پتانسیل الکتریکی آشنا می‌شوند.
- با خازن، تعیین عامل‌های مؤثر بر ظرفیت خازن‌های تخت، تأثیر حضور دی‌الکتریک در خازن‌ها و انرژی ذخیره شده در خازن‌ها آشنا می‌شوند.

چه شناختی مطلوب است؟

- در تجربه‌هایی مانند مالش اجسام بر یکدیگر، اصل‌های پایستگی و کوانتیده بودن بار برقرار است.
- نیروی الکتریکی بین دو بار نقطه‌ای با حاصل ضرب بزرگی آنها متناسب و با مربع فاصلهٔ آنها نسبت وارون دارد.
- بارهای الکتریکی در فضای اطراف خود ویژگی‌ای را ایجاد می‌کنند که می‌تواند با مفهوم میدان الکتریکی توصیف شود.
- برای مجسم کردن میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام باردار از خط‌های جهت‌داری موسوم به خطوط میدان الکتریکی استفاده می‌کنیم.
- به یک ذرهٔ باردار در میدان الکتریکی، انرژی پتانسیلی الکتریکی وابسته است که با جابه‌جایی در میدان الکتریکی تغییر می‌کند. اما نسبت این تغییر انرژی به بار ذره، مستقل از نوع و اندازهٔ بار الکتریکی است که به این نسبت، اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه‌ای می‌گوییم که بار در آنها جابه‌جا شده است.
- میدان الکتریکی داخل یک رسانا صفر است و پدیدهٔ القای الکتریکی پیامدی از آن است.
- تراکم و چگالی سطحی بار در نقاط نیز سطح یک جسم رسانای باردار از نقاط دیگر آن بیشتر است.
- خازن وسیله‌ای است که بار و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره می‌کند.
- ظرفیت یک خازن فقط به شکل هندسی آن و نه به بار و اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ آن بستگی دارد و در حضور دی‌الکتریک، ظرفیت آن افزایش می‌یابد.
- پدیدهٔ قطبش الکتریکی، پیامدی از رفتار یک دی‌الکتریک در میدان الکتریکی خارجی است.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شود؟

- سری الکتریسیتهٔ مالشی (تریبوالکتریک) چیست و چگونه اصول پایستگی بار و کوانتیده بودن بار در تجربه‌هایی مانند مالش اجسام با یکدیگر برقرار می‌مانند؟
- نیروی الکتریکی بین دو بار نقطه‌ای به چه عواملی بستگی دارد؟
- چگونه نیروی خالص وارد بر یک بار نقطه‌ای از سوی چند بار نقطه‌ای دیگر تعیین می‌شود؟
- میدان الکتریکی حاصل از یک جسم باردار چیست و چگونه تعیین می‌شود؟
- قاعده‌های رسم خطوط میدان الکتریکی چیست؟
- انرژی پتانسیل الکتریکی چیست و چگونه تعیین می‌شود؟
- پتانسیل الکتریکی چیست و چه ارتباطی با انرژی پتانسیل الکتریکی دارد؟
- رابطهٔ اختلاف پتانسیل الکتریکی و بزرگی میدان الکتریکی یکنواخت چیست؟
- میدان الکتریکی داخل رسانا چیست و چگونه پدیدهٔ القا را توجیه می‌کند؟
- چگالی بار الکتریکی رسانا چیست و بار الکتریکی داده شده به یک رسانا چگونه روی سطح خارجی آن توزیع می‌شود؟
- خازن چیست و ظرفیت آن به چه عامل‌هایی بستگی دارد؟
- اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن با ماده‌ای عایق پرشود، چه تأثیری بر ظرفیت خازن می‌گذارد؟
- فروریزش الکتریکی چیست و حضور دی‌الکتریک در خازن چه تأثیری بر آن می‌گذارد؟
- انرژی خازن چگونه تعیین می‌شود و به چه عواملی بستگی دارد؟

در پایان این واحد یادگیری دانش‌آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می‌کنند؟

دانشی

با مفاهیم بار الکتریکی، پایستگی و کوانتیده بودن بار الکتریکی، قانون کولن، برهم‌نهی نیروهای الکتروستاتیکی، میدان الکتریکی، برهم‌نهی میدان‌های الکتریکی، چگونگی رسم خطوط میدان الکتریکی، انرژی پتانسیل الکتریکی، پتانسیل الکتریکی، میدان الکتریکی داخل رساناها و پدیدهٔ القا، چگالی سطحی بار، خازن و ظرفیت آن، قطبش بارهای الکتریکی، فروریزش الکتریکی، و انرژی خازن آشنا می‌شوند.

مهارتی

به مهارت کار با الکتروسکوپ، چگونگی تعیین بار دو جسم مختلف که به هم مالش داده می‌شوند، به انجام آزمایشی جهت درک قانون کولن، چگونگی استفاده از مولّد وان‌دوگراف برای ایجاد بار و مشاهدهٔ تجربی میدان الکتریکی، چگونگی مشاهدهٔ تجربی خطوط میدان الکتریکی، تعیین اختلاف پتانسیل باتری‌ها، ایجاد یک قفس فاراده و انجام آزمایشی‌هایی با آن، چگونگی تعیین توزیع بار روی سطح خارجی یک رسانا، استفاده از خازن در مدارهای الکتریکی و ساخت نمونه‌های ساده‌ای از خازن و انجام آزمایش‌هایی در جهت مشاهدهٔ فروریزش الکتریکی دست می‌یابند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

بنا به صلاحدید مدرسه ۱۶ جلسهٔ ۹۰ دقیقه‌ای

هر فصل با تصویری شروع می‌شود و هدف آن جلب توجه دانش‌آموزان به اهمیت موضوع و مفاهیمی است که قرار است در آن فصل بررسی شود. توجه دانش‌آموزان را به متن زیر تصویر جلب کنید تا زمینهٔ مناسبی برای ورود به فصل فراهم شود. این تصویر به این دلیل انتخاب شده است که توجه دانش‌آموزان را به یکی از کاربردهای مفاهیم این فصل جلب کند.

۱ــ۱ــ بار الکتریکی

الکتریسیتهٔ مالشی، یعنی انتقال الکترون از یک جسم به جسم دیگر در نتیجهٔ تماس یا مالش دو جسم با هم، پدیده‌ای کوانتومی است و نباید تلاش کرد با مفاهیم فیزیک کلاسیک توضیح داده شود. می‌توان از ورود به این بحث پرهیز کرد. آن‌چه موضوع درس ماست، پدیدارشناسی این پدیده است؛ یعنی این‌که مثلاً به تجربه دیده‌ایم در مالش پارچهٔ پشمی با میلهٔ پلاستیکی، میله بار منفی و پارچه بار مثبت پیدا می‌کند که به معنی انتقال تعدادی الکترون از میله به پارچه است.

ممکن است در تماس دو جسم هم‌جنس با هم، یا مالش آن دو با یکدیگر نیز تعدادی الکترون از یکی به دیگری منتقل شده و هر دو جسم دارای بار شوند. شاید این پدیده را برای دو قطعه کیسهٔ نازک پلاستیکی که با هم مالش داده می‌شوند تجربه کرده باشید.

اشاره به الکتروسکوپ در این درس تنها در حد یک یادآوری ساده است. توضیح بیشتر در مورد الکتروسکوپ و آزمایش‌های مربوط به آن در کتاب آزمایشگاه علوم تجربی ۲ آمده است. با این حال می‌توان برای ایجاد انگیزه، با آزمایش‌های ساده‌ای پرسش‌هایی در مورد بارهای الکتریکی و برهم‌کنش آنها، روش‌های باردار کردن اجسام و ... مطرح کرد.

فیلم

در این مجموعه فیلم‌ها چند آزمایش ساده در مورد الکتریسیتهٔ ساکن را می‌بینید.

برخی از دانش‌آموزانِ دقیق با این چالش درگیر می‌شوند که چرا یکایی به بزرگی کولن برای اندازه‌گیری بارالکتریکی انتخاب شده است در حالی که بیشتر بارهای معمولی بسیار کوچکتر از ۱C است. می‌دانیم کولن از یکاهای فرعی SI است و با رابطهٔ $I = q / t$ از روی دو یکای اصلی A و s تعریف می‌شود (۱C = ۱A × ۱s). یکاهای آمپر و ثانیه، این مشکل را ندارند، یعنی بسیاری از جریان‌های معمولی از مرتبهٔ ۱A یا بزرگ‌تر و بسیاری از زمان‌های معمولی از مرتبهٔ ۱s یا بزرگ‌تر هستند. بنابراین ناچاریم به یکای کولن برای بار الکتریکی تن بدهیم.

پاسخ پرسش ۱ــ۱

بسته به اینکه روکش پلاستیکی را پیش از کشیدن بر روی ظرف غذا از رُل پیچ آن جدا کرده یا مستقیماً روی ظرف غذا بکشیم، پاسخ‌ها متنوع خواهد بود. وقتی روکش پلاستیکی را روی ظرف غذا می‌کشیم بر اثر تماس نزدیک دو جسم، بار در فرایندی موسوم به *الکتریسته‌دار شدن تماسی* بین دو سطح منتقل می‌شود. مثلاً ممکن است پوشش پلاستیکی، بخشی از الکترون‌های روی لبه را به سمت خود بکشد و آن بخش را باردار مثبت کند. آنگاه، پوشش که دارای بار منفی است و لبه که دارای بار مثبت است، یکدیگر را جذب خواهند کرد. البته *تماس نزدیک* در نواحی جداگانهٔ کوچکی رخ می‌دهد. وقتی دو جسم را به یکدیگر مالش می‌دهیم، تعداد این نواحیِ تماسِ نزدیک زیادتر می‌شود و بنابراین، این جاذبه هم بیشتر خواهد شد که به این، *الکتریسته‌دار شدن مالشی* می‌گویند. اگر روکش پلاستیکی را پیش از کشیدن روی ظرف، از رُل پیچ آن جدا کرده باشیم، تکه‌هایی از آن در فرایندهای الکتریسته‌دار شدن تماسی یا مالشی باردار می‌شوند. تکه‌های با الکترون اضافی، باردار منفی و تکه‌های با کاستی الکترون، باردار مثبت هستند (در واقع همین امر باعث تا خوردن پوشش‌های پلاستیکی یا نوار چسب بر روی خود یا رُل پیچ آن می‌شود.) آنگاه افزون بر آنچه در بالا گفته شد، همان‌طور که در مبحث قطبش خواهید دید، بارهای قطبشی نیز ایجاد خواهد شد که این موجب جذب بیشتری می‌شود. افزون بر این، اگر جدایی بار ناچیزی در یک سطح رخ داده باشد، این می‌تواند موجب ایجاد جدایی بار مشابهی در سطح مقابل نیز شود. همان‌طور که خواهیم دید به این جدایی بار، دو قطبی الکتریکی گفته می‌شود و دو قطبی‌های الکتریکی روی دو سطح، همدیگر را بر اثر نیروی جاذبهٔ بین مولکولی‌ای موسوم به *نیروی وان درووالس* جذب می‌کنند.

توجه کنید که این بیان، سطح نازل و ساده‌ای از بحث پایستگی بار الکتریکی است که متناسب با توان یادگیری دانش‌آموزان ارائه گردیده است. دانش‌آموز با تساوی تعداد پروتون‌ها و الکترون‌ها در اتم خنثی آشناست، به‌علاوه آموخته است در الکتریسیتهٔ مالشی، تعدادی الکترون از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شود. براساس چنین دانسته‌هایی، صفر بودن بار اتم خنثی و پایستگی بار هنگام جابه‌جایی بار بین دو جسم، فهمیدنی است. بیان جدی‌تر پایستگی بار، مبتنی بر «تقارن بار» است. یعنی در عالم برای همهٔ بارهای الکتریکی، باری با علامت مخالف وجود دارد. ولی این به معنی تساوی تعداد پروتون‌ها و الکترون‌ها نیست، بلکه در فیزیک ذرات بنیادی معلوم شده است که برای هر ذرهٔ بنیادی دارای بار الکتریکی، پادذره‌ای با همان اندازهٔ بار ولی با علامت مخالف وجود دارد. برای الکترون‌ها، پوزیترون‌ها، برای پروتون‌ها، پادپروتون‌ها، برای مزون‌های π^+، برای مزون‌های π^- و ... . به‌علاوه، ایجاد بار مثبت بدون ایجاد بار منفی با مقدار مساوی ممکن نیست و همین‌طور در مورد نابودی بار.

در این فیلم‌ها کار با یک الکتروسکوپ ساده را می‌بینید.

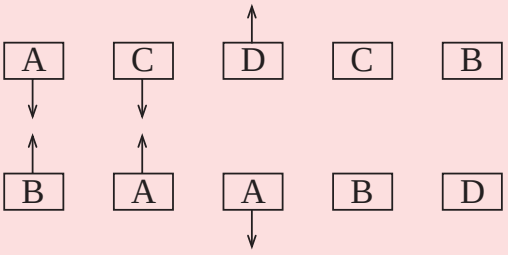
فیلم

در این فیلم‌ها روش‌هایی برای باردار کردن را می بینید.

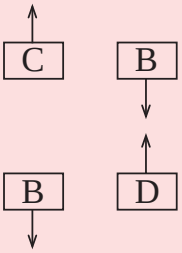
فیلم

تمرین پیشنهادی

۱ در شکل زیر، پنج جفت ورقه را در مقابل هم می‌بینید. ورقه‌های A، B، C و D پوشش پلاستیکی و بار الکتریکی نامعلوم دارند، ورقهٔ C پوشش فلزی دارد و بدون بار است. نیروهای الکتریکی بین بعضی ورقه‌ها نشان داده شده است. بقیهٔ شکل را به همان ترتیب کامل کنید.



پاسخ :



۲ سه گوی فلزی کاملاً مشابه A، B و C روی پایه‌های عایقی قرار دارند. بار گوی A برابر $+q$ است و گوی‌های B و C در ابتدا بدون بار هستند. گوی A نخست به گوی B و سپس به گوی C تماس داده می‌شود. در پایان این آزمایش، بار گوی A چیست؟

پاسخ : $+q/۴$

توجه کنید که در اینجا به تماس بین دو جسم مختلف اشاره داریم، ولی هر تماسی می‌تواند موجب انتقال بار در فرایندی موسوم به ***الکتریسیته‌دار شدن تماسی*** شود. در این‌باره حتماً به دانستنی مربوط اشاره شود.

توجه کنید که گسسته‌بودن و کوانتیده بودن را با هم اشتباه نگیرید. گرچه گسسته‌بودن شرط لازم برای کوانتیده بودن است، ولی شرط کافی نیست. هر مقدار گسسته‌ای را کوانتیده نمی‌گویند. کوانتیده بودن به معنای گسسته بودن در مقادیر معین و مشخص است. مثلاً اگر واحد پول کشوری x باشد، قیمت یک کالا نمی‌تواند مضرب غیرصحیحی از x باشد. در حالی‌که از لحاظ ریاضی مقادیری مانند $\frac{x}{۳}$، $\frac{x}{۴}$، $\frac{x}{۵}$ و... قابل قبول و گسسته‌اند، ولی کوانتیده محسوب نمی‌شوند. اما مقادیری مانند x، ۲x، ۳x و... افزون بر آن‌که گسسته‌اند، کوانتیده نیز هستند؛ زیرا مقادیر معین و مشخصی از واحد پول کشور هستند.

البته کوارک‌های سنگین‌تر شگفت (s)[۱]، دلربا (c)[۲]، ته (b)[۳] و سر (t)[۴] نیز وجود دارند، ولی در هر حال ترکیب کوارک‌ها به‌گونه‌ای است که نتیجهٔ بار خالص $\pm ne$ می‌شود که n یک عدد صحیح است. همچنین ذرات الکترون‌مانند سنگین‌تری به نام‌های میوئون (μ)[۵] و تاو (τ)[۶] وجود دارند که به مجموع این ذرات الکترون‌مانند لپتون[۷] گفته می‌شود. یعنی ذرات بنیادی مشتمل بر کوارک‌ها و لپتون‌ها هستند.

پاسخ تمرین ۱ــ۱

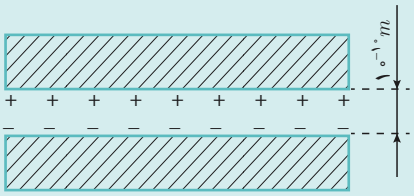
عدد اتمی، تعداد پروتون‌های هسته است و بنابراین بار الکتریکی هستهٔ اتم $q_{هسته} = +۹۲\ e = +۹۲\ (۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\ C) = ۱/۴۷ \times ۱۰^{-۱۷} C$ می‌شود. اتم اورانیم به همین تعداد الکترون دارد که مقدار آن منفیِ مقدار بالا می‌شود. بار الکتریکی اتم اورانیم (خنثی) مجموع این دو بار و بنابراین صفر است.

۱ــ Strange
۲ــ Charm
۳ــ bottom
۴ــ top
۵ــ muon
۶ــ tau
۷ــ lepton

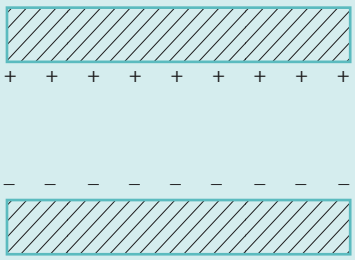
دانستنی برای معلم

باردار شدن الکتروستاتیکی

دلیل عمدهٔ باردار شدن عبارت است از عبور بخشی از الکترون‌ها از جسمی به جسم دیگر، وقتی که این اجسام در تماس نزدیک قرار می‌گیرند (شکل ۱). در نتیجه، بار مثبت بر سطح جسم اول (کمبود الکترون‌ها) و بار منفی بر سطح جسم دیگر (فزونی الکترون‌ها) ظاهر می‌شود. جابه‌جایی الکترون‌ها در این مورد بسیار کوچک و از مرتبهٔ فاصلهٔ بین اتمی از مرتبهٔ (10^{-10} m) است. بنابراین، به‌اصطلاح *لایهٔ الکتریکی دوگانه‌ای* که در مرز دو جسم به‌وجود می‌آید به‌هیچ‌وجه در فضای اطراف ظاهر نمی‌شود. ولی، اگر این اجسام را جدا کنیم، آنها در سطوحشان بارهای ناهم‌نام خواهند داشت (شکل ۲). درستی این امر را می‌توان با قرار دادن هر جسم در برابر الکتروسکوپ تحقیق کرد.



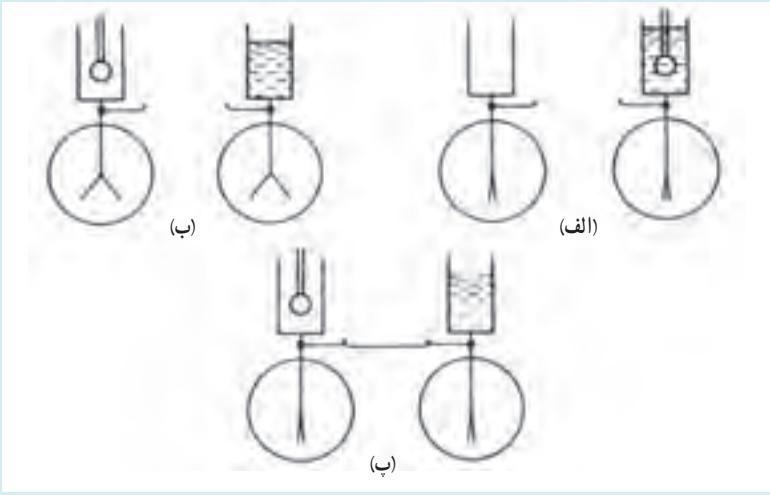
شکل ۱ــ ظهور لایهٔ الکتریکی دوگانه در تماس دو جسم مختلف



شکل ۲ــ وقتی که اجسام جدا شدند، معلوم می‌شود که هر کدام از آنها باردارند.

وقتی از «تماس نزدیک» بین دو جسم صحبت می‌کنیم، منظورمان این است که فاصلهٔ بین ذرات متعلق به اجسام مختلف با فاصله‌های بین اتمی و بین مولکولی در هرجسم قابل مقایسه می‌شود. فقط در این شرایط است که «به دام اندازی» الکترون‌های یک جسم توسط جسم دیگر امکان‌پذیر است و لایهٔ الکتریکی دوگانه به‌وجود می‌آید. البته، اجسامی که مورد بحث‌اند هیچ‌وقت کاملاً صاف نیستند. به همین دلیل، حتی وقتی که جسمی را به جسم دیگر به سختی می‌فشاریم، تماس نزدیک به مفهومی که در بالا ذکر شد در تمامی سطح رخ نمی‌دهد بلکه فقط در نواحی جداگانهٔ کوچکی رخ می‌دهد. وقتی که جسمی را به جسم دیگری مالش می‌دهیم، تعداد نواحی تماس نزدیک را، که در آنها باردار شدن اتفاق می‌افتد، زیاد می‌کنیم، بنابراین بار گرفته شده توسط هر جسم را پس از جدایی آنها افزایش می‌دهیم. این است خلاصهٔ نقش مالش در باردار کردن اجسام. باردار کردن از طریق مالش اصطلاحی است که تنها اهمیت تاریخی دارد.

آزمایش‌هایی که در شکل ۳ نشان داده‌ایم ما را متقاعد می‌کنند که در واقع همین‌طور هم باید باشد. در تماس نزدیک اجسام مختلف حتی وقتی که مالش به مفهوم کامل بین آنها وجود نداشته باشد باز هم بارهای الکتریکی ظاهر می‌شوند. دو الکتروسکوپ را اختیار و استوانه‌های فلزی بلندی را به ترتیب نشان داده شده در شکل ۳ به کلاهک‌های آنها متصل می‌کنیم. در یک استوانه آب مقطر می‌ریزیم و گلوله‌ای از پارافین را که متصل به دستهٔ نارسانایی است در آن فرو می‌بریم (شکل ۳ــ الف). با بیرون آوردن گلوله از آب، ملاحظه می‌کنیم که برگه‌های الکتروسکوپ از هم جدا می‌شوند (شکل ۳ــ ب، راست). قطع نظر از اینکه آیا گلوله را در عمق زیاد یا کمی فرو برده‌ایم، یا آن را از آب به‌کُندی یا به سرعت خارج کرده‌ایم، تجربه با موفقیت انجام می‌شود. این امر حاکی از آن است که وقتی که گلوله با مایع تماس می‌یابد بارها جدا می‌شوند و در اینجا مالش خودش نقشی ایفا نمی‌کند. با قرار دادن گلوله درون استوانهٔ الکتروسکوپ دوم (شکل ۳ــ ب، چپ)، ملاحظه می‌کنیم که برگه‌های الکتروسکوپ دوم جدا می‌شوند؛ یعنی گلوله در تماس با آب بار الکتریکی به‌دست آورده است. حال الکتروسکوپ‌ها را با سیمی به هم متصل می‌کنیم (شکل ۳ــ پ). برگه‌های دو الکتروسکوپ فرو می‌افتند، و این به معنی این است که بارهای به‌دست آمده توسط آب و گلوله مساوی و مخالف‌اند.



شکل ۳ــ باردار کردن الکتروستاتیکی آب و گلولهٔ پارافین غوطه‌ور در آن.

جدایی بارها و بروز لایهٔ الکتریکی دوگانه در حین تماس با هر دو جسم مختلف روی می‌دهد : نارساناها یا رساناها، جامدات، مایعات یا گازها. پس چرا همیشه برای توصیف باردار شدن از طریق مالش فقط نارساناهای خوب (کهربا، شیشه، ابریشم، کائوچو و نظایر آن) را در نظر می‌گیریم؟ در واقع، در هر نارسانا بار در ناحیه‌ای که ظاهر می‌شود باقی می‌ماند و نمی‌تواند به تمام سطح یا دیگر اجسام در تماس با آن منتقل شود. البته، یکی از اجسامی که مالش داده می‌شوند می‌تواند تکه فلزی باشد که به دستهٔ نارسانایی متصل است. ولی آزمایش‌های ما درصورتی‌که هر دو جسمی که به هم مالش داده می‌شوند فلز باشند، حتی اگر به دسته‌های نارسانایی متصل باشند، بی‌نتیجه خواهند بود. دلیل آن این است که تمام نقاط دو جسم که با هم تماس دارند را نمی‌توان در یک لحظه از یکدیگر جدا کرد. به علت ناصافی اجتناب‌ناپذیر سطوح، همیشه در لحظهٔ جدایی بعضی نقاط در تماس خواهند بود، و چون الکترون‌ها در فلز آزادانه حرکت می‌کنند، تمام الکترون‌های اضافی در آخرین لحظه از این «پل‌ها» جریان خواهند یافت، و دو قسمت از نظر الکتریکی خنثی خواهند بود. البته رساناها را می‌توان به وسیلهٔ تابش نور باردار کرد که به این موضوع در دانستنی بعدی خواهیم پرداخت.

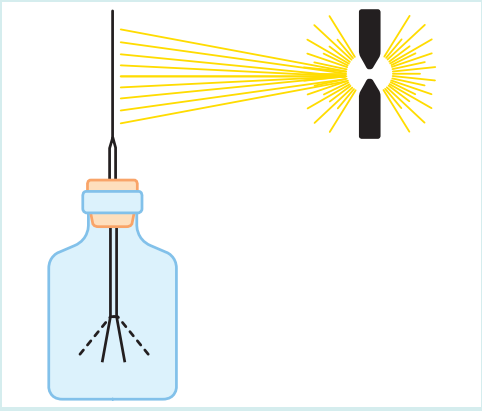
دانستنی برای معلم

باردار شدن به‌وسیلهٔ نور؛ اثر فوتوالکتریک

رساناها را می‌توان با نور باردار کرد. بر اثر نور، الکترون‌ها می‌توانند از رسانا به فضای مجاور فرار کنند، و در نتیجه، رسانا بار مثبت به‌دست می‌آورد. این پدیده اثر فوتوالکتریک نامیده می‌شود.

شکل زیر آزمایش ساده‌ای را برای مشاهدهٔ ایجاد بارهای الکتریکی در رساناها بر اثر نور شرح می‌دهد. یک صفحهٔ فلزی (ترجیحاً روی) که از اکسیدها پاک شده است روی کلاهک الکتروسکوپی که به‌طور منفی باردار شده است نصب می‌شود. اگر عایق‌بندی آن به قدر کافی خوب باشد، فزونی الکترون‌ها برای مدتی طولانی روی الکتروسکوپ محفوظ می‌ماند، و برگه‌های آن در وضعیت دور از هم، باقی می‌مانند.

حال اگر صفحهٔ روی را با لامپ پروژکتور روشن می‌کنیم، برگه‌ها فوراً فرو می‌افتند. این امر به معنی این است که صفحهٔ روی، الکترون‌های اضافی‌اش را از دست داده است. بر اثر تابش نور، صفحهٔ روی به‌طور منفی باردار می‌شود و الکترون‌های اضافی را از خود دور می‌کند؛ این الکترون‌ها از روی جدا و در محیط پیرامون پراکنده می‌شوند. حال به صفحه بار مثبت می‌دهیم و آزمایش را تکرار می‌کنیم. خواهیم دید که در این مورد نور اثری ایجاد نمی‌کند، و برگه های الکتروسکوپ منحرف‌شده باقی می‌مانند. الکترون‌های آزاد شده به علت جاذبهٔ شدید بار مثبت نمی‌توانند صفحه را ترک کنند. از طرف دیگر، بارهای مثبت توسط نور از فلز قابل کنده شدن نیستند.



آزمایشی دربارهٔ اثر فوتوالکتریک. نور صفحه‌ای را که به‌طور منفی باردار و روی الکتروسکوپی نصب شده است روشن می‌کند. بر اثر تابش نور، الکترون‌ها از صفحه به بیرون رانده می‌شوند، بار منفی الکتروسکوپ کاهش می‌یابد، و برگه‌هایش فرو می‌افتند.

این نتیجه نشان می‌دهد که شدت پیوندهای تشکیل شده توسط بارهای مثبت و منفی با فلز متفاوت‌اند. با تابش نور فقط بارهای منفی، یعنی الکترون‌ها، می‌توانند آزاد شوند.

اگر این آزمایش را با صفحه‌ای خنثی انجام دهیم، برگه‌های الکتروسکوپ معمولی از هم باز نخواهند شد. ولی اگر وسیلهٔ بسیار حساس‌تری را به‌کار گیریم، نشان می‌دهد که نور بار مثبت کوچکی بر صفحه ایجاد کرده است که خیلی سریع به مقدار بیشینه‌اش می‌رسد. توضیح اینکه چرا باردار کردن الکتروستاتیکی صفحه بر اثر نور متوقف می‌شود مشکل نیست. به محض اینکه که تعداد معینی از الکترون‌ها صفحه را ترک کنند و به این ترتیب صفحه به‌طور مثبت باردار شود، همان‌طور که در بالا ذکر شد خارج کردن بیشتر الکترون‌ها به فضای مجاور ناممکن می‌شود. در کتاب فیزیک ۳، اثر فوتوالکتریک را با تفصیل بیشتری مطالعه خواهیم کرد.

دانستنی برای معلم

وقتی دو بلور یخ خنثی با دماهای مختلف با یکدیگر برخورد می‌کنند، بلور گرم‌تر دارای بار منفی و بلور سردتر دارای مثبت می‌شود. به این مشاهدات، *مشاهدهٔ تاکاهاشی*[۱] نیز می‌گویند، ولی هنوز فرایندی که در طی آن این پدیده رخ می‌دهد درک نشده است. همچنین اگر دو سرِ یک بلور یخی خنثی در دماهای متفاوتی باشند، انتهای گرم‌تر دارای بار مثبت و انتهای سردتر دارای بار منفی می‌شود.

خاکی که توسط یک توفان وزیده می‌شود نیز عموماً در تماس با سطح زمین و سایر دانه‌های خاک، باردار می‌شود. اینکه خاک دارای بار مثبت می‌شود یا منفی به جنس خاک و زمین بستگی دارد. مواردی بوده است کسانی که درون یک قیف دیوباد[۲](توفان‌های پیچنده) گرفتار شده‌اند و جان سالم به در برده‌اند، درون آن یک روشنایی سوسو زن دیده‌اند. یک دیوباد نه تنها توسط خاکی که از زمین بلند می‌کند، بلکه توسط بارهای الکتریکی در توفان‌های تندری بزرگی که آن را به‌وجود می‌آورند نیز باردار می‌شود. بنابراین نورهایی که در یک قیف دیوباد دیده می‌شود به احتمال زیاد ناشی از تخلیهٔ بار بین ناحیه‌های باردار خاک و بقیه خاک است.

۱ــ Takahashi's Observation

۲ــ Tornado

تمرین پیشنهادی

یک قطعهٔ پلاستیکی بزرگ دارای بار خالص $-۱/۰\ \mu C$ است. الف) تعداد الکترون‌های این قطعه چه تعداد بیشتر از تعداد پروتون‌های آن است؟ ب) فرض کنید وقتی یک میلهٔ شیشه‌ای با پارچه‌ای ابریشمی مالش داده شود، بار خالص $+۱/۰\ nC$ پیدا می‌کند. اگراین میله دارای ۱/۰ مول مولکول باشد، چه کسری از مولکول‌ها، الکترون از دست داده‌اند؟

پاسخ : الف) هر الکترون بار $e-$ دارد. بنابراین تعداد الکترون‌ها چنین می‌شود :

$$N=\frac{-۱/۰\times۱۰^{-۶}\,C}{-۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,C/\text{الکترون}}=۶/۲۵\times۱۰^{۱۲}\ \text{الکترون}\approx ۶/۲\times۱۰^{۱۲}\ \text{الکترون}$$

ب) نخست تعداد یون‌های مثبت بار خالص $+۱/۰\ nC$ را با فرض اینکه هر یون بار $e+$ دارد، به دست می‌آوریم :

$$N_{\text{یون}}=\frac{۱/۰\times۱۰^{-۹}\,C}{۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,C}=۶/۲۵\times۱۰^{۹}$$

با توجه به اینکه تعداد مولکول‌های موجود در یک مول برابر با عدد آووگادرو ($۶/۰۲\times۱۰^{۲۳}$) است، بنابراین کسری از مولکول‌ها که یونیده شده‌اند برابر می‌شود با

$$\frac{N_{\text{یون}}}{۶/۰۲\times۱۰^{۲۳}}=\frac{۶/۲۵\times۱۰^{۹}}{۶/۰۲\times۱۰^{۲۵}}\approx ۱/۰\times۱۰^{-۱۴}$$

فعالیت پیشنهادی

بخشی از یک میلهٔ عایق را توسط مالش با یک پارچه باردار می‌کنیم و سپس آن بخش میله را که مالش داده نشده است به الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. الکتروسکوپ انحرافی نشان نخواهد داد. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟ اکنون با تعیین جنس میلهٔ عایق، آن را به مواد مختلفی که در سری تریبوالکتریک در بالا یا پایین آن قرار دارند مالش می‌دهیم و به الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. مشاهدات خود را توجیه کنید.

۱ــ۳ قانون کولن

در آزمایش‌های تحقیق قانون کولن و یا آزمایش‌هایی مانند فعالیت ۱ــ۱ که مبتنی بر این قانون هستند، بهتر است محیط آزمایشگاه کاملاً خشک باشد.

در فعالیت ۱ــ۱ جالب است از دانش‌آموزان بخواهید که بکوشند نی‌ها را از انتهای بالایی به هم تماس دهند. در آن صورت درخواهند یافت که نمی‌توانند آنها را بیشتر از فاصله‌ای به هم نزدیک کنند.

الکتریسیته ساکن

مثال ۱ــ۱

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

پاسخ : از رابطه ۱ــ۱ داریم :

$q = ne$

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

تمرین ۱ــ۱

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

۱ــ۳ قانون کولن

همان‌طور که می‌دانیم نیروی الکتریکی که دو جسم باردار برهم وارد می‌کنند می‌تواند جاذبه یا دافعه باشد. اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، این نیرو دافعه است (شکل ۱ــ۴). و اگر ناهمنام باشند، این نیرو جاذبه است.

شکل ۱ــ۷ گوی‌های باردار همنام یکدیگر را با نیرویی هم‌اندازه دفع کرده‌اند.

فعالیت ۱ــ۱ (کار در کلاس)

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

۵

اگرچه در این‌جا در توضیح ترازوی پیچشی کولن بارهای دوگوی که با هم برهم‌کنش می‌کنند ناهم‌نام فرض شده است، ولی همچنین ممکن است که این دو بار هم‌نام باشند و اندازه‌گیری ترازو براساس نیروی دافعهٔ دو بار انجام شود. به هر حال هر دو نوع آزمایش در کتاب‌ها و منابع آموزشی آمده است.

فیلم

در این فیلم چگونگی کار یک ترازوی پیچشی کولن را می‌بینید.

همان‌طور که در مثال ۱ــ۶ خواهیم دید، در صورتی که بار الکتریکی در یک گوی یا روی سطح آن به‌طور یکنواخت توزیع شده باشد نیز می‌توان کلّ این بار را به شکل یک بار نقطه‌ای متمرکز در مرکز گوی فرض کرد و برهم‌کنش این بار با بارهای دیگر را با استفاده از قانون کولن محاسبه کرد.

به‌علاوه در محاسبهٔ نیروی الکتروستاتیکی که دو بار ساکن غیرنقطه‌ای بر یکدیگر وارد می‌کنند نیز هنوز به هر حال مبنای محاسبه، همان قانون کولن است؛ با این توضیح که هر بار را به بی‌شمار بار نقطه‌ای ذهنی خُرد می‌کنند، برهم‌کنش بارهای نقطه‌ای دو جسم را با استفاده از قانون کولن به‌دست می‌آورند، و سپس نیروهای وارد به این بارهای نقطه‌ای ذهنی در هر جسم را به روش‌های ریاضی (حساب دیفرانسیل و انتگرال) با هم جمع می‌کنند.

می‌توان بیان ریاضی قانون کولن را به‌گونه‌ای انجام داد که اندازه و جهت نیرو، هر دو را شامل شود. اگر بخواهیم نیروی وارد به بار q_2 از طرف بار q_1 را بیابیم، بردار $\vec{r}$ را به‌صورت برداری که از مکان بار q_1 آغاز و به مکان بار q_2 ختم می‌شود درنظر می‌گیریم. نیرویی که بار q_1 به بار q_2 وارد می‌کند برابر می‌شود با،

$$\vec{F}_{12} = k\frac{q_1 q_2}{r^3}\vec{r}$$

در این رابطه، q_1 و q_2 با علامت جبری ظاهر می‌شوند.

در صورتی که بارهای نقطه‌ای q_1 و q_2 درون محیطی عایق (مثلاً نفت) قرار داشته باشند، قطبش (پلاریزه‌شدن) این محیط به‌دلیل حضور این بارها سبب می‌شود که نیروی مؤثر بر هر بار متفاوت از حالتی شود که این دو بار در خلأ قرار دارند. در چنین حالتی نیروی مؤثر بر هر بار هنوز هم از قانون کولن به‌دست می‌آید، با این توضیح که $F = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{|q_1||q_2|}{r^2}$ است و ε که ضریب گذردهی الکتریکی محیط عایق است از رابطهٔ $\varepsilon = \kappa\varepsilon_0$ به‌دست می‌آید که در آن ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و κ ثابت دی‌الکتریک محیط است.

نمادگذاری برخی کتاب‌ها در این مورد متفاوت است. مثلاً کتاب مبانی فیزیک $\vec{F}_{12}$ را به معنی نیروی وارد به بار q_1 از طرف بار q_2 در نظر گرفته است.

در مثال ۱ــ۲ توجه شود که تحلیل و بررسی خود مدل بور موردنظر نبوده و تحلیل این مدل به دانشی فراتر نیاز دارد. ولی باید توجه کرد که خود این مدل نیز مدلی نیمه‌کلاسیکی محسوب می‌شود و در واقع اختصاص مداری مشخص به الکترون ناممکن است و از این‌رو از ابر الکترونی صحبت می‌کنیم. این مدل، و به‌طور اخص این مثال، یک ساده‌سازی از واقعیت ماجرا است.

پاسخ فعالیت ۱ــ۲

طرز کار دستگاه‌های فتوکپی (و چاپگرهای لیزری) براساس برخی اصول اولیهٔ الکتریستهٔ ساکن است. یک استوانهٔ آلومینیومی که با سلنیوم اندود شده است به‌وسیلهٔ یک الکترود، باردار مثبت می‌شود. سپس استوانه در معرض تابش نوری قرار می‌گیرد که تصویری را از برگه‌ای که می‌خواهیم رونوشت آن را تهیه کنیم روی سطح استوانه ایجاد می‌کند. سلنیوم اصطلاحاً یک *رسانای نوری* (photoconductor) است؛ یعنی در نبودِ نور، نارسانا است، و در حضور نور، رسانا می‌شود. وقتی تصویر برگهٔ مورد نظر روی استوانه می‌افتد، بخش‌هایی از پوشش سلنیومی استوانه که نور می‌گیرد، رسانا می‌شود و با تماس با بدنهٔ آلومینیومی استوانه، بار مثبت خود را از دست می‌دهد. به این ترتیب، تصویر برگه به‌صورت توزیعی از بار مثبت بر سطح استوانه نقش می‌بندد. پس از این مرحله، استوانه در تماس با پودر سیاه‌رنگی (موسوم به تونر) که دارای بار منفی شده است قرار می‌گیرد. نیروی جاذبهٔ الکتریکی بین پودر باردار منفی و بخش‌هایی از استوانه که دارای بار مثبت است سبب می‌شود این پودر بر سطح استوانه بنشیند و تصویری سیاه رنگ از برگه به‌وسیلهٔ تونر بر سطح آن ایجاد شود. اکنون یک برگهٔ سفید که باردار مثبت شده است و بار مثبت آن بیشتر از بار مثبت استوانه است، روی سطح استوانه می‌پیچید و به این ترتیب جاذبهٔ الکتریکی بین پودر باردار منفی که روی سطح استوانه قرار دارد و سطح باردار مثبت کاغذ سفید، موجب انتقال تصویر از استوانه به کاغذ می‌شود. گام آخر، عبور کاغذ (که اینک پودر تونر تصویری بر سطح آن ایجاد کرده است) از میان غلتک‌های داغ است. اکنون تونر بر اثر گرما کاملاً بر سطح کاغذ «تثبیت» می‌گردد و بدین ترتیب فرایند فتوکپی به پایان می‌رسد.

در چاپگر لیزری به جای آنکه تصویر مورد نظر را به‌وسیلهٔ اسباب اپتیکی روی سطح استوانه ایجاد کنند، یک قلم لیزری، تصویر یا متن مورد نظر را که به‌صورت یک فایل در حافظه رایانه ذخیره شده است، روی سطح استوانه ایجاد می‌کند.

شکل زیر مرحله‌های ایجاد یک رونوشت در دستگاه فتوکپی را از (الف) تا (ث) نشان می‌دهد. در چاپگر لیزری، مرحلهٔ (ب) با مرحلهٔ (ث) جایگزین می‌شود.

الف) باردار کردن استوانه

ب) افتادن تصویر برگه روی استوانه

پ) تماس استوانه با تونر

ت) انتقال تصویر از تونر به کاغذ

ث) استوانهٔ چاپگر لیزری

فیلم

در این فیلم‌ها طرز کار یک دستگاه فتوکپی را می‌بینید.

منظور از چنین دانستنی‌هایی آن است که دانش‌آموزان دریابند که نیروهای الکتریکی در طبیعت کاربرد دارند و چیزهایی صرفاً انتزاعی نیستند. برای توجه دانش‌آموزان به اهمیت نیروهای الکتریکی می‌توانیم به منشأ نیروهای بین الکترون‌های هر اتم و هستهٔ آن، نیروهای پیوندی اتم‌ها در تشکیل مولکول و نیروهایی که برای تشکیل جامدها و مایع‌ها، اتم یا مولکول‌ها را به هم پیوند می‌دهند اشاره کنیم. در این زمینه مقاله‌ای با عنوان «مولکول‌ها، اتم‌ها و ساختار داخلی اتم‌ها» در شمارهٔ ۷۲ مجلهٔ رشد آموزش فیزیک وجود دارد که اطلاعات خوبی به دانش‌آموزان می‌دهد.

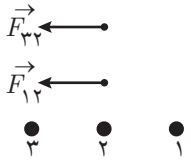
گاهی دانش‌آموزان در رسم نیروها خطا می‌کنند. خوب است تأکید شود که مبدأ بردار نیروی وارد بر ذره باید خود ذره باشد. برای تعیین نیروی خالص وارد بر یک ذرهٔ باردار معین که در احاطهٔ چند ذرهٔ باردار دیگر است، پس از مشخص کردن ذرهٔ موردنظر، بردارهای نیروی ناشی از ذرات دیگر را باید طوری رسم کرد که ابتدا (و نه انتهای) هر کدام از این نیروها، بر روی ذرهٔ موردنظر باشد.

وقتی بزرگی نیروی الکتریکی بین دو ذره را بررسی می‌کنیم مهم نیست بپرسیم نیرویی که کدام‌یک بر دیگری وارد کرده مورد محاسبه قرار گرفته است، زیرا این دو نیرو هم اندازه‌اند. اما وقتی تعداد بارها زیاد شود، بزرگی نیروی برایند وارد بر هر یک می‌تواند با بقیه متفاوت باشد.

پاسخ پرسش ۱ــ۲

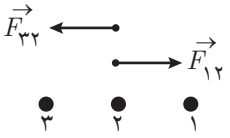
در تعیین نیروی خالص (برایند) توجه کنید که پس از مشخص کردن ذرهٔ موردنظر، نیروی ناشی از ذرات دیگر بر آن را طوری رسم می‌کنیم که **ابتدای** هر کدام از نیروها روی ذرهٔ موردنظر باشد. برای اینکه نیروها را مشخص کنیم، بارها را به ترتیب از سمت راست با عددهای ۲،۱ و ۳ مشخص می‌کنیم.

الف) با رسم نیروها درمی‌یابیم که دو نیرو به سمت چپ بر بار میانی وارد می‌شود :



بنابراین برایند نیروی وارد بر ذرهٔ میانی، رو به سمت چپ (در جهت $-\vec{i}$) می‌شود.

ب) در این وضعیت، بار ذرهٔ ۱ منفی است. اکنون نیرویی که بار شمارهٔ ۱ بر بار میانی وارد می‌کند در خلاف جهت وضعیت الف است و بنابراین سوی نیروهای $\vec{F}_{۳۲}$ و $\vec{F}_{۱۲}$ برخلاف جهت هم می‌شود :



ولی توجه کنید که چون فاصلهٔ ذرهٔ میانی از ذره‌های کناری برابر و بزرگی بارها نیز یکسان است، بنابراین نیروهای وارد بر بار میانی، همدیگر را خنثی می‌کنند.

برای اطمینان از مهارت‌یابی دانش‌آموزان در حل این مثال‌ها، می‌توانیم مسئله‌های مشابهی را به‌عنوان فعالیت کلاسی طرح کنیم تا دانش‌آموزان مهارت لازم را بیابند.

پاسخ تمرین ۱ــ۲

نیروی وارد بر بار $q_۲$، برایند دو نیرویی است که از طرف بارهای $q_۱$ و $q_۳$ بر آن وارد می‌شوند. برای محاسبهٔ این نیرو، نیرویی را که هر یک از بارهای $q_۱$ و $q_۳$ در غیاب دیگری بر بار $q_۲$ وارد می‌کند، محاسبه می‌کنیم.

فاصلهٔ بین بارهای $q_۱$ و $q_۲$ را با $r_{۱۲}$ و فاصلهٔ بین بارهای $q_۲$ و $q_۳$ را با $r_{۳۲}$ نشان می‌دهیم. با استفاده از رابطهٔ **۲ــ۱** داریم :

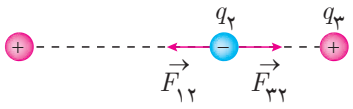
$$F_{۱۲} = k\frac{|q_۱||q_۲|}{r_{۱۲}^۲}$$

$$= (۹/۰\times۱۰^۹\,\mathrm{N.\frac{m^۲}{C^۲}})\frac{(۲/۵\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{C})(۱/۰\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{C})}{(۴/۰\,\mathrm{m})^۲} = ۱/۴\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{N}$$

$$F_{۳۲} = k\frac{|q_۳||q_۲|}{r_{۳۲}^۲}$$

$$= (۹/۰\times۱۰^۹\,\mathrm{N.\frac{m^۲}{C^۲}})\frac{(۴/۰۱\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{C})(۱/۰\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{C})}{(۲/۰\,\mathrm{m})^۲} = ۹/۰\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{N}$$

نیروی که بار $q_۱$ بر بار $q_۲$ وارد می‌کند و نیز نیرویی که بار $q_۳$ بر $q_۲$ وارد می‌کند، از نوع ربایشی (جاذبه) است.



مطابق شکل، این دو نیرو برخلاف جهت یکدیگرند و برایند آنها برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{۱۲} + \vec{F}_{۱۲} = F_{۱۲}(-\vec{i}) + F_{۳۲}(+\vec{i}) = (F_{۳۲} - F_{۱۲})\,\vec{i}$$

بنابراین، بزرگی $\vec{F}_T$ برابر تفاضل بزرگی آنها است :

$$F_T = F_{۳۲} - F_{۱۲} = ۹/۰\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{N} - ۱/۴\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{N}$$

$$= ۷/۶\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{N}$$

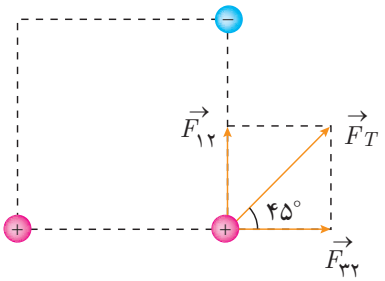
در واقع، بزرگی نیروی $\vec{F}_T$ برابر $۷/۶\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{N}$ و جهت آن در سوی مثبت محور x است :

$$\vec{F}_T = (۷/۶\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{N})\,\vec{i}$$

پاسخ پرسش ۱ــ۳

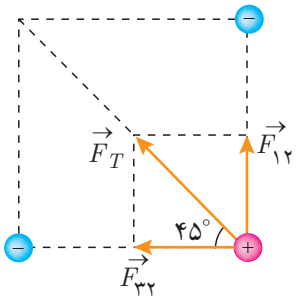
همان‌طور که گفتیم برای تعیین نیروی برایند، نخست باید ذرهٔ موردنظر را انتخاب کنیم و بردارهای نیرو را طوری رسم کنیم که ابتدای آنها بر ذرهٔ موردنظر باشد.

الف) اگر بارها را شماره‌گذاری کنیم داریم :



که در آن $F_{۱۲}=F_{۳۲}$. بنابراین $\vec{F}_T$ با جهت $+\vec{i}$ زاویهٔ ۴۵° می‌سازد.

ب) اکنون علامت بار شمارهٔ ۳ منفی است و بنابراین سوی نیروی $\vec{F}_{۳۲}$ بر می‌گردد و شکلی مانند زیر داریم :

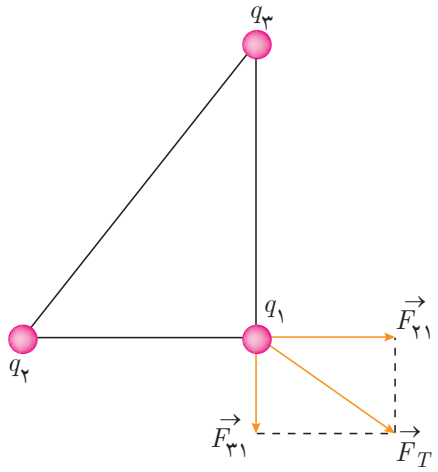


که در آن $F_{۱۲}=F_{۳۲}$. بنابراین اکنون $\vec{F}_T$ با جهت $+\vec{i}$ زاویهٔ ۱۳۵° می‌سازد.

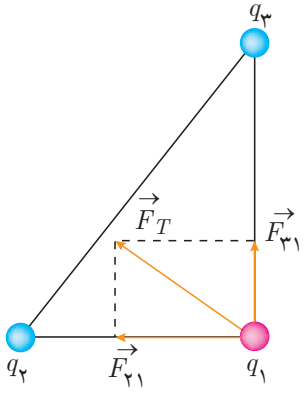
در ابتدای این مبحث برای ایجاد انگیزه می‌توان دانش‌آموزان را دوباره به فعالیت ۱ــ۲ ارجاع داد و پرسید چگونه جاذبهٔ الکتریکی بین تونر و بخشی از استوانه که دارای بار مثبت است موجب نشستن تونر بر سطح استوانه می‌شود. همچنین می‌توانیم پیش از آن، اشاره به تعریف میدان در حالت کلی (و نیز دانستنی مربوط به آن) کنیم و سپس با بیان مثال‌های آشنایی مانند نیرویی که دو آهنربا بر هم دارد می‌کنند یا جاذبهٔ نیروی زمین، به این واسطهٔ اعمال نیرو اشاره کنیم و آنگاه به بیان مفهوم میدان الکتریکی بپردازیم.

پاسخ تمرین ۱ـ۳

الف) اگر علامت بار q_3 مثبت شود، سوی نیروی $\vec{F}_{31}$ وارونه می‌شود و تصویری مانند زیر خواهیم داشت :



ب) اگر علامت بار q_2 منفی شود، سوی نیروی $\vec{F}_{21}$ وارونه می‌شود و تصویری مانند زیر خواهیم داشت :



پ) خیر. زیرا اندازهٔ نیروی برایند برابر است با

$$F_T = \sqrt{F_{21}^2 + F_{31}^2}$$

که با توجه به اینکه مقدار F_{21} و F_{31} تغییری نمی‌کنند، بزرگی نیروی برایند هم تغییر نمی‌کند.

دانستنی برای معلم

منشأ تفکر $F_e \alpha \frac{1}{r^2}$

نخستین سرنخ دربارهٔ سرشت «قانون کولن» به‌صورت غیرمستقیم به دست آمده است. در حدود سال ۱۷۷۵ میلادی *بنیامین فرانکلین* دریافت که اگر چوب پنبه‌ای کوچک در نزدیک قوطی فلزی بارداری خارج از قوطی آویزان باشد، به‌شدت جذب آن می‌شود. اما وقتی که به‌وسیلهٔ ریسمان در داخل قوطی آویزان شود، چوب پنبه در هر جایی داخل قوطی باشد، نیرویی بر آن وارد نخواهد شد. فرانکلین نفهمید که چرا دیواره‌های قوطی چوب پنبه را هنگامی که داخل قوطی است نمی‌رباند، ولی وقتی که خارج قوطی است می‌رباند.

جوزف پریستلی دانشمند انگلیسی نتیجه‌های فرانکلین را بررسی کرد و از آنها به نتیجه‌ای درخشان دست یافت. او به یاد آورد که بنا بر آنچه در کتاب «اصول نیوتون» مطرح شده است، نیروهای گرانشی نیز به همین ترتیب رفتار می‌کنند. در داخل سیاره‌ای تو خالی، نیروی گرانشی مؤثر بر یک جسم (مجموع همهٔ نیروهایی که از همهٔ اجزای سیاره وارد می‌شوند) دقیقاً صفر خواهد بود. همین طور می‌توان این نتیجه را به‌طور ریاضی از قانونی به دست آورد که براساس آن نیروی گرانشی بین هر دو جرم منفرد با مجذور فاصلهٔ بین آنها نسبت عکس دارد.

بنابراین پریستلی بیان کرد که نیروهایی که بارها به هم وارد می‌کنند درست مانند نیروهای میان دو جرم منفرد با مجذور فاصلهٔ آنها نسبت عکس دارد. درست همان‌طور که نیروی میان اجسام جرم‌دار نیروی «گرانشی» نامیده شده، نیروی میان دو جسم باردار نیز نیروی «الکتریکی» می‌نامند.

پیشنهاد پریستلی مبتنی بر استدلال از راه قیاس بود. این استدلال به تنهایی نمی‌توانست ثابت کند که نیروهای الکتریکی با عکس مجذور فاصله‌ی میان بارها متناسب‌اند، اما فیزیکدانان دیگر را تشویق کرد که فرضیهٔ پریستلی را با آزمایش بررسی کنند.

مقدار ثابت در قانون کولن

اگر بتوان دو کره را باردار کرد و آنها را بین دو صفحهٔ باردار قرار داد و بارهای q_1 و q_2 را اندازه گرفت می‌توان با ثابت نگه داشتن یک کره و متصل کردن کرهٔ دیگر به یک ترازوی فنری نیروی بین آنها را در فاصلهٔ ثابت r اندازه گرفت و عدد k را محاسبه کرد.

اما برای انجام این کار یک اشکال فنی وجود دارد. نیروهای بین دو کرهٔ کوچک که در آزمایش مربوط به اندازه‌گیری بار آنها استفاده کردیم، بسیار کوچک‌تر از آن هستند که بتوان آنها را اندازه گرفت. این کره‌ها بار کافی را بر روی خود نگه نمی‌دارند. کره‌های بزرگ‌تر هم نمی‌توانند بین دو صفحه بیش از چند میلی‌متر از هم فاصله بگیرند.

برای قابل اجرا شدن آزمایش، باید فاصلهٔ صفحه‌ها و نیز اختلاف پتانسیل اعمال شده به صفحه‌ها را بزرگ کرد طوری که نسبت اختلاف پتانسیل به فاصلهٔ صفحه‌ها ثابت بماند. اگر کره‌ها را بزرگ کنیم، باید بار آنها نیز بیشتر باشد.

$$F' = q' E$$

$$\frac{F'}{F} = \frac{q'E}{qE} = \frac{q'}{q} \Rightarrow q' = q\frac{F'}{F}$$

در آزمایش با کره‌های بسیار کوچک، وقتی کره در میدان به حالت سکون درمی‌آمد، فاصلهٔ صفحه‌ها از هم $3/1 \times 10^{-3}\,m$ و اختلاف پتانسیل اعمال شده ۲۷۰ ولت بود و نیروی وارد بر کره $2/8 \times 10^{-14}\,N$ به‌دست آمد و معلوم شد هر کره دارای ۲ بار بنیادی بوده است.

اگر یک کرهٔ فلزی با قطر چند سانتی‌متر را باردار کنیم و به کره‌ای کاملاً مشابه خودش تماس دهیم تا هر دو بار یکسان داشته باشند، با استفاده از ترازوی فنری، نیروی بین دو کره وقتی از هم ۰/۱۵m فاصله دارند، $۶/۷\times۱۰^{-۴}\,N$ اندازه‌گیری می‌شود. سپس یکی از کره‌ها را در میدان یکنواختی به اندازهٔ میدان مربوط به کره‌های کوچک قرار داده و نیروی وارد بر آن را $۳/۵۵\times۱۰^{-۳}\,N$ به‌دست آوردند. آنگاه بار هر کرهٔ فلزی بزرگ چنین به‌دست می‌آید :

$$q' = q\frac{F'}{F} = ۲e\frac{۳/۵۵\times۱۰^{-۳}\,N}{۲/۸\times۱۰^{-۱۴}\,N} = ۲/۵\times۱۰^{۱۱}e$$

و با معلوم بودن فاصلهٔ کره‌ها از هم و نیروی برهم‌کنش آنها، مقدار k محاسبه می‌شود :

$$۶/۷\times۱۰^{-۴}\,N = \frac{k(۲/۵\times۱۰^{۱۱}e)^۲}{(۰/۱۵\,m)^۲} \Rightarrow ke^۲ = ۲/۴\times۱۰^{-۲۸}\,N.m^۲$$

دقیقترین مقدار $ke^۲$ براساس آزمایش‌های متعدد $۲/۳۰۶\times۱۰^{-۲۸}\,N.m^۲$ به دست آمده است.

پرسش‌های پیشنهادی

۱ دو کرهٔ کاملاً مشابه و کوچک A و B روی سطح بدون اصطکاکی به فاصلهٔ r از هم قرار گرفته‌اند. کرهٔ A دارای بار خالص q و کرهٔ B دارای بار خالص $۴q$ است. کره‌ها در لحظهٔ یکسانی رها می‌شوند و از هم فاصله می‌گیرند. بزرگی شتاب آنها چگونه است؟

پاسخ : طبق قانون سوم نیوتون بزرگی نیروی وارد به هر دو کره یکسان است و چون کره‌ها جرم برابری دارند، شتاب آنها نیز یکسان خواهد بود. اما طبق قانون کولن، نیرو با عکس مجذور فاصله رابطه دارد. بنابراین، با فاصله گرفتن کره‌ها از هم، شتاب آنها مدام کاهش می‌یابد.

۲ دو کرهٔ رسانای بزرگ به شعاع $R = ۵/۰\,cm$ به فاصلهٔ $۳۰\,cm$ از هم قرار دارند. بزرگی بار روی کرهٔ اول $۲/۰\,\mu C$ و روی کرهٔ دوم $۵/۰\,\mu C$ است. کدام گزینه در مورد اندازه نیروی الکتریکی وارد بر هر کره توسط کره دیگر درست است و چرا؟

الف) ۱ N ب) بیشتر از ۱ N پ) کمتر از ۱ N

پاسخ : پ درست است. توجه کنید چون کره‌ها بزرگ‌اند، بار روی سطح آنها پخش می‌شود و هر نقطه از یک کره با تمام نقاط باردار کرهٔ دیگر برهم‌کنش خواهد داشت و بر اثر دافعهٔ الکتریکی بین بارها، توزیع یکنواخت بار روی کره‌های فلزی به هم می‌خورد. در این حالت دیگر نمی‌توان با کره‌ها مانند بار نقطه‌ای رفتار کرد، چرا که نه بسیار کوچک‌اند و نه فاصلهٔ آنها نسبت به شعاع‌شان چنان بزرگ است که بتوان آنها را نقطه‌ای فرض کرد. در وضعیت این پرسش، در هر حال فاصلهٔ بارها بیشتر از عدد داده شده است و بنابراین نیرویی که کره‌ها به هم وارد می‌کنند کمتر از ۱ N می‌شود.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ بزرگی نیروی الکتروستاتیکی میان دو یون مشابه که به فاصلهٔ $۵/۰ \times ۱۰^{-۱۰}\ m$ از هم قرار گرفته‌اند برابر $۳/۷ \times ۱۰^{-۹}\ N$ است. الف) بار هر یون چقدر است؟ ب) هر یون، چند الکترون از دست داده است؟

پاسخ :

الف) از قانون کولن داریم

$$F = \frac{kq^۲}{r^۲}$$

و در نتیجه :

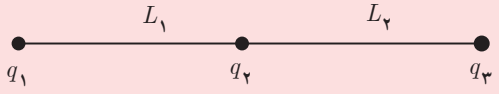
$$q = r\sqrt{\frac{F}{k}} = (۵/۰ \times ۱۰^{-۱۰}\ m)\sqrt{\frac{۳/۷ \times ۱۰^{-۹}\ N}{۹/۰ \times ۱۰^{۹}\ N.m^۲/C^۲}}$$

$$= ۳/۲ \times ۱۰^{-۱۹} C$$

ب) N در واقع تعداد الکترون‌هایی است که هر یون فاقد آن است :

$$N = \frac{q}{e} = \frac{۳/۲ \times ۱۰^{-۱۹} C}{۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹} C} = ۲/۰$$

۲ در شکل زیر، سه ذرهٔ باردار روی محور x قرار دارند. ذره‌های ۱ و ۲ در جای خود ثابت شده‌اند، ولی ذرهٔ ۳ می‌تواند آزادانه حرکت کند. نیروی الکتروستاتیکی خالص وارد بر این ذره در جایی برابر صفر می‌شود. با فرض اینکه در این مکان فاصله‌های $L_۱$ و $L_۲$ برابر باشد، نسبت $q_۱/q_۲$ چقدر است؟



پاسخ : ۴-

فعالیت‌های پیشنهادی

۱ ورقه‌ای آلومینیومی به ابعاد ۴ cm × ۳ cm را مچاله کنید و به صورت یک کرهٔ کوچک درآورید و سپس آن را به کمک یک تکه نخ خشک آویزان کنید. آونگ را توسط مولّد وان‌دوگراف باردار کنید. سپس گویی باردار با بار مشابه را به آونگ نزدیک کنید. گوی را در فاصلهٔ معینی از آونگ نگه دارید و زاویهٔ انحراف آونگ از وضعیت قائم را توسط یک نقاله که به دیوار نصب شده است اندازه بگیرید. این کار را در فاصله‌های معین دیگری نیز انجام دهید و زاویهٔ انحراف از امتداد قائم را یادداشت کنید. با انجام این فعالیت، می‌توان وارون بودن نیرو با مجذور فاصله را تحقیق کرد.

۲ دو گوی کوچک فلزی باردار مشابه را که روی پایه‌های عایقی سوارند، اختیار کنید. یکی از آنها را به طور قائم بر روی ترازوی دیجیتال قرار دهید و ترازو را روی صفر تنظیم کنید. خط کش را مطابق شکل کنار ترازو قرار دهید. اکنون گلولهٔ دوم را به آرامی از بالا به گلولهٔ روی ترازو نزدیک کنید و در فاصله‌های مختلف، نیرو را اندازه‌گیری و یادداشت کنید. از این فعالیت به چه نتیجه‌ای می‌رسید؟

اگر بر روی این مثال کمی بیشتر از انجام محاسبات و عملیات ریاضی وقت بگذاریم، می‌تواند زمینه‌ای برای ورود به بحث برهم نهی میدان‌های الکتریکی باشد. دراینجا بار آزمون تحت تأثیر نیرویی برایند قرار گرفته است و بنابراین این مثال می‌تواند گشایشی در مورد بحث بر هم نهی میدان‌ها نیز باشد.

دانستنی برای معلم

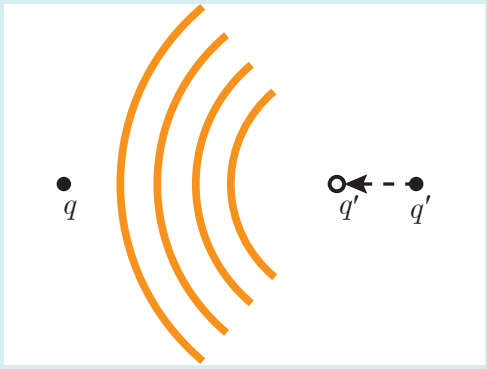
اندیشهٔ وجود میدان

اندیشهٔ وجود میدان نخستین بار در میانهٔ قرن هجدهم میلادی توسط *لئونارد اولر* (۱۷۸۳ــ۱۷۰۷ م.) ریاضیدان و فیزیکدان سوئیسی برای شاره‌ها ابداع شد. در واقع میدان‌های مختلف بسیاری وجود دارند که در علوم و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مثلاً میدان دما در یک تالار، توزیع دماهایی است که از اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف تالار به دست می‌آید.

به همین ترتیب می‌توان میدان فشار را در یک استخر شنا یا جوّ اطراف زمین تعریف کرد. اینها نمونه‌هایی از میدان‌های نرده‌ای هستند، زیرا دما و فشار کمیت‌هایی نرده‌ای‌اند که فقط بزرگی دارند و فاقد جهت هستند، در حالی که میدان الکتریکی مربوط به نیرو است که هم بزرگی و هم جهت دارد.

تعبیر میدان الکتریکی

مطابق تعبیر سادهٔ کنش از دور قانون کولن، بار q' نیروی مستقیمی بر بار q وارد می‌آورد، اگرچه این بارها به فاصلهٔ زیادی از هم واقع و تماسی نداشته باشند. اما، این تعبیرِ کنش از دور میدان الکتریکی در مورد بارهای متحرک با مشکلات جدی مواجه می‌شود. فرض کنید بار q' را ناگهان به بار q نزدیک‌تر کنیم؛ در این صورت نیروی الکتریکی باید افزایش یابد. اما این افزایش بی‌درنگ رخ نمی‌دهد؛ این افزایش را می‌توان سیگنالی از q' به q تلقی کرد، و یکی از اصول بنیادی فیزیک، براساس نظریهٔ نسبیت، این است که هیچ سیگنالی نمی‌تواند با سرعتی بیش از سرعت نور منتشر شود. پس نتیجه می‌گیریم، وقتی مانند شکل، ناگهان بار q' را حرکت می‌دهیم، نوعی آشفتگی از q' به سمت q در فضا منتشر می‌شود و نیروی الکتریکی را با مقدار افزودهٔ جدید تنظیم می‌کند. بدین‌سان، بارها با تولید آشفتگی‌هایی در فضای پیرامونشان، بر یکدیگر نیرو وارد می‌آورند. این آشفتگی‌ها را میدان الکتریکی می‌گویند.



یک آشفتگی از بار q' سرچشمه می‌گیرد و به بار q می‌رسد.

میدان، انرژی و تکانه دارد و بنابراین به معنای مادی وجود دارد. در این صورت با توجه به مثال بالا، به آسانی پی می‌بریم که چرا آشفتگی، یا میدان، که بر اثر جابه‌جایی ناگهانی q' ایجاد شد، باید تکانه داشته باشد : وقتی q' را ناگهان به سوی q حرکت می‌دهیم، نیروی وارد بر q' بنا بر قانون کولن فوراً افزایش می‌یابد، اما افزایش نیروی وارد بر q با تأخیر روی می‌دهد تا سیگنال انتشار یافته از q' فرصت داشته باشد اطلاعات مربوط به تغییر موضع q را منتقل می‌کند. بدین‌سان، موازنهٔ کنش و واکنش موقتاً از بین می‌رود. هرگونه عدم تعادل کنش و واکنش ایجاب می‌کند که تکانهٔ سامانه، متشکل از دو ذرهٔ باردار ما، پایسته نماند. بنابراین برای حفظ پایستگی تکانهٔ کل، تکانهٔ گم‌شدهٔ ذرات q و q' باید به میدان منتقل شود، یعنی میدان باید تکانه کسب کند.

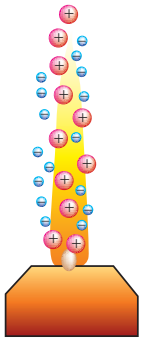
هرچند استدلال بالا برای وجود میدان‌ها مبتنی بر بارهای متحرک است، ولی این تعبیر را می‌پذیریم که هر بار ساکن در فضای پیرامون خود یک آشفتگی ایستا، و دائمی ایجاد می‌کند، و این آشفتگی در تماس با بارهای دیگر نیروهایی بر آنها وارد می‌آورد. پس، این دیدگاه را اختیار می‌کنیم که بر هم کنش بین بارها کنش از طریق تماس است؛ تغییر q' میدانی الکتریکی ایجاد می‌کند که در فضای پیرامون خود نفوذ می‌کند و بر بار دیگری که با آن تماس پیدا کند، نیرو وارد می‌آورد. مطابق این طرح، میدان الکتریکی به منزلهٔ واسطه یا میانجی نیروها عمل می‌کند :

$$\text{نیروی وارد بر بار } q \longrightarrow \text{میدان الکتریکی بار } q' \longrightarrow \text{بار } q'$$

در این فیلم، نمایشی برای تفهیم وجود میدان را می‌بینید.

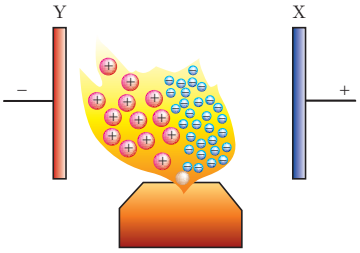
فیلم

در مورد مشاهدهٔ تجربی مثال ۱ــ۶ به چند مورد توجه شود. نخست اینکه در اینجا بدیهی است که باد یونی نقشی در انحراف شعله ندارد، زیرا کلاهک کروی است و اتصال نوک تیزی هم نداریم. دیگر آنکه در اینجا صرفاً تأکیدی بر چگونگی مشاهدهٔ تجربی این مثال بوده است و تأثیری که میدان الکتریکی می‌گذارد. اینکه شعلهٔ شمع در چه جهتی کشیده می‌شود، موضوعی جداگانه است که موردنظر این مثال نبوده است. اما در هر حال، برای خوانندگان ریزبین‌تر می‌توان مباحثی از این دست نیز مطرح کرد. در آن صورت باید اشاره کرد که حرارت شعلهٔ شمع الکترون‌ها را از مولکول‌های هوای اطراف شعله می‌کَنَد و بدین ترتیب مولکول‌ها یونیده می‌شوند. در نتیجه، شعله در احاطهٔ تعداد زیادی یون‌های مثبت و منفی قرار دارد (شکل ۱).



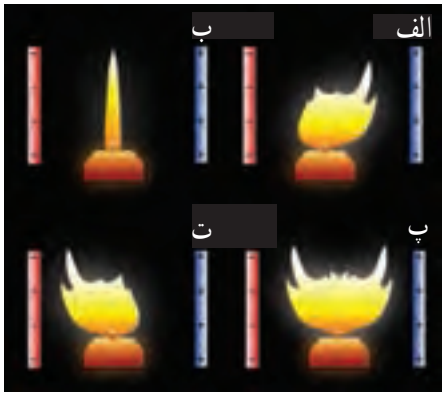
شکل ۱

حال اگر این شمع میان دو صفحهٔ متصل به اختلاف پتانسیل بالا قرار گیرد، یون‌های مثبت به سمت صفحهٔ منفی و یون‌های منفی به سمت صفحهٔ مثبت کشیده می‌شوند. اما این پخش شدن به‌طور یکنواخت نیست. این به‌دلیل آن است که یون‌های مثبت بزرگ‌تر از یون‌های منفی هستند و بنابراین شکلی مانند شکل ۲ خواهیم داشت.



شکل ۲

اکنون می‌توان مثال‌هایی از این دست را نیز مطرح کرد که مثلاً کدام‌یک از شکل‌های زیر نمایشی درست‌تر از شعلهٔ شمع در میدان الکتریکی را نشان می‌دهند؟



شکل ۳

در این فیلم چگونگی آزمایش مثال ۱ــ۶ و انحراف شعله در میدان الکتریکی را می‌بینید.

فیلم

پاسخ تمرین ۱ـ۴

الف) بار پروتون $q=+e=۱/۶۰×۱۰^{-۱۹}\mathrm{C}$ است. بنابراین داریم :

$$E_p = k\frac{|q|}{r^۲} = (۹/۰×۱۰^{۹}\,\mathrm{N}.\frac{\mathrm{m}^۲}{\mathrm{C}^۲})\frac{(۱/۶۰×۱۰^{-۱۹}\mathrm{C})}{(۵/۳×۱۰^{-۱۱}\mathrm{m})^۲} = ۵/۱۳×۱۰^{۱۱}\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} \approx ۵/۱×۱۰^{۱۱}\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

خوب است این میدان را با میدان‌های داده شده در جدول **۱ـ۲** کتاب مقایسه کنید تا به بزرگی آن پی ببرید. بزرگ‌ترین میدان داده‌شده مربوط به فرو ریزش الکتریکی در هواست که مرتبهٔ بزرگی آن $۱۰^{۵}$ بار کوچک‌تر از این پاسخ است.

ب) همان‌طور که در مثال پیش دیدیم، میدان الکتریکی حاصل از مولّد وان دو گراف در فاصلهٔ $۱/۰\,\mathrm{m}$ از مرکز کلاهک برابر است با

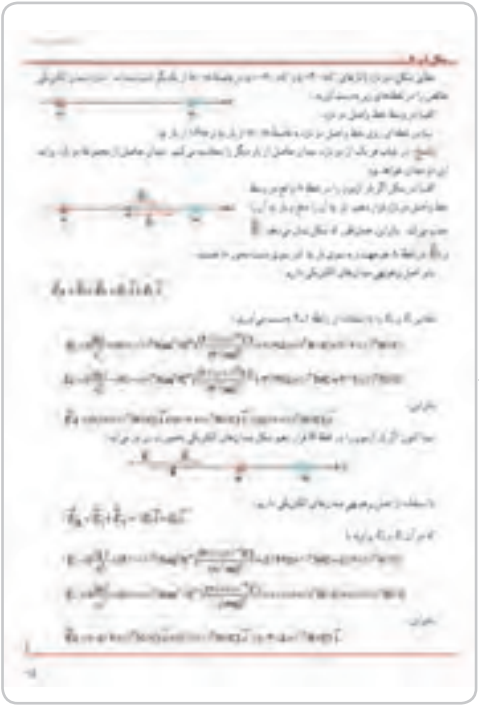
$$E_v = k\frac{|q|}{r^۲} = (۹/۰×۱۰^{۹}\,\mathrm{N.m}^۲/\mathrm{C}^۲)\frac{(۱/۰×۱۰^{-۶}\mathrm{C})}{(۱/۰\,\mathrm{m})^۲} = ۹/۰×۱۰^{۳}\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

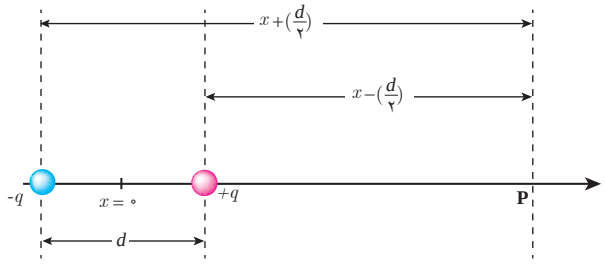
این را باید با میدان حاصل از پروتون در فاصلهٔ نامشخص r برابر قرار دهیم و از آنجا r را پیدا کنیم :

$$E_p = k\frac{|q|}{r^۲} = (۹/۰×۱۰^{۹}\,\mathrm{N.m}^۲/\mathrm{C}^۲)\frac{(۱/۶۰×۱۰^{-۱۹}\mathrm{C})}{r^۲} = ۹/۰×۱۰^{۳}\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

و از آنجا که $r=۴/۰×۱۰^{-۷}\mathrm{m}$ می‌شود. توجه کنید مرتبهٔ بزرگی این فاصله، $۱۰^{۴}$ بار بزرگ‌تر از مرتبهٔ بزرگی شعاع اتم هیدروژن در مدل بور است. بنابراین پاسخ ب نیز مانند پاسخ الف نشان دهندهٔ بزرگی بسیار زیاد میدان هستهٔ اتم در محل الکترون‌های اتم است.

در مورد برهم نهی میدان‌های الکتریکی نیز خوب است به همان ظرایفی که در برهم نهی نیروهای الکتریکی بیان شد اشاره کرد.

برای اطمینان از مهارت‌یابی دانش‌آموزان در حل این مثال‌ها، می‌توانیم مسئله‌های مشابهی را به‌عنوان فعالیت کلاسی طرح کنیم.

در تکمیل این موضوع خوب است بدانید می‌توان برای دانش‌آموزان مستعدتر، چگونگی محاسبهٔ میدان الکتریکی حاصل از این دوقطبی در نقطه‌ای دلخواه مانند P را نیز توضیح داد (به‌خصوص آنکه در تمرین ۱ــ۵ با نمونه‌ای از آن آشنا می‌شوند). به این منظور، مانند شکل زیر، $x=0$ را بر مرکز دو قطبی اختیار کنید. برای میدان الکتریکی برایند در نقطهٔ P خواهیم داشت :



$$\vec{E}=\vec{E}_{+}+\vec{E}_{-}=E_{+}\,\vec{i}-E_{-}\,\vec{i}$$

که در آن $\vec{E}_{+}$ میدان الکتریکی ناشی از بار مثبت و $\vec{E}_{-}$ میدان الکتریکی ناشی از بار منفی است. با توجه به رابطهٔ ۱ــ۴ خواهیم داشت

$$\vec{E}=k\frac{q}{r_1^2}\vec{i}-k\frac{q}{r_2^2}\vec{i}$$

که در آن r_1 و r_2 به ترتیب فاصلهٔ نقطهٔ P از بارهای مثبت و منفی است. بنابراین داریم

$$\vec{E}=\left[k\frac{2e}{(x-d/2)^2}-k\frac{2e}{(x+d/2)^2}\right]\vec{i}$$

که d با استفاده از مثلث نشان داده شده در شکل برابر $d=\Delta r\cos\theta/2$ است. اکنون با داشتن θ، Δr و x می‌توانیم $\vec{E}$ را محاسبه کنیم. مثلاً به ازای $x=3/0\times10^{-1}$ m به میدانی در حدود 3×10^{10} N/C در جهت $\vec{i}$ می‌رسیم.

پاسخ تمرین ۱ــ۵

در نقطهٔ O، میدان الکتریکی حاصل از هر دو بار با هم جمع می‌شود و جهت آن رو به سمت چپ خواهد بود. یعنی اگر بار آزمون را در نقطه O قرار دهیم، نیروهای وارد بر آن ناشی از بارهای q_1 و q_2 به سمت چپ خواهد بود و بنابراین میدان الکتریکی خالص در جهت $-\vec{i}$ است. چون بزرگی بارها یکسان و فاصلهٔ آنها تا نقطه O برابر است، بزرگی میدان‌ها با هم برابر است. بنابراین اندازهٔ میدان کل، دو برابر اندازهٔ هر یک از میدان‌ها است :

$$E_o = ۲E = ۲k\frac{|q|}{r^۲} = ۲(۹/۰\times۱۰^۹\,\mathrm{N.\frac{m^۲}{C^۲}})\frac{(۲/۰\times۱۰^{-۹}\mathrm{C})}{(۳/۰\times۱۰^{-۲}\mathrm{m})^۲} = ۴/۰\times۱۰^۴\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

در نتیجه $\vec{E_o} = (-۴/۰\times۱۰^۴\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}})\,\vec{i}$ می‌شود.

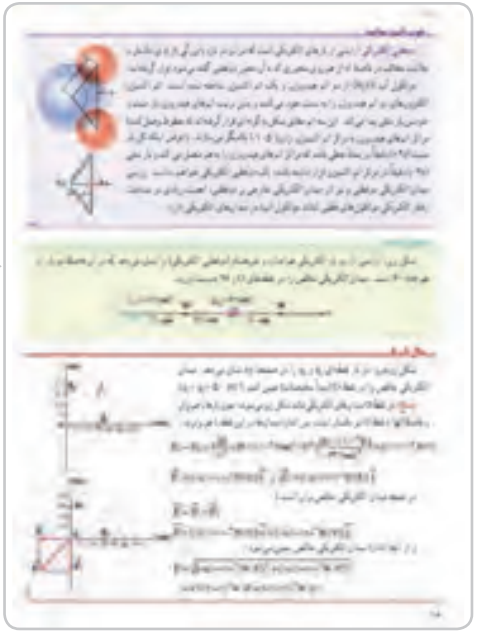
حال اگر بار آزمون را در نقطه M قرار دهیم، دو نیرو بر آن اثر می‌کند که برخلاف جهت هم هستند، زیرا اندازهٔ بارها برابر ولی فاصلهٔ بار مثبت از نقطه M کوچک‌تر است. نتیجه می‌گیریم که جهت میدان الکتریکی در سوی مثبت محور $x(+\vec{i})$ می‌شود.

$$E_M = k\frac{|q|}{r_۱^۲} - k\frac{|q|}{r_۲^۲} = k|q|(\frac{۱}{r_۱^۲} - \frac{۱}{r_۲^۲})$$

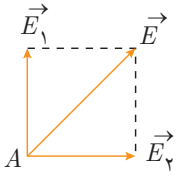
$$= (۹/۰\times۱۰^۹\,\mathrm{N.\frac{m^۲}{C^۲}})(۲/۰\times۱۰^{-۹}\mathrm{C})(\frac{۱}{(۳/۰\times۱۰^{-۲}\mathrm{m})^۲} - \frac{۱}{(۹/۰\times۱۰^{-۲}\mathrm{m})^۲})$$

$$= ۱۷/۷۸۴\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} \approx ۱/۸\times۱۰^۴\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

در نتیجه :

$$\vec{E_M} = (۱/۸\times۱۰^۴\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}})\,\vec{i}$$

پاسخ تمرین ۱ــ۶

با گذشتن بار آزمون در نقطهٔ A، جهت میدان برایند در این نقطه را تعیین می‌کنیم.



$$\vec{E} = E_2\,\vec{i} + E_1\,\vec{j} = (۵/۰\times۱۰^{۳}\,\frac{N}{C})\,\vec{i} + (۵/۰\times۱۰^{۳}\,\frac{N}{C})\,\vec{j}$$

و در نتیجه :

$$E = \sqrt{E_2^{۲} + E_1^{۲}} = ۷/۱\times۱۰^{۳}\,\frac{N}{C}$$

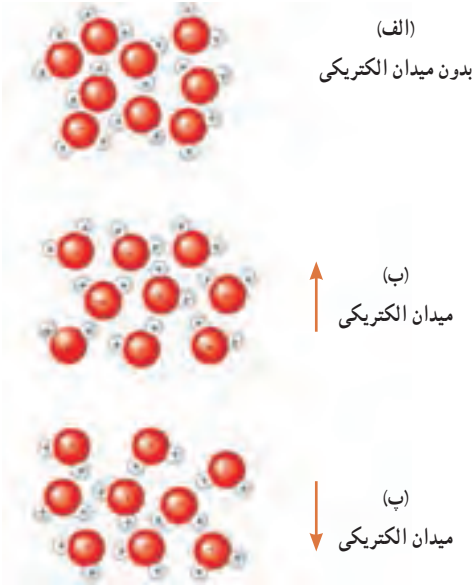
البته این نتیجه را می‌توانستیم براساس تقارن مسئله، با استفاده از پاسخ مثال ۱ــ۸ نیز به‌راحتی دریابیم.

دانستنی برای معلم

اجاق میکروموج

غذایی می‌تواند در اجاق میکروموج گرم و پخته شود که حاوی آب باشد، زیرا مولکول‌های آب دوقطبی الکتریکی‌اند. وقتی اجاق میکروموج را روشن می‌کنید، چشمهٔ میکروموج یک میدان الکتریکی نوسانی سریع را هم در داخل اجاق و هم در داخل غذا ایجاد می‌کند. این میدان الکتریکی بر دوقطبی‌های الکتریکی، گشتاور نیرویی وارد می‌کند و می‌کوشد آنها را مانند شکل همسو با میدان الکتریکی کند. انرژی از میدان الکتریکی به انرژی گرمایی آب (و بنابراین غذا) که در آن سه مولکول آب به شکل یک گروه به هم پیوند خورده‌اند منتقل می‌شود. به عبارتی، وقتی میدان الکتریکی به نوسان درآید، مولکول‌های آب نیز نوسان می‌کنند. وقتی بسامد نوسان با بسامد طبیعی مولکول‌های آب هماهنگ شود، مولکول‌های آب با انرژی زیادی به حرکت درمی‌آیند. وقتی مولکول‌های الاکلنگی آب (یا هر مولکول قطبی دیگری) حرکت خود را به مولکول‌های اطراف منتقل کنند، غذا پخته می‌شود. برای آنکه به تصوری از این اتفاق برسید محفظه‌ای از توپ‌های پینگ‌پونگ را در نظر بگیرید که با چند باتوم در بین آنها، همگی در حال سکون‌اند. اکنون فرض کنید که باتوم‌ها ناگهان مانند ملخ‌های هواپیمایی بطور نیم‌چرخان به سرعت نوسان کنند و به توپ‌های مجاور برخورد کنند. توپ‌ها انرژی می‌گیرند و در تمام جهت‌ها به حرکت درمی‌آیند. اجاق میکروموج هم به همین ترتیب عمل می‌کند. باتوم‌ها، مولکول‌های آب (یا هر مولکول قطبی دیگری)اند که در محفظهٔ اجاق با ضرباهنگ منظمی حرکت رفت و برگشتی می‌کنند و توپ‌های پینگ‌پونگ مولکول‌های غیرقطبی‌اند که بخش اصلی غذای در حال پخت را تشکیل می‌دهند. اگر مولکول‌های آب دوقطبی الکتریکی نبودند ما اجاق‌های میکروموج هم نداشتیم. کاغذ خشک، بشقاب‌های اسفنجی و سایر موادی

که برای استفاده در این اجاق‌ها توصیه می‌شود حاوی آب یا سایر مولکول‌های قطبی نیستند و بنابراین امواج میکروموج بدون هیچ تأثیری از آنها می‌گذرند. جالب است برای یخ نیز که در آن مولکول‌های آب در جای خود قفل شده‌اند نیز همین‌طور است.



تأثیر میدان الکتریکی بر مولکول‌های آب

پرسش‌های پیشنهادی

۱ در اتاقک خلأ، میدان الکتریکی یکنواختی رو به پایین برقرار شده است. اگر یک الکترون به طور افقی در این ناحیه گسیل شود، شتاب آن :

الف) رو به پایین و ثابت　　ب) رو به بالا و ثابت

پ) رو به بالا و متغیر　　ت) رو به پایین و متغیر

خواهد بود.

پاسخ : ب

۲ ذره‌ای با بار q، میدانی الکتریکی ایجاد می‌کند. در نقطهٔ P واقع در ۰/۳۶ m در غرب این ذره، بزرگی میدان الکتریکی برابر است با ۴۰ N/C و جهت آن به سمت غرب است. در نقطه‌ای به فاصلهٔ ۰/۳۶ m واقع در شرق این ذره، میدان برابر است با

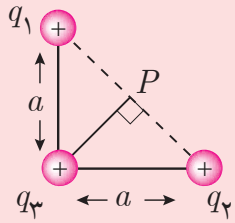
الف) ۴۰ N/C، رو به غرب　　ب) ۴۰ N/C، رو به شرق

پ) ۸۰ N/C، رو به غرب　　ت) ۸۰ N/C، رو به شرق

پاسخ : میدان الکتریکی ذره، شعاعی است. پس نتیجه می‌گیریم بار این ذره مثبت بوده است و چون فاصله تغییر نکرده است، بزرگی‌اش تغییر نمی‌کند. پس پاسخ درست، **ب** است.

تمرین پیشنهادی

سه ذره با بارهای $q_۱ = q_۲ = +e$ و $q_۳ = +۲e$ در مکان‌های خود، مطابق شکل زیر، ثابت شده‌اند. فاصله $a = ۶/۰۰\ \mu m$ است. بزرگی میدان الکتریکی خالص در نقطهٔ P چقدر است؟



پاسخ : میدان‌های حاصل از بارهای $q_۱$ و $q_۲$ همدیگر را در نقطهٔ P خنثی می‌کنند و می‌ماند میدان حاصل از $q_۳ = +۲e$ که باید آن را محاسبه کنیم. فاصلهٔ بار $q_۳$ تا نقطهٔ P با استفاده از قضیهٔ فیثاغورس به دست می‌آید :

$$r = \sqrt{a^۲ - \frac{a^۲}{۲}} = \sqrt{\frac{a^۲}{۲}}$$

بنابراین بزرگی میدان خالص چنین می‌شود :

$$E = \frac{۱}{۴\pi\varepsilon_۰}\ \frac{۲e}{r^۲} = \frac{۱}{۴\pi\varepsilon_۰}\ \frac{۲e}{(a/۲)^۲}$$

$$= \frac{۱}{۴\pi\varepsilon_۰}\ \frac{۴e}{a^۲} = (۹/۰\times۱۰^۹\ \mathrm{N.m^۲/C^۲})\frac{۴(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\ \mathrm{C})}{(۶/۰۰\times۱۰^{-۶}\ \mathrm{m})^۲} = ۱۶۰\ \mathrm{N/C}$$

فعالیت پیشنهادی

مولّد واندوگراف را مدتی روشن بگذارید تا بار الکتریکی قابل ملاحظه‌ای روی کلاهک آن ایجاد شود. اکنون یک لامپ فلوئورسانت را دربالای کلاهک و نزدیک آن بگیرید و مشاهدات خود را یادداشت کنید.

۱ــ۶ خطوط میدان الکتریکی

در آزمایش‌هایی از این دست، برای آنکه بتوانید طرح خطوط میدان را به‌صورت سه بُعدی ببینید، می‌توانید به‌جای بذر چمن از بریده‌های کوچک نخ استفاده کنید و اسباب آزمایش را در ظرف شیشه‌ای شفافی با عمق مناسب که حاوی روغن است به‌کار برید.

فیلم

در این فیلم آزمایشی مشابه فعالیت ۱ــ۳ را می‌بینید.

در این شکل‌ها حتماً با رسم بزرگ‌شدهٔ این تصاویر، به اندازهٔ بردارهای میدان الکتریکی که به‌تدریج کوچک و کوچک‌تر می‌شوند اشاره کنید. همچنین اشاره به میدان‌های دما و فشار که پیشتر در دانستنی اندیشهٔ وجود میدان به آن پرداختیم، می‌تواند آموزنده باشد.

در مورد قاعدهٔ رسم ۲ خطوط میدان الکتریکی خوب است اشاره شود که تعداد خطوط میدان متناسب با قدرمطلق بارها است. در این مورد خوب است پرسش پیشنهادی مربوط (پرسش پیشنهادی ۲) مطرح گردد.

فیلم

در این فیلم‌ها نمایشی از طرح خطوط میدان الکتریکی دو بار را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم نمایشی از چگونگی رسم خطوط میدان الکتریکی دو بار هم‌نام را می‌بینید.

پاسخ پرسش ۱ــ۴

در هر نقطهٔ فضا، یک میدان الکتریکی یکتا وجود دارد که همان میدان الکتریکی خالص (برایند) است و چون میدان الکتریکی در آن نقطه از فضا یکتا است، بنابراین میدان الکتریکی برایند دیگری در آنجا وجود ندارد که تقاطع ایجاد کند.

پاسخ پرسش ۱ــ۵

نیروی الکتریکی وارد بر بار منفی در خلاف جهت میدان الکتریکی $\vec{E}$ است، و بنابراین اگر نیروی دیگری به این بار اثر نکند، بار منفی در خلاف جهت میدان شتاب می‌گیرد. در هر سه نقطه، نیروی الکتریکی وارد بر بار $-q$ در خلاف جهت پیکان‌های خطوط میدان الکتریکی است.

پاسخ فعالیت ۱ـ۴

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

الف) اجزای بساک و کلالهٔ یک گل

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

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

در مثال ۱ــ۹ توجه شود که تحلیل دقیق آزمایش میلیکان موردنظر نبوده است و صرفاً یک تحلیل ساده از این آزمایش برای ارائه مثالی در مورد تعادل در میدان الکتریکی ارائه شده است. هم ساز و کار آزمایشگاهی این آزمایش و هم تحلیل آن پیچیده‌تر از آن است که در این مطلب متن آمده است. در ساز و کار آزمایشگاهی، بیشتر منابع به این مطلب اشاره داشته‌اند که یک منبع پرتوی ایکس با یونیده کردن مولکول‌های هوای بین صفحه‌های عایق‌بندی شده موجب باردار شدن قطره‌ها، افزون بر باردار شدن آنها از طریق مالش، می‌شود. همچنین تحلیل ریاضی این آزمایش نیز به دانشی فراتر از دانش فعلی دانش‌آموزان نیاز دارد.

فیلم

در این فیلم چگونگی آزمایش قطره ــ روغن میلیکان را در نوع کامل‌تر آن می‌بینید.

پاسخ تمرین ۱ــ۷

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

$$F_E = mg \Rightarrow |q|E = mg$$

و از آنجا

$$E = \frac{mg}{|q|} = \frac{(۱۰/۰\times۱۰^{-۳}\,\text{kg})(۹/۸۰\,\text{N/kg})}{۲۰۰\times۱۰^{-۹}\,\text{C}} = ۴/۹۰\times۱۰^{۵}\,\text{N/C}$$

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

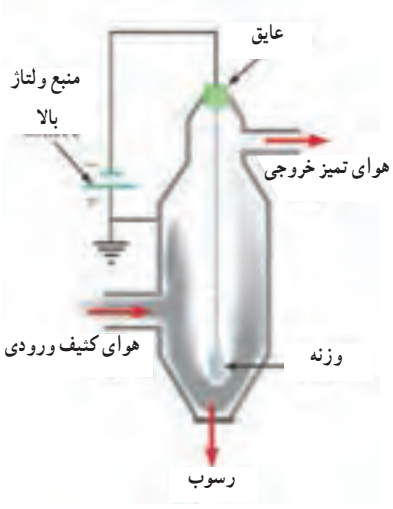
رسوب‌دهنده‌ها اقسام متفاوتی دارند که در پاسخ به این فعالیت به سه‌تای آنها اشاره شده است. می‌توان دانش‌آموزان را به جستجو در مورد انواع دیگر رسوب‌دهنده‌ها تشویق کرد.

در این فیلم ساز و کار رسوب‌دهنده‌های الکتروستاتیکی را می‌بینید.

فیلم

پاسخ فعالیت ۱ــ۷

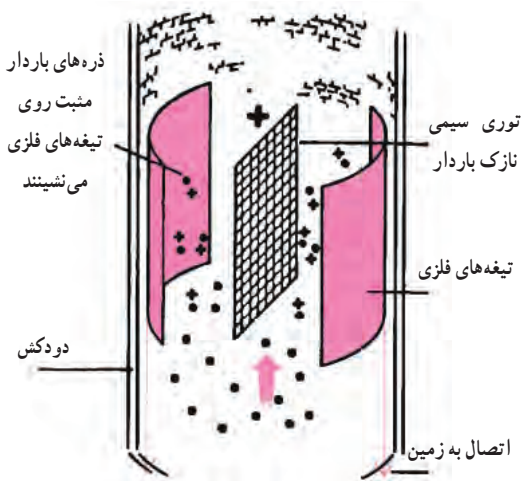
رسوب‌دهنده‌های الکتروستاتیکی یکی از کاربردهای مهم تخلیهٔ الکتریکی است. این وسیله با جداسازی ذرات از گازهای حاصل از احتراق مواد سوختی، سبب کاهش آلودگی هوا می‌شود. به‌کارگیری این وسیله، به‌خصوص در نیروگاه‌های تولید برق که از زغال سنگ استفاده می‌کنند و دیگر صنایعی که مقادیر قابل توجهی دود تولید می‌کنند، مفید است. رسوب‌دهنده‌هایی که امروزه به‌کار گرفته می‌شوند می‌توانند حدود ۹۰ درصد خاکستر و بخار موجود در دود را کاهش دهند، ولی با این حال درصد قابل توجهی از ذرات سبک‌تر، از رسوب‌دهنده می‌گریزند و وارد جو می‌شوند. رسوب‌دهنده‌ها اقسام متفاوتی دارند که در اینجا به چند نوع آنها می‌پردازیم.



در رسوب‌دهنده‌ای که در شکل اول می‌بینید، ولتاژ بالایی (نوعاً از ۴۰kV تا ۱۰۰kV) بین یک سیم فلزی که از وسط دودکش آن می‌گذرد و دیوارهٔ دودکش برقرار می‌شود، در حالی که دیوارهٔ دودکش به زمین متصل است. پتانسیل سیم فلزی، منفی‌تر از پتانسیل دیواره است و لذا میدان الکتریکی‌ای به‌وجود می‌آید که جهت آن به سمت سیم است. در نزدیکی سیم، میدان الکتریکی چنان قوی است که می‌تواند سبب تخلیهٔ الکتریکی در این فضا گردد و به این ترتیب یون‌های مثبت و منفی و تعدادی الکترون ایجاد می‌شود. الکترون‌ها و یون‌های منفی (از قبیل O_2^-) در خلاف

جهت میدان الکتریکی، به سمت دیوارهٔ دودکش شتاب می‌گیرند. ذرات غبار موجود در دودی که از دودکش می‌گذرد با یون‌های منفی و الکترون‌ها برخورد کرده و با به دام انداختن آنها باردار می‌شوند؛ چون بیشتر ذرات غبار باردار شدهٔ منفی هستند، این ذرات توسط میدان الکتریکی به سمت دیوارهٔ دودکش کشیده می‌شوند. با تکان دادنِ دودکش، ذرات باردار شدهٔ غبار چسبیده به دیوار پایین می‌ریزد و آنگاه از ته رسوب‌دهنده جمع‌آوری می‌شوند.

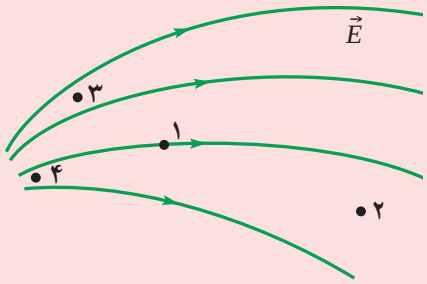
نوع دیگر رسوب‌دهنده‌ها در شکل دوم نشان داده شده است. در این رسوب‌دهنده، توری سیمی که به میزان زیادی باردار مثبت شده است بین تیغه‌های فلزی متصل به زمین قرار دارد، به‌گونه‌ای که تخلیهٔ الکتریکی مدامی بین توری و این تیغه‌ها روی می‌دهد. این تخلیه، جریان پیوسته‌ای از یون‌ها را به همراه دارد که خود را به ذره‌های غبار در گازی که از دودکش بالا می‌رود، متصل می‌کنند. ذره‌های باردار عبوری به سوی تیغه‌های متصل به زمین رانده می‌شوند و در آنجا رسوب می‌کنند. پس از مدتی، این تیغه‌ها را با زدن ضربه می‌تکانند و به این ترتیب، ذره‌ها را جدا می‌کنند.



پاک‌کنندهٔ هوای الکتروستاتیکی دستگاه مشابه دیگری از این دست به منظور ایجاد هوای مطبوع برای مبتلایان به آلرژی است. در این دستگاه، هوای آلوده نخست از میان یک شبکهٔ توری با بار مثبت عبور داده می‌شود. ذرات آلودگی با برخورد با این شبکه باردار مثبت می‌شوند. سپس، هوا از شبکهٔ توری دیگری که باردار منفی شده است عبور می‌کند. ذرات آلاینده که بیشتر هنگام برخورد با شبکه توری مثبت، باردار مثبت شده بودند، با نیروی الکتروستاتیکی جذب شبکهٔ توری منفی می‌شوند و روی این شبکه رسوب می‌کنند و به این ترتیب هوای خروجی از دستگاه عاری از درصد زیادی از ذرات آلاینده است.

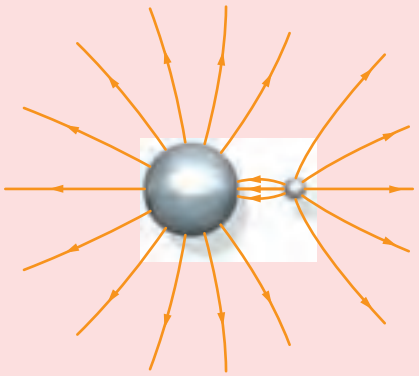
پرسش‌های پیشنهادی

۱ در شکل روبه رو، نقاط ۱ تا ۴ را به ترتیب بزرگی میدان الکتریکی از کمترین تا بیشترین مرتب کنید.



پاسخ : ۲، ۱، ۳، ۴

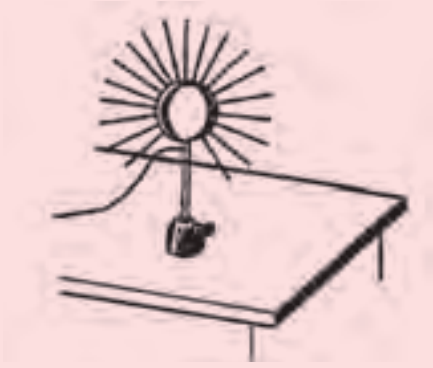
۲ خطوط میدان الکتریکی برای دو کرهٔ رسانای باردار در شکل زیر نشان داده شده است. علامت بار روی هر کره و نسبت بزرگی بار روی کره‌ها چقدر است؟



پاسخ : علامت بارها مثبت و اندازهٔ آنها برابر است. بارها مثبت‌اند، زیرا خطوط میدان از گوی‌ها خارج شده‌اند. همچنین نسبت بارها برابر تعداد خطوطی است که از هر گوی خارج و یا در آن پایان می‌پذیرند. اگر بررسی کنید می‌بینید این برای هر دو گوی برابر است و بنابراین اندازهٔ بارهای آنها یکسان است.

فعالیت پیشنهادی

سر نخ‌ها را به محیط یک حلقهٔ فلزی وصل می‌کنیم و سپس توسط سیم رابط و گیرهٔ سوسماری، کلاهک واندوگراف را به حلقهٔ دایره‌ای متصل می‌کنیم. پس از روشن شدن واندوگراف نخ‌ها از هم باز شده و به صورت شعاعی درمی‌آیند. دلیل آن را توضیح دهید.



۱ــ۷ــ انرژی پتانسیل الکتریکی

ممکن است دانش‌آموزان با واژهٔ پتانسیل الکتریکی از پیش آشنا باشند. خوب است اشاره شود که این مبحث راهی برای تعریف آن مفهوم را پیش می‌کشد و با پتانسیل الکتریکی ارتباط دارد، ولی اساساً این دو کمیت، کمیت‌های متفاوتی هستند. اما تشابه انرژی پتانسیل الکتریکی با انرژی پتانسیل گرانشی کاملاً مفهومی و منطقی است و بر خلاف پتانسیل الکتریکی، در اینجا باید به تشابه این دو مفهوم اشارهٔ کامل کرد و با مقایسهٔ تغییرات انرژی پتانسیل گرانشی و انرژی جنبشی در مثال‌هایی مانند سقوط اجسام، بر این همانندسازی تأکید کرد تا دانش‌آموزان به درکی عمیق از مفهوم انرژی پتانسیل دست یابند.

در این مبحث حتماً اشاره شود که در اینجا (برخلاف کتاب‌های دانشگاهی) θ زاویهٔ بین نیروی الکتریکی (و نه میدان الکتریکی) و جابه‌جایی بار است و به تعریف $|q|$ از دانش ریاضی دانش‌آموزان اشاره گردد.

پاسخ تمرین ۱ــ۸

طبق قضیهٔ کار ــ انرژی جنبشی داریم :

$$W_E=\Delta K$$

از طرفی رابطهٔ ۱ــ۸، $W_E=-\Delta U_E$ است و بنابراین داریم :

$$-\Delta U_E=\frac{۱}{۲}m(v_B^۲-v_A^۲)\Rightarrow \Delta U_E=-\frac{۱}{۲}mv_B^۲$$

چون جهت میدان الکتریکی نسبت به مثال ۱ــ۱۰ عوض شده است، پروتون در جهت این میدان (به طرف راست) شتاب می‌گیرد. تغییر انرژی پتانسیل آن برابر است با

$$\Delta U_E=-|q|Ed\cos\theta$$

که در اینجا $\theta=۰^\circ$ است. بنابراین

$$\Delta U_E=-|q|Ed$$

$$-\frac{۱}{۲}mv_B^۲=-|q|Ed$$

و در نتیجه :

$$v_B=\sqrt{\frac{۲|q|Ed}{m}}$$

$$=\sqrt{\frac{۲(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,\mathrm{C})(۲/۰\times۱۰^{۳}\,\mathrm{N/C})(۱۰\times۱۰^{-۲}\,\mathrm{m})}{۱/۶۷\times۱۰^{-۲۷}\,\mathrm{kg}}}$$

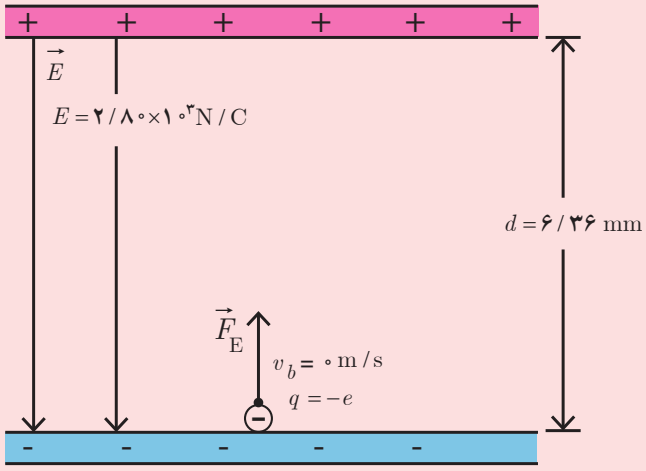
$$=۱/۹۶\times۱۰^{۵}\ \mathrm{m/s}\approx ۲/۰\times۱۰^{۵}\ \mathrm{m/s}$$

البته این را می‌توانستیم بدون محاسبه و با توجه به پاسخ قسمت ب مثال ۱ــ ۱۰ نیز حدس بزنیم.

تمرین های پیشنهادی

۱ دو صفحهٔ باردار با علامت‌های مختلف به فاصلهٔ ۶/۳۶ mm از هم قرار دارند و میدان الکتریکی یکنواختی به بزرگی $۲/۸۰\times۱۰^{۳}\,N/C$ بین صفحه‌های آن ایجاد شده است. الکترونی از صفحهٔ منفی به سمت صفحهٔ مثبت حرکت می‌کند. میدان الکتریکی چه مقدار کار روی الکترون انجام می‌دهد؟

پاسخ : همان‌طور که در شکل می‌بینیم، نیرو و جابه‌جایی موازی هم‌اند و بنابراین داریم :



$$W = F_e\, d = eEd$$
$$= (۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}C)\,(۲/۸۰\times۱۰^{۳}\,N/C)\,(۶/۳۶\times۱۰^{-۳}\,m) = ۲/۸۵\times۱۰^{-۱۸}J$$

به عبارتی، میدان الکتریکی کاری مثبت روی الکترون انجام می‌دهد و اگر تنها نیروی وارد بر الکترون ناشی از میدان الکتریکی باشد، انرژی جنبشی الکترون زیاد می‌شود.

۱ــ۸ ــ پتانسیل الکتریکی

در اینجا خوب است به دانش‌آموزان خاطرنشان کنید که همان‌طور که میدان الکتریکی، برخلاف نیروی الکتریکی، یک ویژگی ذاتی اجسام باردار است و به بار آزمون بستگی ندارد، به‌طور مشابهی می‌توان یک ویژگی ذاتی دیگر نیز برای اجسام باردار در مقایسه با انرژی پتانسیل الکتریکی تعریف کرد که به بار آزمون بستگی نداشته باشد، که این همان اختلاف پتانسیل الکتریکی است.

گاهی اوقات دانش‌آموزان پتانسیل الکتریکی را با انرژی پتانسیل الکتریکی اشتباه می‌گیرند. گرچه این دو کمیت به هم مربوطند، ولی آنها با هم تفاوت زیادی دارند و حتی در کتاب مبانی فیزیک اشاره شده است که انتخاب این نام جنبهٔ تاریخی دارد و به زمان‌های دور برمی‌گردد و شاید مناسب آن بود که نامی دیگر برای آن برگزیده می‌شد تا این کج فهمی ایجاد نگردد.

پاسخ تمرین ۱ــ۹

در متن درس اشاره شد که ΔV مستقل از نوع بار است و اینجا می‌خواهیم آن را نشان دهیم.

الف) رابطه‌های $\Delta U = -|q|Ed\cos\theta$ و $\Delta V=\Delta U/q$ را در نظر بگیرید. اگر بار q مثبت باشد، θ همان زاویهٔ میان میدان الکتریکی و جابه‌جایی بار q است، و در اینجا $\theta=0^\circ$ می‌شود و بنابراین

$\Delta V=-Ed$

و اگر بار q منفی باشد، نیرو در خلاف جهت میدان اثر می‌کند و با توجه به اینکه جابه‌جایی هم‌سو با میدان است، در اینجا $\theta=\pi$ است و بنابراین

$$\Delta U = -|q|Ed\cos(\pi) = |q|Ed$$

که با توجه به منفی بودن q، داریم $|q|=-q$ و در نتیجه $\Delta U=-qEd$ می‌شود. از طرفی $\Delta V=\Delta U/q$ است و بنابراین خواهیم داشت :

$\Delta V=-Ed$

پس در هر دو حالت $\Delta V=-Ed$ شد، که به معنی کاهش پتانسیل است. بدیهی است که با حرکت در خلاف جهت میدان، $\Delta V=+Ed$ می‌شود که به معنی افزایش پتانسیل است.

ب) با حرکت در جهت عمود بر خطوط میدان، $\theta=90^\circ$ و در نتیجه $\Delta U=0$ و از آنجا $\Delta V=0$ می‌شود.

پاسخ تمرین ۱ـ۱۰

در این حالت، چون پایانهٔ مثبت را مرجع گرفته‌ایم، $V_+=0$ است. بنابراین

$$\Delta V=V_+-V_-=0-V_-=12V$$

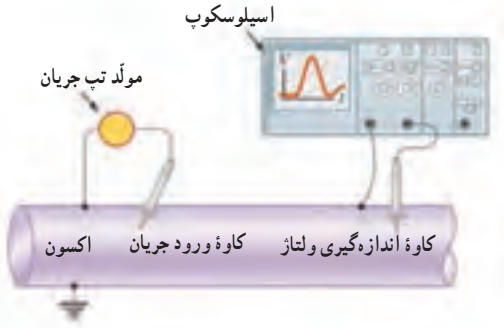
و در نتیجه $V_-=-12V$ می‌شود. به عبارتی دیگر، پتانسیل پایانهٔ منفی باتری ۱۲V کمتر از پتانسیل پایانهٔ مثبت آن است.

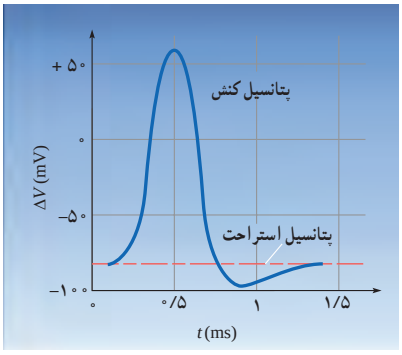
خوب است همان‌طور که در فعالیت ۱ـ۶ نیز اشاره شده است، توجه دانش‌آموزان را به این نکته جلب کنیم که پهنهٔ استفاده از مفهوم اختلاف پتانسیل، پدیده‌های زیستی را نیز شامل می‌شود. افزون بر فعالیت ۱ـ۶ می‌توان مثلاً به دستگاه الکتروکاردیوگرام نیز اشاره کرد که توسط آن نوار قلب تهیه می‌شود. این دستگاه طرحی را نشان می‌دهد که چیزی جز نمودار تغییرات اختلاف پتانسیل بین الکترودهای متصل شده به بدن نیست.

تأکید شود پتانسیل نسبت به یک مرجع معنی دارد. می‌توانیم با مثال‌هایی غیرفیزیکی نیز ذهن دانش‌آموزان را نسبت به مفهوم «پتانسیل» آشنا کنیم. مثلاً برخی‌ها طبقهٔ هم‌کف ساختمان را طبقهٔ اول و برخی آن را طبقه صفر می‌نامند. حال اگر علی ساکن طبقهٔ هم‌کف باشد و بر فرض فرهاد از او سؤال کند منزل شهرام در کدام طبقه است و او پاسخ دهد سه طبقه بالاتر از خانهٔ من است، بسته به اینکه طبقهٔ هم‌کف را طبقهٔ صفر یا طبقهٔ اول بنامیم، خانهٔ شهرام در طبقهٔ سوم یا چهارم واقع است. پس بیان مرجع در بیان «طبقه» مهم است.

پاسخ فعالیت ۱ــ۶

به‌طور اختصار می‌توان گفت که اساساً نورون، متشکل از یک جسم سلولی است که پیام‌های الکتریکی را از طریق اتصال‌هایی به نام سیناپس که روی دندریت‌ها قرار دارند، دریافت یا ارسال می‌کند. اگر محرّک به حدّ کافی قوی باشد، نورون یک سیگنال الکتریکی را در امتداد تاری به نام اکسون ارسال می‌کند. اکسون یا تار عصبی که قطر آن ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر است و طول آن ممکن است به یک متر برسد، سیگنال الکتریکی را به ماهیچه‌ها و نورون‌های دیگر می‌برد. در دو طرف سطح یا غشای هر نورون اختلاف پتانسیلی ناشی از وجود یون‌های منفی بیشتر در داخل غشا نسبت به خارج آن وجود دارد و اصطلاحاً به آن *نورون قطبیده* گفته می‌شود. پتانسیل داخل سلول عموماً ۶۰ تا ۹۰ میلی ولت، منفی‌تر از خارج آن است. این اختلاف پتانسیل، *پتانسیل استراحت* نورون نامیده می‌شود. وقتی نورون تحریک می‌شود، در محلّ تحریک، تغییر لحظه‌ای بزرگی در پتانسیل استراحت رخ می‌دهد. این تغییر پتانسیل که *پتانسیل کنش* نام دارد، به‌صورت سیگنالی در امتداد اکسون منتشر می‌شود. تحریک می‌تواند از طریق عواملی از قبیل گرما، سرما، نور، صوت و بو، به‌وجود آید. اگر تحریک، الکتریکی باشد فقط در حدود ۲۰mV در دو طرف غشا لازم است تا پتانسیل کنش را راه بیندازد. پتانسیل کنش با سرعتی حدود ۳۰m/s امتداد اکسون منتشر می‌شود. در شکل اول تصویری نمایشی از چگونگی آشکارسازی پتانسیل کنش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید در سمت چپ تحریکی الکتریکی ایجاد شده است که در سمت راست پتانسیل کنش حاصل از آن به‌صورت تابعی از زمان حاصل شده است. در شکل دوم اختلاف پتانسیل درون و بیرون غشای نورون در یک نقطه روی اکسون به صورت تابعی از زمان رسم شده است.





اختلاف پتانسیل درون و بیرون غشای نورون در یک نقطه روی اکسون به‌صورت تابعی از زمان

در این مورد مقاله‌ای تحت عنوان «درآمدی بر فیزیولوژی اعصاب» در صفحهٔ ۴۰ شماره ۶۲ مجلهٔ رشد آموزش فیزیک چاپ شده است که پس از آن می‌توان مقالهٔ دیگری تحت عنوان «مدل‌سازی سلول عصبی با مدارهای الکتریکی» مطالعه نمود که در صفحهٔ ۳۶ شمارهٔ ۷۷ همان مجله به چاپ رسیده است.

فیلم

در این فیلم‌ها چگونگی انتقال سیگنال‌های عصبی را می‌بینید.

در تمرین ۱ــ۱۱ و کلاً مباحث این بخش اشاره شود که رویکردی مبتنی بر حرکت با تندی ثابت نیز در برخی کتاب‌ها مطرح شده است که به همین نتایج می‌انجامد.

پاسخ تمرین ۱ــ۱۱

چون بار $q+$ در خلاف جهت میدان جابه‌جا شده است و نیروی الکتریکی هم‌سو با میدان است، $\theta=۱۸۰^\circ$ و $W_E=F_E d\cos\theta$ منفی می‌شود. با توجه به اینکه $\Delta K=۰$ است، $W_{\text{خارجی}}=-W_E$ می‌شود و بنابراین کار نیروی دست مثبت است.

ب) کار نیروی خارجی برای $\Delta K=۰$ برابر $q\Delta V$ است. بنابراین، چون کار نیروی خارجی مثبت شده است، و علامت بار جابه‌جا شده نیز مثبت است، بار $q+$ به نقطه‌ای با پتانسیل بالاتر حرکت کرده است.

روش دیگر آن بود که نخست قسمت ب و سپس قسمت الف را پاسخ دهیم. درآن صورت با توجه به تمرین ۱–۹ می‌دانیم با حرکت بار مثبت در خلاف جهت میدان الکتریکی، پتانسیل الکتریکی V افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه بار مثبت است و با استفاده از رابطهٔ $W_{\text{خارجی}}=q\Delta V$ ، درمی‌یابیم کار نیروی دست مثبت است.

تبصره: توجه کنید حرکت بار مثبت در خلاف جهت میدان الکتریکی، مشابه با گرانش است که با حرکت در خلاف جهت میدان گرانشی، در آنجا انرژی پتانسیل گرانشی U زیاد می‌شود.

در اینجا خوب است به یکای الکترون ولت نیز اشاره شود.

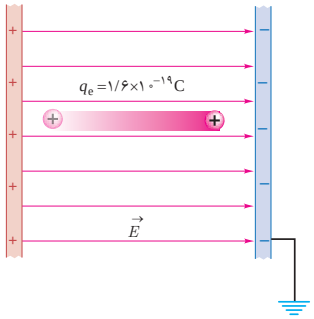
الکترون ولت : در فیزیک اتمی و زیراتمی یکای ژول برای انرژی مناسب نیست، چرا که مقدار بزرگی است؛ در حالی‌که در آنجا با انرژی‌های بسیار کوچک‌تری سروکار داریم. برای این موارد یکای مناسب‌تر (که البته یکای SI نیست)، الکترون ولت (eV) است که طبق تعریف انرژی لازم برای حرکت دادن ذره‌ای با بار بنیادی e در اختلاف پتانسیلی برابر ۱V است. مثلاً فرض کنید مطابق شکل ذره‌ای با بار $q_e = +e$ در یک میدان الکتریکی، از نقطه‌ای با پتانسیل ۱V+ به نقطهٔ دیگری با پتانسیل ۰V جابه‌جا می‌شود. بنابراین طبق رابطهٔ ۱ــ۷ ($W_E = -\Delta U_E$) بزرگی کار نیروی الکتریکی برای این جابه‌جایی برابر است با

$$|W_E| = |-\Delta U_E| = |-q\Delta V| = -(+e)(-1\text{V}) = (1/6\times10^{-19}\text{C})(1\text{J/C}) = 1/6\times10^{-19}\text{J}$$

که به آن اصطلاحاً یک الکترون ولت (1eV) گفته می‌شود.

البته تعریف دیگری نیز برای تعریف یک الکترون ولت به‌کار می‌رود که به این صورت است :

یک الکترون ولت، انرژی است که یک الکترون وقتی آزادانه در اختلاف پتانسیل یک ولت رها می‌شود، به‌دست می‌آورد.



ذره‌ای با بار e+ در اختلاف پتانسیل ۱V حرکت می‌کند و انرژی پتانسیل آن به اندازه ۱eV کاهش می‌یابد.

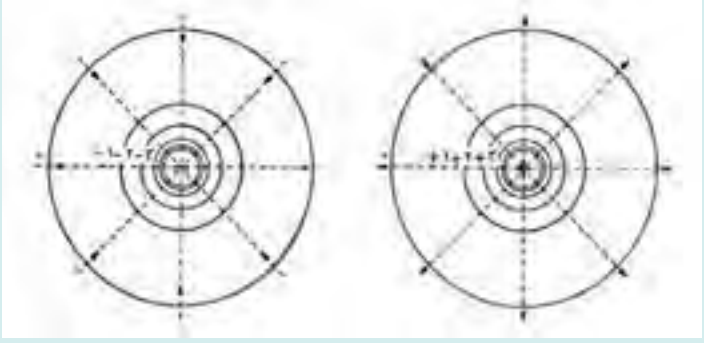
۱ــ۹ــ میدان الکتریکی در داخل رسانا

دانستنی برای معلم

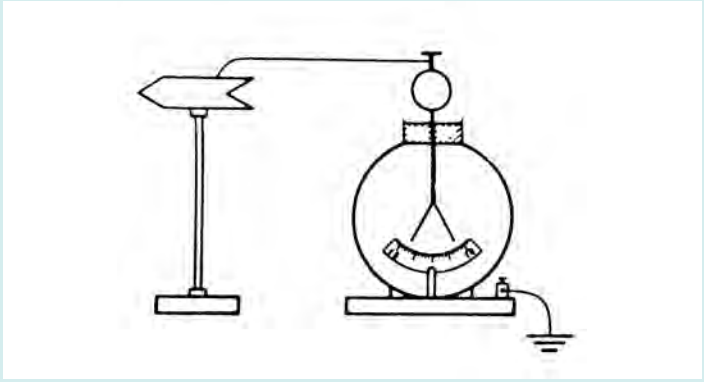
سطوح هم‌پتانسیل، الکترومتر، و کاوهٔ الکتریکی

سطحی را تصور کنید که روی آن اختلاف پتانسیل بین هر دو نقطه‌ای برابر صفر است. چنین سطحی را *سطح هم‌پتانسیل* می‌نامند. سطح مقطع این سطح با صفحهٔ شکل، خط هم‌پتانسیل را تشکیل می‌دهد. طبق رابطه‌های ۱ــ۷ و ۱ــ۹ کاری که نیروهای الکتریکی برای جابه‌جا کردن بار روی چنین سطحی انجام می‌دهند برابر صفر است. در این صورت بنا بر رابطهٔ ۱ــ۸، نیروی وارد بر بار باید بر راستای جابه‌جایی عمود باشد. این به معنی آن است که در هر نقطه، سطح هم‌پتانسیل بر خطوط میدان الکتریکی عمود است. برعکس، هر سطحی که تمام نقاط آن بر خطوط میدان عمود باشد، یک سطح هم‌پتانسیل است. خطوط هم‌پتانسیل، تصوری از تغییر اختلاف پتانسیل در یک میدان معین را به‌دست می‌دهند. بهتر است این خطوط را طوری رسم کنیم که اختلاف پتانسیل بین هر دو خط مجاور یک اندازه (مثلاً 1V) باشد. برای نشان دادن این اختلاف، یکی از خطوط هم‌پتانسیل را به اختیار انتخاب می‌کنیم و آن را خط هم‌پتانسیل صفر می‌گیریم و بقیهٔ خطوط را نسبت به آن با عددهای ۱+، ۲+، ۳+ و ... یا ۱–، ۲–، ۳– و ... نشان می‌دهیم.

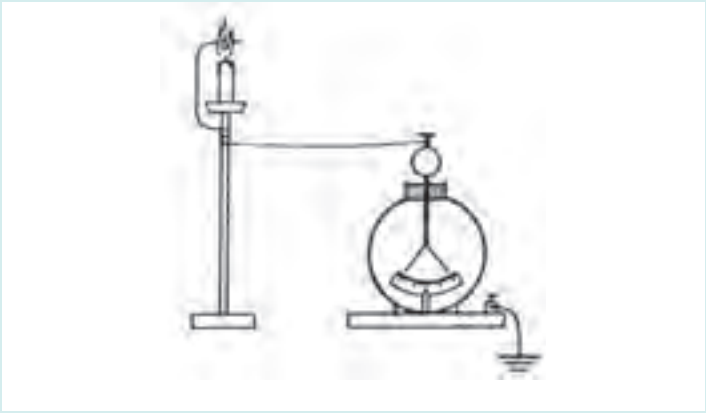
انتخاب خط صفر (سطح صفر) کاملاً اختیاری است، زیرا فقط اختلاف پتانسیل بین دو سطح معنای فیزیکی دارد. برای نمونه، می‌خواهیم خطوط هم‌پتانسیل را برای بارهای نقطه‌ای مثبت و منفی رسم کنیم. برای بار نقطه ای، خطوط میدان شعاعی و مستقیم هستند. بنابراین، سطوح هم‌پتانسیل کره‌هایی هم‌مرکز عمود بر این خطوط می‌شوند. خطوط هم‌پتانسیل دایره های هم‌مرکزی هستند که در شکل‌های ۱ رسم شده‌اند. هنگام رسم این نقش، دایره ای به اختیار به‌عنوان خطّ صفر فرض می‌شود و سپس دایره‌های اختلاف پتانسیل ۱، ۲، ۳ و غیره (نسبت به دایرهٔ صفر) رسم می‌شوند.



اسباب اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل را الکترومتر می‌نامند. نوع قدیمی این اسباب یک الکتروسکوپ معمولی است که دارای محفظه‌ای فلزی و صفحه‌ای مدرّج برای خواندن اندازه‌گیری‌ها است. محفظهٔ این اسباب را با زمین و کلاهک آن را با جسم باردار اتصال می‌دهند. بخشی از بار به میله می‌رود و برگه‌ها با زاویهٔ معینی از هم دور می‌شوند. هرچه اختلاف پتانسیل بالاتر باشد، شدت میدان در نزدیکی برگه‌ها بزرگ‌تر و در نتیجه زاویهٔ انحراف بیشتر است. با ایجاد اختلاف پتانسیل‌های یکسان بین برگه‌ها و محفظه، مشاهده می‌شود که برگه‌ها انحراف یکسانی پیدا می‌کنند. بنابراین، باز شدن برگه‌ها در یک اسباب مشخص به اختلاف پتانسیل بین محفظه و آنها بستگی دارد. در نتیجه، از روی زاویهٔ باز شدن برگه‌ها می‌توان اختلاف پتانسیل را از صفحه مدرّج اندازه گرفت. با حرکت دادن سیم اتصال الکترومتر به رسانا می‌توان دید که انحراف برگه‌ها تغییر نمی‌کند که این به معنای آن است که سطح رسانا یک سطح هم‌پتانسیل است و شکل آن در این امر دخالتی ندارد.

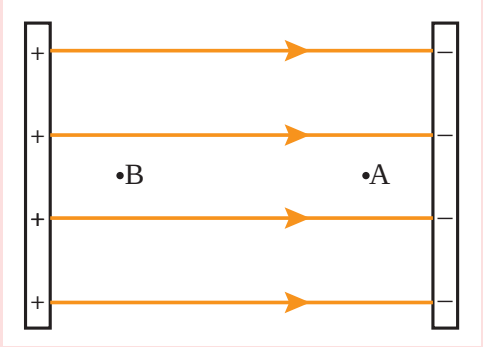


اگر بخواهیم اختلاف پتانسیل بین نقطه‌ای در هوا و زمین را اندازه بگیریم، با آوردن سیم از کلاهک الکترومتر تا آن نقطه از فضا، تضمینی جهت تساوی پتانسیل کلاهک و آن ناحیه وجود ندارد. زیرا در شرایط عادی، هوا دارای الکترون‌های آزاد نیست که بر اثر میدان الکتریکی به حرکت درآیند تا اینکه اختلاف پتانسیل بین آن ناحیه از فضا و سیمی که به الکترومتر وصل است صفر شود. جهت اطمینان از تساوی این پتانسیل‌ها، باید برای آن ناحیه الکترون‌های آزاد فراهم کرد. یعنی آنجا را به رسانا تبدیل کرد. این کار را می‌توان با روش‌های مختلفی انجام داد. مثلاً به کمک شعله می‌توان هوای مجاور را یونیده کرد. با قرار دادن شعله در نقاط مختلف، می‌توانیم آرایش سطوح هم‌پتانسیل در هوا را با این کاوهٔ الکتریکی، «بکاویم». به این دلیل، چنین اسبابی را کاوه (کاوهٔ شعله‌ای) می‌نامند.



پرسش‌های پیشنهادی

۱ در میدان الکتریکی یکنواختی، مطابق شکل زیر بار q از نقطهٔ A به سمت نقطهٔ B جابه‌جا می‌شود. علامت‌های ΔU و ΔV را تعیین کنید، هرگاه الف) q مثبت و ب) q منفی باشد.



پاسخ : الف) هر دو مثبت ب) $\Delta U<0$ و $\Delta V>0$.

۲ اگر باری مثبت را عمود بر خطوط میدانی یکنواخت حرکت دهیم، انرژی پتانسیل الکتریکی بار چگونه تغییر می‌کند؟

پاسخ : تغییر نمی‌کند.

تمرین های پیشنهادی

۱ هرگاه برای بردن بار الکتریکی $q = ۲/۰\ \mathrm{C}$ از نقطهٔ A به نقطهٔ B، مقدار $۴۰\ \mathrm{J}$ انرژی مصرف شده باشد، الف) اختلاف پتانسیل الکتریکی نقطهٔ B نسبت به نقطهٔ A چقدر است؟ ب) برای جابه‌جایی بار $q' = -۵/۰\ \mathrm{C}$ چند ژول انرژی مصرف می‌شود؟

پاسخ :

الف)

$$V_B - V_A = \frac{\Delta U}{q} = \frac{۴۰\mathrm{J}}{۲/۰\mathrm{C}} = ۲۰\mathrm{V}$$

ب)

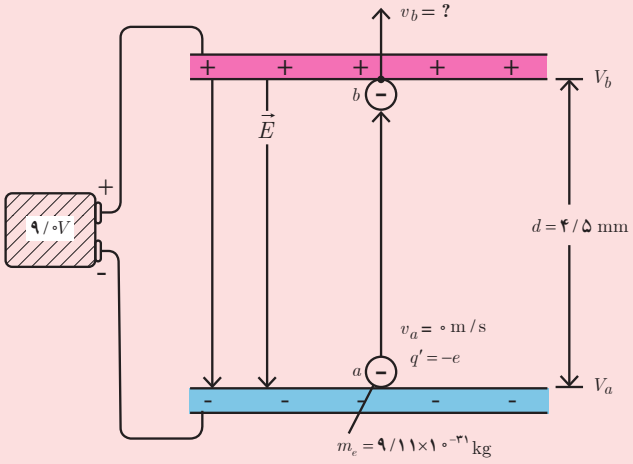
$$\Delta U' = q'(V_B - V_A) = (-۵/۰\mathrm{C})(۲۰\mathrm{V}) = -۱۰۰\mathrm{J}$$

یعنی $۱۰۰\ \mathrm{J}$ انرژی آزاد می‌شود.

۲ یک باتری $۹/۰\ \mathrm{V}$ به دو سر صفحه‌هایی وصل شده است که فاصلهٔ آنها $۴/۵\ \mathrm{mm}$ است.

الف) میدان الکتریکی در فضای بین صفحه‌ها چقدر است؟

ب) یک الکترون از حالت سکون از صفحهٔ منفی رها می‌شود. اگر تنها نیروی وارد بر الکترون، نیروی الکتریکی حاصل از میدان الکتریکی صفحه‌ها باشد، تندی الکترون وقتی به صفحهٔ مثبت می‌رسد چقدر است؟ جرم الکترون $m_e = ۹/۱۱ \times ۱۰^{-۳۱}\mathrm{kg}$ است.



پاسخ :

الف) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۱ داریم :

$$E = \frac{V_b - V_a}{d} = \frac{۹/۰\mathrm{V}}{۴/۵ \times ۱۰^{-۳}\mathrm{m}} = ۲/۰ \times ۱۰^{۳}\ \mathrm{V/m}$$

ب) از پایستگی انرژی استفاده می‌کنیم :

$$K_a + U_a = K_b + U_b$$

با توجه به اینکه $K_a = ۰$ است داریم :

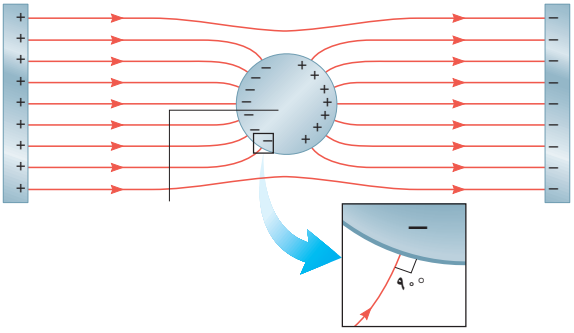
$$\begin{aligned} K_b &= U_a - U_b = -e(V_a - V_b) \\ &= +e(V_b - V_a) \\ &= (۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\mathrm{C})(۹/۰\mathrm{V}) \\ &= ۱/۴۴ \times ۱۰^{-۱۸}\mathrm{J} \end{aligned}$$

و با استفاده از $K = \frac{۱}{۲}mv^۲$، تندی v در نقطهٔ b به‌دست می‌آوریم :

$$v_b = \sqrt{\frac{۲K_b}{m_e}} = \sqrt{\frac{۲(۱/۴۴ \times ۱۰^{-۱۸}\ \mathrm{J})}{۹/۱۱ \times ۱۰^{-۳۱}\mathrm{kg}}} = ۱/۸ \times ۱۰^{۶}\ \mathrm{m/s}$$

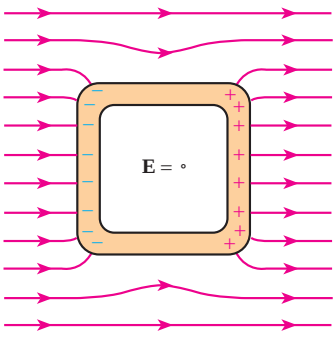
توجه کنید که در این مبحث به تعادل الکتروستاتیکی اشاره شده است. چه در آزمایش فاراده و چه در پدیده القا، اگر میدان داخل رسانا پس از زمان اندکی صفر نشود، این میدان باید بر الکترون‌های آزاد داخل رسانا نیرو وارد کند و در نتیجه باید جریان در داخل رسانا ایجاد شود. ولی چون چنین جریانی مشاهده نمی‌شود، این بدان معناست که بارها در تعادل الکتروستاتیکی هستند. همچنین توجه کنید که این توضیح برای داخل رسانا است و در سطح رسانا، میدان صفر نیست و همان‌طور که در بالا اشاره کردیم عمود بر سطح رسانا است. عمود بودن میدان بر سطح رسانا، موجب هم‌پتانسیل بودن نقاط روی سطح رسانا و در نتیجه هم‌پتانسیل بودن کلّ نقاط داخل و روی سطح رسانا می‌شود و در واقع رسانا یک حجم هم‌پتانسیل است.

در اینجا خوب است به این نکته اشاره شود که با توجه به شرط تعادل الکتروستاتیکی، میدان الکتریکی باید عمود بر سطح رسانا باشد. چرا که در غیر این‌صورت، میدان الکتریکی 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.



پاسخ فعالیت ۱ـ۷

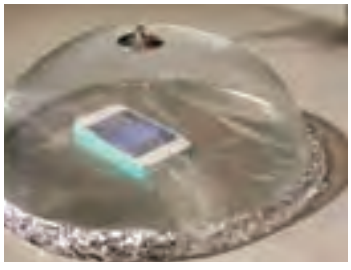
الف) قفس فاراده از موارد جالبی است که می‌توان دانش‌آموزان را تشویق کرد که با جست‌وجوی واژهٔ «Faraday's cage» به مطالب و تصاویر جالبی دست یابند و آنها را به کلاس ارائه کنند. در هر حال همان‌طور که در متن فعالیت آمده، قفس فارادی در واقع به انواع و اقسام مجموعه‌هایی گفته می‌شود که بر مبنای آزمایش فاراده موجب حفاظت الکتروستاتیکی می‌شوند. در واقع همان‌طور که در درس مطرح شد اگر یک رسانای خنثی را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار دهیم، الکترون‌های آزاد رسانا طوری روی سطح خارجی آن توزیع می‌شوند که میدان ناشی از آنها اثر میدان خارجی درون رسانا را خنثی و میدان خالص درون رسانا را صفر کنند. همچنین دیدیم بار خارجی روی جسم رسانا طوری روی آن توزیع می‌شود که میدان الکتریکی در داخل آن آن صفر شود.



همان‌طور که گفته شد از این فیزیک برای ساختن محافظ‌های الکتروستاتیکی استفاده می‌کنند. مثلاً فرض کنید می‌خواهیم یک دستگاه حساس الکترونیکی را از یک میدان الکتریکی نامطلوب حفظ کنیم. به این منظور دستگاه را درون یک جعبهٔ رسانا قرار می‌دهیم یا آن را با ورقه‌ای نازک از ماده‌ای رسانا می‌پوشانیم. میدان الکتریکی خارجی، نحوهٔ توزیع الکترون در پوشش رسانا را تغییر می‌دهد به‌طوری که میدان کل در هر نقطهٔ درون این جعبه، صفر شود. البته توزیع جدید بار، شکل خطوط میدان در مجاور آن را نیز تغییر می‌دهد. بنابراین، عملاً شکلی مانند شکل ۱ـ۳۱ کتاب خواهیم داشت، با این تفاوت که درون این شکل‌ها را خالی در نظر بگیرید تا بدین ترتیب، محلی برای ایجاد حفاظ ایجاد شود.

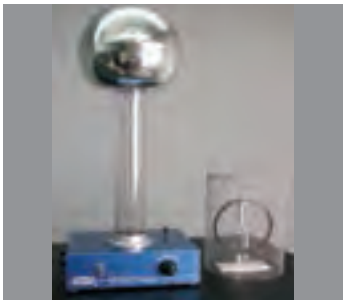
ب) چنین اتومبیلی درست مثل یک قفس فاراده، عمل می‌کند. بنابراین، اگر آذرخشی به اتومبیلی اصابت کند، بار روی سطح خارجی بدنهٔ اتومبیل، باقی می‌ماند. (در مواقع اضطراری، موقع خروج از اتومبیلی که به هر دلیلی دچار اصطلاحاً برق گرفتگی شده است، توجه کنید یک دست بر بدنه و پا روی زمین نباشد، بلکه باید جفت پا به بیرون بپرید.) همچنین توجه کنید که اگر بدنهٔ اتومبیل لاستیکی و یا سقف آن تاشو (و یا نارسانا) باشد، ممکن است هیچ محافظتی ایجاد نشود.

هواپیماها نیز به همین ترتیب، برای سرنشینان خود محافظت ایجاد می‌کنند، اما با این وجود، هواپیماها آسیب‌پذیرتر از اتومبیل‌ها هستند.

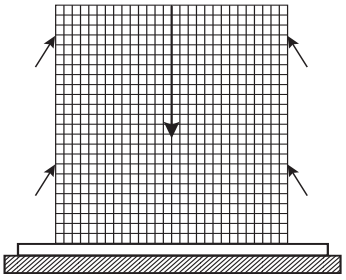


ب) دانش‌آموزان باید بر مبنای اصولی که در قسمت الف بیان شد، به طراحی چنین وسایلی بپردازند یا با وسایل موجود مانند اجاق میکروموج (در این مورد آزمایش‌های جالبی در اینترنت پیدا می‌شود)، تلفن همراه و ... این نظریه‌ها را محک بزنید. مثلاً تلفن همراه خود را در ظرفی با پوشش فلزی سربسته‌ای قرار دهند و به آن زنگ بزنند و...

در مولّد واندوگراف نیز همین اصول به‌کار رفته و بار توسط یک قطعهٔ رسانا از تسمه به روی کلاهک منتقل می‌شود و در نتیجه بار روی کلاهک و میدان اطراف آن به‌سرعت بزرگ‌تر و بزرگ‌تر می‌شود. با خود واندوگراف نیز می‌توان آزمایش‌های جالبی را طراحی کرد. مثلاً یکی از آزمایش‌های مشهور این است که نخست یک الکتروسکوپ توسط واندوگراف باردار کنیم و مشاهده کنیم عقربهٔ آن منحرف می‌شود. بعد با قرار دادن همان الکتروسکوپ در درون یک قفس فلزی همین آزمایش را تکرار می‌کنیم و درمی‌یابیم این بار عقربهٔ آن منحرف نمی‌شود.



همچنین می‌توان کاغذهای کوچک دوتا شده‌ای را روی توری قرار داد، طوری که یک تای کاغذ درون و تای دیگر آن بیرون توری قرار گیرد. خواهید دید پس از باردار کردن توری، فقط کاغذهای روی آن از توری فاصله می‌گیرند.



در این فیلم نمایشی از نوعی قفس فاراده را می‌بینید.

در این فیلم چگونگی محافظت از یک برق‌گرفتگی ناشی از یک کابل فشار قوی را می‌بینید.

توجه کنید در عمل باردار شدن قطره های روغن معمولاً نیاز به اعمال یک پتانسیل خارجی نیز هست، ولی در اینجا منظور نشان دادن اصول چنین رنگ‌آمیزی‌ای بوده است.

در این فیلم‌ها نمایشی از یک رنگ‌پاشی الکتروستاتیکی را می‌بینید.

توجه کنید در این کتاب هرجا با بارهای نقطه‌ای سرو کار داریم آن را با q و هرجا با توزیع بار پیوسته سرو کار داریم آن را با Q مشخص کرده‌ایم.

خوب است تأکید کنید برای رساناهایی با شکل نامشخص، گرچه چگالی در نواحی مختلف سطح متفاوت است ولی سطح چنین رسانایی هم‌پتانسیل است.

فیلم

در این فیلم نوعی از آزمایش توزیع بار روی سطح مخروط فلزی را می‌بینید.

در توضیح فعالیت ۱ـ۸، این فعالیت را در کنار خوب است بدانید تخلیهٔ هاله‌ای مطرح کنید و به‌خصوص شکل (الف) آن را در کلاس توضیح دهید.

پاسخ فعالیت ۱ـ۸

پس از رفت و برگشت‌های متوالی، گلوله‌ها در فاصلهٔ معینی از دو طرف دوک می‌ایستند به‌طوری که گلوله‌ای که با نوک تیز تماس پیدا کرده است در زاویهٔ بیشتری نسبت به امتداد قائم قرار می‌گیرد که همان‌طور که در خوب است بدانید «تخلیهٔ هاله‌ای» اشاره کردیم نشان‌دهندهٔ قوی‌تر بودن میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز است. به عبارتی، چگالی سطحی بیشتر بارها در نوک تیز به میدان الکتریکی بیشتری می‌انجامد.

تبصره : می‌دانیم بار الکتریکی گلوله‌ها در تماس با مولکول‌های هوا کم‌کم تخلیه می‌شود و گلوله‌ها به‌تدریج به حالت اولیه (راستای قائم) برمی‌گردند. سپس گلوله‌ها دوباره با دوک برخورد کرده و باردار می‌شوند و همان مراحل تکرار می‌گردد. ولی گلوله‌ای که به سر نوک تیز تماس پیدا کرده است چون بار بسیار بیشتری دارد زمان بیشتری هم طول می‌کشد تا بارهای خود را در هوا تخلیه کند و به حالت قائم بازگردد و دوباره باردار و دور شود. اما گلوله‌ای که از قسمت پهن بار دریافت کرده، بارش کمتر است و زمان کمتری طول می‌کشد تا بی‌بار شود و به حالت قائم بازگردد. این فرایند آن‌قدر ادامه می‌یابد تا بار جسم دوکی کاملاً تخلیه شود.

فیلم

در این فیلم چگونگی آزمایش فعالیت ۱ـ۸ را می‌بینید.

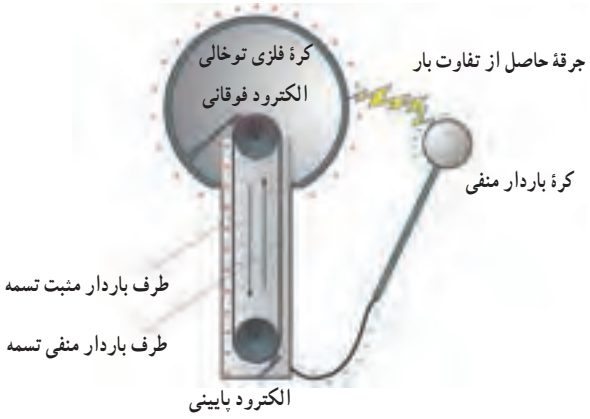
در این فیلم نوعی از تخلیهٔ هاله‌ای را می‌بینید.

فیلم

پاسخ فعالیت ۱ــ۹

هدف اصلی برقگیر آن است که مسیری ساده برای انحراف ضربهٔ یک آذرخش به سمت زمین را مهیا کند. بنابراین، برای آنکه برقگیر عمل کند باید به قسمت مرطوب و رسانای زیر سطح زمین، متصل گردد. برای عمل کردن برقگیر، میلهٔ آن باید از بالاترین نقطهٔ ساختمان بالاتر باشد. در آن صورت، نشان داده شده است که برقگیر، محافظتی شبیه یک قیف وارونه ایجاد می‌کند که رأس آن در نوک برقگیر است و آذرخشی که وارد این مخروط فرضی می‌شود، به جای برخورد با ساختمان، با برقگیر برخورد می‌کند. برخی بر این باورند که انتهای بالای برقگیر باید تیز باشد. این باور مبتنی بر این واقعیت است که یک نوک تیز میدان قوی‌تری نسبت به یک نوک پهن ایجاد می‌کند و بنابراین موجب محافظت بیشتری می‌شود. اما استدلال مغایر آن، این است که یک نوک تیز، یونیدگی مولکول‌های هوای اطراف برقگیر را افزایش می‌دهد که این خود باعث کاهش اثر حفاظتی برقگیر می‌شود. در هر حال آزمایش‌ها نشان داده است که غالباً آذرخش به نوکی نسبتاً پهن بیشتر از یک نوک تیز ضربه می‌زند. به این منظور آزمایش زیر را در نظر بگیرید که با یک اسباب آزمایشگاهی این رویداد را شبیه‌سازی می‌کند. نخست کلاهک مولّد وان‌دوگراف به تنهایی در نزدیکی گویی فلزی با دستهٔ عایق قرار دارد که خود توسط سیمی به زمین مولّد وان‌دوگراف متصل است. کلاهک مولّد شبیه یک ابر باردار و گوی فلزی شبیه رأس یک ساختمان بلند است. وقتی مولّد روشن باشد، کلاهک مولّد هر چند ثانیه یک بار به گوی فلزی جرقه‌ای بزرگ می‌زند که هم صدای آن شنیده می‌شود و هم نور آن دیده می‌شود. این شبیه ضربهٔ آذرخش به یک نوک پهن یا رأس یک ساختمان است.

در قسمت دوم آزمایش، میلهٔ نوک تیز Lشکلی را که با سیم به زمین مولّد وصل شده است، در بالای مولّد قرار می‌دهیم. این میلهٔ نوک تیز Lشکل، مشابه میلهٔ برقگیر است، در حضور میلهٔ نوک تیز، تخلیهٔ بار تدریجی بین کلاهک مولّد و این میله رخ می‌دهد و دیگر خبری از جرقه‌های بین کلاهک مولّد و گوی فلزی نخواهد بود. در این حالت اگر فضای آزمایشگاه را تاریک کنیم، هالهٔ روشنی در نزدیکی نوک تیز میله مشاهده خواهید کرد که نشانهٔ تخلیهٔ تدریجی بار است. جالب است که این پدیده حتی در حالتی که میله نوک تیز در فاصلهٔ دورتری از کلاهک، نسبت به فاصلهٔ گوی فلزی تا کلاهک، باشد همچنان رخ خواهد داد. به عبارتی، میلهٔ نوک تیز، با تخلیهٔ تدریجی، گوی را از برخورد جرقه محافظت کرده است.



فیلم

در این فیلم تخلیهٔ هاله‌ای در برج میلاد را می‌بینید.

چه اصولی را باید رعایت کنیم تا بار مولّد وان دوگراف بیشینه باشد.

۱ــ جاروبک‌ها هنگام چرخش دستگاه با سطح بیرونی تسمه مالش خیلی جزئی داشته باشند.

۲ــ تسمه علاوه بر غلتش روی غلتک‌ها، اندکی لغزش هم داشته باشد (تسمه نه زیاد شل و نه زیاد محکم باشد).

۳ــ تسمه و غلتک‌ها باید کاملاً تمیز باشند (می‌توان با الکل آنها را پاک کرد).

۴ــ پهنای تسمه با پهنای غلتک‌ها یکسان باشد.

۵ــ تسمه نباید سیاه رنگ باشد زیرا امکان دارد دارای کربن باشد، و اجسام با ترکیب‌های کربنی می‌توانند رسانا باشند.

۶ــ سرعت چرخش موتور حتی‌الامکان زیادتر باشد.

۷ــ در روزهای گرم و مکان‌های با رطوبت زیاد نتیجهٔ کار دستگاه (مثل سایر آزمایش‌های الکتریسیته ساکن) مناسب نمی‌تواند باشد.

فیلم

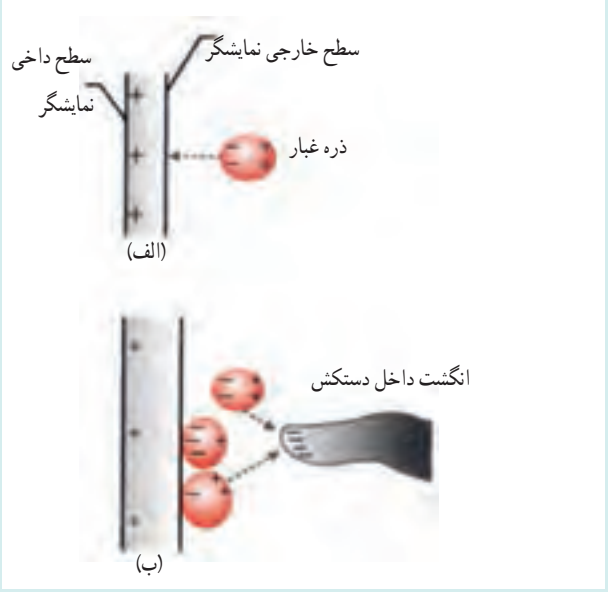
در این فیلم چگونگی و اساس کار مولّد وان دو گراف را می‌بینید.

دانستنی برای معلم

آلودگی میکروبی در بیمارستان و الکتروستاتیک

نیروهای الکتروستاتیکی می‌توانند نقش پنهانی در آلودگی میکروبی یک بیمارستان، مثلاً در حین یک عمل آندوسکوپی، داشته باشند. در عمل آندوسکوپی، یک جراح درون بدن بیمار را روی صفحهٔ نمایش یک ویدئو نگاه می‌کند. در یک نمایشگر (لامپی) قدیمی (نه در «نمایشگرهای با صفحه تخت»)، تصویر توسط الکترون‌هایی ایجاد می‌شود که مستقیماً به سمت صفحه‌ای حرکت می‌کنند که به‌طور مثبت باردار شده است. این صفحهٔ باردار، همچنین ذرات معلق در هوا، از قبیل ضایعات پنبه، گرد و غبار، و سلول‌های پوست را که در اطراف اتاق جراحی شناورند، به خود جذب می‌کند. اگر یک ذرهٔ معلق در هوا باردار منفی باشد، روی سطح خارجی این نمایشگر کشیده می‌شود. ولی اگر ذره از لحاظ الکتریکی خنثی باشد، برخی از الکترون‌های رسانش آن می‌توانند به آن سمتی کشیده شوند که در نزدیک‌ترین فاصله با صفحه قرار دارد، و بدین ترتیب در آن ذره، بار القا کنند (شکل الف). آنگاه چنین ذره‌ای به سمت سطح خارجی کشیده می‌شود.

چون بسیاری از ذراتی که روی سطح خارجی نمایشگر جمع شده‌اند حامل میکروب هستند، صفحهٔ نمایشگر با میکروب‌ها آلوده می‌شود. فرض کنید انگشت دست جراحی که دستکش به دست کرده است، برای اشاره به بخش خاصی از تصویر، مثلاً برای توضیح نکتهٔ جراحی مهمی به سایر اعضای تیم جراحی، به چند سانتی‌متری صفحهٔ نمایشگر برسد. صفحهٔ نمایشگر که باردار مثبت است، الکترون‌ها را از داخل انگشت به سمت نوک آن می‌کشد (شکل ب). آنگاه نوک انگشتان که به‌طور منفی باردار شده است موجب جمع شدن ذرات (ذرات معلق در هوا یا روی صفحه) بر روی نوک انگشت دستکش می‌شوند. وقتی در پی این کار، جراح با دستکش آلوده به بیمار دست می‌زند، میکروب‌ها روی آن می‌روند (یا بدتر از آن) داخل بدن بیمار می‌شوند. امروزه برای پرهیز از این خطر، جراحان آگاه شده‌اند که نباید انگشتان خود را نزدیک صفحهٔ نمایشگر ببرند.



مقطع صفحهٔ یک نمایشگر ویدیوئی قدیمی (لامپی). صفحه که به طور مثبت باردارشده است، در طرف نزدیکِ ذرهٔ غبار خنثی بار القا میکند (ب) انگشت داخل دستکش (به مقیاس نیست) که به نزدیکی صفحهٔ نمایشگر آمده است دارای بار القایی است و می تواند غبار را از هوا و صفحهٔ نمایشگر جذب کند.

آلودگی مشابهی می‌تواند با پیش‌بندهای پلاستیکی‌ای رخ دهد که معمولاً پرسنل بیمارستان برای مصون داشتن خود از خون بیماران، می‌پوشند. این پیش‌بندها موقع کنده شدن یا وقتی که مدام به لباس‌های زیر یا پوست بدن مالش پیدا می‌کنند، به‌خصوص در هوایی خشک، به میزان زیادی باردار می‌شوند. وقتی یک پیش‌بند باردار می‌شود، می‌تواند میکروب‌ها و غبارهای آلودهٔ هوا را به خود جذب کند. چون پرسنل بیمارستان هر از گاهی دست‌شان به پیش‌بند می‌خورد، میکروب‌ها ممکن است در حین یک آزمایش یا عمل جراحی به‌راحتی به بدن بیمار منتقل شوند.

برخی از خطرات تخلیهٔ الکتریکی

برخی از انواع پارچه‌ها هنگام تماس با پوست یا لباسی دیگر باعث انتقال بار می‌شوند. در این میان، پولور به خاطر تخلیهٔ جرقه‌ای به هنگام از تن درآوردن آن در یک هوای خشک شهره است. بچه‌ای که از یک سرسرهٔ پلاستیکی سُر می‌خورد، ممکن است چنان باردار شود که در پایین سرسره پتانسیل الکتریکی‌ای برابر با ۱۰۰۰۰ ولت داشته باشد. اگر این بچه به جسم دیگری، به‌خصوص رسانایی متصل به زمین دست بزند، ممکن است جرقهٔ بسیار دردناکی بین بچه و جسم جهش کند تا موجب خنثی شدن بار بچه شود.

تخلیهٔ جرقه‌ای در عمل جراحی می‌تواند یک خطر بسیار جدی باشد. اگر بخار قابل اشتعالی وجود داشته باشد، یک جرقه می‌تواند بخار را آتش بزند. ولی استفادهٔ گسترده از مواد بیهوشی قابل اشتعال در دههٔ ۵۰ میلادی پایان یافت و در نتیجه این خطر کاهش یافته است. تخلیهٔ جرقه‌ای بین دو سطح، اگر یکی از آن دو در داخل بدن باشد نیز می‌تواند شخص را به کشتن دهد. در حالت طبیعی، پوست مقاومت زیادی در برابر جریان الکترون‌ها از خود نشان می‌دهد و بدین ترتیب از قلب محافظت می‌کند. ولی اگر جریان الکترون‌ها مستقیماً با شاره‌های رسانای درون بدن تماس پیدا کند، این جریان در قلب می‌تواند برای اختلال در تنظیم الکتریکی طبیعی ضربان قلب، کافی باشد. احتمال وقوع چنین میکروشوکی چنان برای تیم های جراحی نگران‌کننده است که لباس آنها طوری انتخاب می‌شود که احتمال تخلیهٔ جرقه‌ای را کاهش دهد، و کفش‌های آنها معمولاً قدری رسانا هستند تا بار الکتریکی به محض ایجاد، به کف اتاق منتقل شود. کف اتاق نیز قدری رساناست تا این بار الکتریکی بتواند به سمت یک اتصال زمینی حرکت کند.

کارمندان اداری و صنعتی‌ای که از رایانه یا تجهیزات الکترونیکی حساس دیگر استفاده می‌کنند اغلب از مچ‌بندهایی متصل به زمین استفاده می‌کنند تا یک مسیر رسانش در بین آنها و زمین ایجاد شود. رسانایی این مسیر معمولاً خیلی زیاد نیست تا بار الکتریکی روی بدن شخص، نه به‌سرعتِ یک تخلیهٔ جرقه‌ای، بلکه به تدریج کاهش یابد.

یک اتومبیل در حال حرکت بر اثر تماس بین لاستیک چرخ و آسفالت، که الکترون‌ها را از یک سطح به سطح دیگر منتقل می‌کند، باردار می‌شود؛ زیرا نیروهای الکتریکی جاذب وارد بر یک سطح بر نیروهای الکتریکی جاذب وارد بر سطح دیگری غلبه می‌کنند. فرض کنید الکترون‌ها از آسفالت به سمت چرخ کشیده می‌شوند. در آن صورت، این الکترون‌ها می‌توانند در چرخ و در اتصالات فلزی اتومبیل به حرکت درآیند و اتومبیل را تا پتانسیلی برابر با ۱۰۰۰۰ ولت و یا حتی بیشتر، باردار کنند.

اگر اتومبیل، و نیز در نتیجه انتقال بار در تماس بین چرخ و آسفالت، متوقف شود، بار اتومبیل از طریق چرخ‌ها خارج می‌شود. ولی سرعت این تخلیهٔ بار به میزان رسانایی لاستیک چرخ‌ها بستگی دارد. اگر آنها از سیاه کربنی[1] رسانا (که توسط پلیمرها به هم چسبیده شده‌اند) ساخته شده باشند (که توسط پلیمرها به یکدیگر پیوند خورده‌اند)، ممکن است تخلیه بار زمان زیادی به طول انجامد.

فرض کنید لاستیک چرخ‌های اتومبیل شما رسانای نسبتاً خوبی باشد، و در نتیجه بیش از یک دقیقه طول بکشد تا بار الکتریکی اتومبیل تا حدّ زیادی تخلیه شود. همچنین فرض کنید به محض توقف اتومبیل بخواهید از آن خارج شوید و فقط یک دستهٔ پلاستیکی (نارسانا) را لمس می‌کنید تا در آن باز شود. [بعد از خروج] وقتی برمی‌گردید که در فلزی را فشار دهید تا بسته شود، الکترون‌های فراوان روی اتومبیل در فاصلهٔ هوای بین اتومبیل و انگشت شما جهش می‌کنند، و در نتیجه مقداری از آنها می‌توانند در بدن شما پخش شوند و یا از طریق بدن شما به سمت زمین حرکت کنند. بنابراین، جرقه‌ای بین اتومبیل و شما جهش می‌کند. این یک شیوهٔ غیرکافئینی برای بیدار شدن پس از رانندگی به سمت محلّ کار یا دانشگاه در اولّ صبح است. ولی اگر می‌خواهید

۱ــ carbon black. ماده‌ای است که از سوختن ناقص مواد نفتی غلیظ مانند قیر حاصل می‌شود و با دوده (soot) متفاوت است چراکه نسبت مساحت سطح به حجم آن از دوده بیشتر است.

از این شوک الکتریکی دوری کنید، یا چند دقیقه بیشتر صبر کنید تا به بار اجازه دهید که تخلیه شود و یا در را با پا و یا باسن خود ببندید. یک جسم پهن مثل باسن شما، احتمال یونیدگی مولکول‌های هوا را که باعث تخلیهٔ جرقه‌ای می‌شود، کاهش می‌دهد.

وقتی سوار اتومبیل هستید، اگر فقط قسمت‌های پلاستیکی (نارسانای) داخل اتومبیل را لمس کنید، از لحاظ الکتریکی خنثی باقی خواهید ماند. ولی همچنان بر اثر القا، باردار می‌شوید. یعنی، الکترون‌های متحرک در بدن شما می‌خواهند از الکترون‌هایی که روی بخش‌های رسانای اتومبیل در اطراف شما جمع شده‌اند، دور شوند. فرض کنید در همان حالی‌که چنین باردار شده‌اید به سمت یک باجهٔ عوارضی رانندگی می‌کنید. اگر شما و متصدی باجهٔ عوارضی (متصل به زمین)، برای مبادلهٔ پول یا کارت عوارضی، فوراً دست خود را بیرون بیاورید، از آنجاکه الکترون‌های روی بدن شما سعی می‌کنند از یکدیگر دور شوند، ممکن است جرقه‌ای بین شما و متصدی باجه جهش می‌کند.

بعید است چنین جرقه‌ای در روزهای مرطوب ایجاد شود، زیرا رطوبت هوا سریعاً هم بار روی شما و هم بار روی اتومبیل را خنثی می‌کند. بنابراین، احتمالاً در یک روز خشک، متصدی باجهٔ عوارضی پیش از بیرون آوردن دست خود چند ده ثانیه‌ای صبر می‌کند تا اجازه دهد بار الکتریکی اتومبیل تخلیه و بار الکتریکی القا شده بر روی شما کاهش یابد. ولی، اگر در صف ایستاده باشید، احتمالاً این بارهای الکتریکی تا زمان رسیدن شما به باجه، تخلیه شده‌اند.

برخی آتش‌ها در پمپ‌های بنزین که بر اثر جریان بنزین به درون باک ایجاد می‌شد، ناشی از نحوهٔ طراحی درِ باک بوده است، اما امروزه این نحوهٔ طراحی اصلاح شده است. مشکل این بود که بنزین هنگام جریان یافتن در لوله یا شیلنگ بنزین باردار می‌شود. آن بخشی از بنزین که دقیقاً چسبیده به جدارهٔ لوله است، و لایه مرزی خوانده می‌شود، حرکت نمی‌کند. وقتی بقیهٔ بنزین از کنار این لایه مرزی می‌گذرد، الکترون‌ها از لایهٔ مرزی به بنزین متحرک، انتقال می‌یابند. در نتیجه، لایهٔ مرزی دارای بار مثبت می‌شود و بنزینی که باردار منفی شده است وارد باک می‌گردد.

اگر باک پلاستیکی و در نتیجه نارسانا باشد، این بارِ منفی بر روی سطح داخلی باک جمع می‌شود و الکترون‌ها را در هر بخش رسانای اتومبیل که نزدیک آن باشد، دفع می‌کند. این الکترون‌های دفع شده، از باک دور می‌شوند و برخی از آنها ممکن است در نزدیکی شیلنگ بنزین قرار گیرند. اگر آنها به شیلنگ جرقه بزنند، این جرقه می‌تواند بخار بنزینی را که در حین جریان یافتن بنزین آزاد شده است، مشتعل کند. برای حلّ این مشکل، کاری کرده‌اند که شیلنگ، اتومبیل را به زمین اتصال دهد تا بار الکتریکی نتواند بر روی اتومبیل و در نزدیکی شیلنگ جمع شود.

حتی اگر اتومبیل حرکت نکند نیز شخص می‌تواند در درون اتومبیل، باردار شود؛ زیرا ارتباط بین لباس شخص و صندلی اتومبیل می‌تواند به انتقال بار زیادی بیانجامد. فرض کنید شخصی با گذاشتن پمپ در حالت خودکار، شروع به بنزین زدن کند و سپس بنا به دلایلی دوباره به اتومبیل خود برگردد. او پس از سُر خوردن بر روی صندلی اتومبیل، با بار الکتریکی فراوان به محلّ پمپ بازمی‌گردد. اگر جرقه‌ای بین این شخص و پمپ جهش کند، می‌تواند بخار بنزین را مشتعل سازد و موجب شروع آتشی شود. شخص می‌تواند با نرفتن به درون اتومبیل و یا با خنثی کردن این بار با لمس یک میلهٔ فلزی پیش از تماس با نازل، از این خطر دوری کند.

یک اتومبیل مسابقه پس از حرکت بسیار سریع و در نتیجه انباشتن مقدار زیادی بار الکتریکی بر اثر تماس چرخ با جاده، ممکن است در یک ایستگاه سرویس‌دهی توقف کند. خدمهٔ ایستگاه اغلب بایستی به‌سرعت سوخت‌رسانی به اتومبیل را، با یک شیلنگ و یا گالن‌های سوخت، آغاز کنند. این عمل باعث ایجاد سریع بخار سوخت در باک اتومبیل می‌گردد. برای اجتناب از جرقه‌زنی در این بخار، که می‌تواند فاجعه‌آمیز باشد، یا اتومبیل به محض توقف به زمین اتصال داده می‌شود (می‌توان یک میلهٔ رسانای بلند را به بدنهٔ فلزی اتومبیل وصل کرد) و یا از چرخ‌هایی برای اتومبیل استفاده کرد که رسانای خوبی باشند تا بار الکتریکی به سرعت

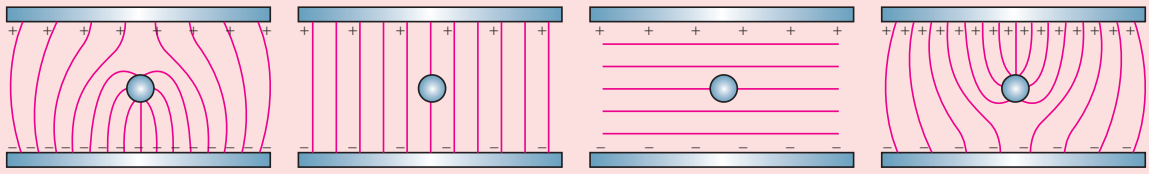
از طریق آنها تخلیه گردد. اما، راه حل دوم همیشه مطلوب نیست، زیرا چرخ‌های رسانا (به یاد آورید که آنها از سیاه کربن ساخته می‌شوند) سریع‌تر از چرخ‌هایی که رسانا نیستند (که از سیلیس ساخته می‌شوند) می‌پوسند.

در دههٔ ۷۰ میلادی، یک انفجار در گرد خرده‌های شکلات هنگامی رخ داد که این گرده‌ها از طریق لوله‌های پلاستیکی به سیلویی دمیده شدند. وقتی ذرات گرد از کیسه‌ها به درون لوله ها تکانده می‌شد، و هنگامی که آنها در حین عبور از لوله‌ها به یکدیگر و به جدارهٔ لوله‌ها می‌خوردند، باردار شدند. وقتی آنها از آخرین لوله به درون سیلو پرتاب شدند، جرقه‌ای بین دانه‌ها و نقطه‌ای متصل به زمین در سیلو جهش نمود. ممکن است این جرقه، با فرو افتادن دانه‌های معلق بر روی تلی که از قبل در سیلو شکل گرفته بود، و یا هنگامی که دانه‌ها از شیب تل به پایین سر می‌خورند، در نوک مخروطی که روی تل شکل گرفته بود آغاز شده باشد. (میدان الکتریکی در نوک این مخروط و یا در نزدیکی آن بیشترین مقدار را داشت، و بنابراین تخلیهٔ جرقه‌ای که در آن یک میدان الکتریکی قوی مولکول‌های هوا را یونیده می‌کند، می‌توانست از آنجا آغاز شده باشد.)

در واقع، احتمالاً جرقه‌های متعددی در سیلو رخ داده بود، که البته انرژی‌ای کافی برای مشتعل ساختن دانه‌ها را نداشت. انفجار هنگامی رخ داد که، تصادفاً، انرژی یک جرقه (یا شاید ترکیبی از چند جرقهٔ تقریباً هم‌زمان) بیشتر از مقدار کمینهٔ لازم برای یک انفجار شد. مهندسان نمی‌توانند بار استاتیک و تخلیهٔ جرقه‌ای در صنایع پودری را حذف کنند، بلکه تلاش می‌کنند انرژی جرقه‌زنی را پایین‌تر از مقدار کمینهٔ لازم نگه دارند.

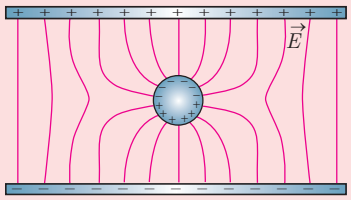
پرسش های پیشنهادی

۱ آیا هیچ کدام از شکل‌های زیر میدان خالص درون یک خازن در حضور رسانای خنثی را به‌درستی نشان می‌دهد؟



(الف) (ب) (پ) (ت)

پاسخ : هیچ کدام. در حضور میدان الکتریکی، در سطح بالایی کرهٔ خنثی، بار مثبت و در سطح پایینی آن بار منفی القا می‌شود و شکلی مانند شکل زیر خواهیم داشت.



۲ دو گوی بدون بار X و Y روی پایهٔ عایقی قرار گرفته‌اند و به آنها گوی باردار مثبت Z را نزدیک می‌کنیم. سپس گوی‌های X و Y با سیم رسانایی به هم متصل می‌گردند. پس از برداشتن این سیم و دور کردن گوی Z، بار گوی‌های X و Y چگونه می‌شود؟

پاسخ : گوی X بار مثبت و گوی Y بار منفی پیدا می‌کند.

۳ با توجه به اینکه شدت میدان الکتریکی در سطح زمین حدود ۱۳۰ V/m است، بنابراین باید اختلاف پتانسیلی بیش از ۲۰۰V بین سر و پای هر شخص وجود داشته باشد. پس چرا کسی این میدان را حس نمی‌کند؟

زمین

پاسخ : بدن انسان رسانا است و بنابراین سطح آن در میدانی که بارها در تعادل‌اند باید هم‌پتانسیل باشد و در نتیجه بین نقاط مجزای آن نمی‌تواند اختلاف پتانسیلی وجود داشته باشد. وقتی شخص در این فضا قرار می‌گیرد، میدان الکتریکی مانند شکل روبه‌رو تغییر شکل می‌دهند.

۴ چرا اگر یک قوطی اسپری را به یک شعلهٔ روباز اسپری کنید، ممکن است اسپری شعله بکشد؟

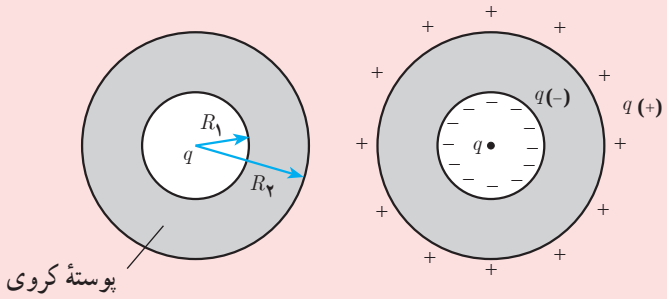
پاسخ : وقتی یک پودر را اسپری می‌کنید، دانه‌های پودر و خود قوطی ممکن است باردار شوند. اگر قوطی با جسم رسانایی (مثل یک شخص) در تماس باشد، بار الکتریکی می‌تواند آنقدر افزایش یابد تا اینکه برای قوطی و پودر اسپری‌شده باری کافی برای جرقه زدن در یکدیگر ایجاد شود. اگر این جرقه انرژی لازم را فراهم آورد، پودر اسپری می‌تواند مشتعل شود.

۵ چرا اگر یک نوار چسب را در نزدیکی آنتن رادیویی که بر روی یک کانال تنظیم شده است از غلتک آن جدا کنید، نوفه (نویزی) در رادیو ایجاد می‌شود؟

پاسخ : وقتی نوار چسب از غلتک جدا می‌شود، بارهای مثبت و منفی در تکه‌هایی بر روی دو سطح جمع می‌شوند. از تخلیهٔ این بارها در هوا که عمدتاً از مولکول‌های نیتروژن تشکیل شده است، این مولکول‌ها تقریباً بی‌درنگ با گسیل نوری در انتهای آبی طیف مرئی وا انگیخته می‌شوند و تابش ضعیفی در امتداد خطی که نوار در آنجا از غلتک جدا می‌گردد ایجاد می‌شود که ممکن است در فضایی کاملاً تاریک دیده شوند. این جرقه‌ها در طیف بسامد رادیویی نیز گسیل می‌شوند. بنابراین وقتی نوار چسب در نزدیکی یک آنتن رادیو کنده می‌شود، آنتن برخی از این گسیل‌ها در محدودهٔ بسامد رادیویی را نیز دریافت می‌کند.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ بار $q = +۸/۰\ \mu C$ که در مرکز یک پوستهٔ کروی فلزی قرار دارد، بر اثر القا، بارهای الکتریکی منفی و مثبت را در سطوح داخلی و خارجی پوسته ایجاد می‌کند. اگر شعاع داخلی این پوسته ۴/۰ cm و شعاع خارجی آن ۸/۰ cm باشد، چگالی سطحی بار را در سطوح داخلی و خارجی محاسبه کنید.



پاسخ : همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، بر روی پوستهٔ داخلی، بار منفی و بر روی پوستهٔ خارجی، بار مثبت القا می‌شود که اندازهٔ آن همان $۸/۰\ \mu C$ است. بنابراین، با توجه به تعریف چگالی سطحی بار داریم :

$$\sigma_{\text{داخلی}} = \frac{q_{\text{داخلی}}}{\text{مساحت سطح داخلی}} = \frac{-۸/۰\times۱۰^{-۶}\,C}{۴\pi\,(۴/۰\times۱۰^{-۲}\,m)^۲} = ۳/۹\times۱۰^{-۴}\,C/m^۲$$

$$\sigma_{\text{خارجی}} = \frac{q_{\text{خارجی}}}{\text{مساحت سطح خارجی}} = \frac{+۸/۰\times۱۰^{-۶}\,C}{۴\pi\,(۸/۰\times۱۰^{-۲}\,m)^۲} = ۹/۹\times۱۰^{-۵}\,C/m^۲$$

همان‌طور که می‌بینیم، با اینکه بار القا شده بر روی دو سطح یکسان است، اما بزرگی چگالی بار الکتریکی در سطح داخلی چهار برابر سطح خارجی شده است.

فعالیت‌های پیشنهادی

۱ استوانهٔ شفافی را اختیار کنید که دو قاعدهٔ آن رسانا هستند. گلوله‌های سبک رسانایی را درون استوانه قرار می‌دهیم. وقتی استوانه به کلاهک مولّد واندوگراف وصل شود، گلوله‌ها شروع به حرکت رفت و برگشت می‌کنند و پس از مدتی، گلوله‌ها به حالت معلق درمی‌آیند. دلیل آن را توضیح دهید.

پاسخ : وقتی استوانه به کلاهک وصل می‌شود، قاعدهٔ پایینی و گلوله‌های دارای بار الکتریکی همنام می‌شوند، در نتیجه گلوله به طرف بالا پرتاب می‌شوند. گلوله‌ها با برخورد به قاعدهٔ بالایی، بار خود را به قاعدهٔ بالایی داده، می‌افتند و دوباره باردار شده و به بالا پرتاب می‌شوند. این عمل آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا دو صفحه هم‌پتانسیل شوند. در این حال گلوله‌ها به حالت معلق در استوانه درمی‌آیند.

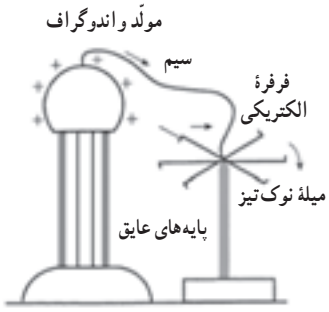
فیلم

در این فیلم نوعی از این فعالیت را می‌بینید.

۲ یک کرهٔ فلزی توپُر بدون بار را که دارای دستهٔ عایقی است توسط یک ماژیک یا روان‌نویس به دو قسمت تقسیم می‌کنیم و سپس یک قسمت آن را به کلاهک مولّد واندوگراف تماس می‌دهیم. قسمتی که با مولّد در تماس نبود را به یک الکتروسکوپ نزدیک می‌کنیم. عقربهٔ الکتروسکوپ انحراف نشان می‌دهد. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

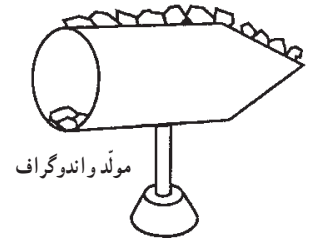
پاسخ : بار داده شده به جسم رسانا در محل داده شده ساکن نمانده است و در جسم توزیع شده است.

۳ الف) مطابق شکل، فرفره‌ای فلزی را روی سوزنی نوک‌تیز قرار داده و توسط سیم، مرکز فرفره را به کلاهک مولّد واندوگراف وصل می‌کنیم. با روشن کردن مولّد واندوگراف، فرفره شروع به چرخش می‌کند و در جهت نشان داده شده می‌چرخد. علت را توضیح دهید.



پاسخ : مولکول‌های هوا وقتی به نوک تیز فرفره که تراکم بار در آنجا زیاد است، برخورد می‌کنند، یونیده می‌شوند و نوک فرفره این مولکول‌های یونیده را به عقب می‌راند. طبق قانون سوم نیوتون مولکول‌ها نیز به فرفره نیرویی در خلاف جهت، وارد می‌کنند که سبب چرخش فرفره می‌شود

۴ تکه‌های کاغذ سبک را داخل و بیرون مخروط فلزی قرار دهید و آن را به مولّد واندوگراف وصل کنید. تکه‌های کاغذ در کدام قسمت از بقیهٔ قسمت‌ها بیشتر پرتاب می‌شوند؟ تکه‌های کاغذ در کدام قسمت، پرتاب نمی‌شوند؟ از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



پاسخ : با انجام این آزمایش یا معادل آن دانش‌آموزان نتیجه می‌گیرند که «چگالی سطحی بار در نقاط نوک‌تیز یا برجسته از سایر مکان‌ها بیشتر است».

۵ مولّد واندوگرافی را باردار می‌کنیم و آونگی با گلولهٔ کوچک فلزی را به کلاهک دستگاه نزدیک می‌کنیم تا جذب شود و آن را طوری نگه می‌داریم تا بتواند با کلاهک تماس پیدا کند و سپس رانده شود. از دانش‌آموزان می‌خواهیم آنچه مشاهده کردند را شرح دهند و علت جذب اولیه و دفع شدن بعدی را توضیح دهند.

در حالی که آونگ از کلاهک رانده و دور می‌شود از یکی از دانش‌آموزان می‌خواهیم کف دست خود را طوری به گلولهٔ آونگ نزدیک کند تا با آن تماس پیدا کند. گلوله بین دست او و کلاهک رفت و برگشت می‌کند که صحنهٔ جذابی است. از دانش‌آموزان می‌خواهیم همراه با گروه خود علت این رفتار آونگ را بررسی و نتیجه را به کلاس گزارش کنند.

۶ مقالهٔ زیر که دانلود آن آزاد است، آزمایش‌هایی از این دست را با جزئیات بیشتر و تصاویر آموزشی توضیح می‌دهد رجوع به آن را حتماً توصیه می‌کنیم.

Electrostatics experiments with sharp metal points. Phys. Edu. 51 (2016) 065019

فیلم

در این فیلم‌ها نوعی از آونگ‌های الکتریکی را می‌بینید.

در این مورد می‌توانید به عکاسی استروبوسکوپی نیز اشاره کنید. مثلاً شکل زیر، مربوط به عبور گلوله از درون یک سیب است. در عکاسی استروبوسکوپی از فلاشی استفاده می‌شود که دارای انرژی بسیار و توان بالایی هستند که در زمان بسیار کوچک انرژی را آزاد می‌کنند. در شکل، گلوله با سرعت $900\ m/s$ حرکت می‌کند و نور فلاش دربازهٔ زمانی $0/3\ \mu s$ جرقه می‌زند. این مطلب نشان می‌دهد که گلوله طی زمان فلاش زدن $0/3\ mm$ حرکت کرده است. توان لازم برای عکس انداختن از سیب در این حالت $15MW$ است. اشاره شود که به این موضوع در مبحث انرژی خازن خواهید پرداخت.

۱ــ۱۰ــ خازن

توجه کنید باری که جریان می‌یابد همان الکترون‌هایی هستند که توسط میدان الکتریکی‌ای که باتری در سیم‌ها ایجاد می‌کند در طول سیم‌ها به حرکت واداشته می‌شوند. میدان الکتریکی، الکترون‌ها را از صفحهٔ متصل به پایانهٔ مثبت باتری به حرکت درمی‌آورد. در نتیجه، این صفحه با از دست دادن الکترون دارای بار مثبت می‌شود. این میدان، درست همین تعداد الکترون را از پایانهٔ منفی باتری به صفحه‌ای می‌راند که از طریق کلید به پایانهٔ منفی باتری متصل است. در نتیجه، این صفحه با به‌دست آوردن الکترون دارای بار منفی می‌شود که درست به همان اندازه‌ای است که صفحهٔ دیگر با از دست دادن الکترون دارای بار مثبت شده است.

در اینجا خوب است در مورد چگونگی باردار شدن خازن و اینکه واقعاً چرا بار دو صفحه از نظر اندازه با هم برابر می‌شوند توضیح دهید. به‌خصوص این استدلال برای مبحث انرژی خازن نیز به‌کار می‌آید.

یک خطای رایج آن است که برخی تصور می‌کنند باتری با تولید بار، خازن را باردار می‌کند. تأکید شود آنچه باتری انجام می‌دهد صرفاً ایجاد میدان الکتریکی در سیم‌ها است. باری که از طریق سیم رسانا جریان می‌یابد همان الکترون‌هایی هستند که توسط میدان الکتریکی‌ای که باتری در سیم‌ها ایجاد می‌کند در طول سیم‌ها به حرکت واداشته می‌شوند. میدان الکتریکی، الکترون‌ها را از صفحهٔ متصل به پایانهٔ 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 پایانهٔ منفی باتری به صفحه‌ای می‌راند که از طریق کلید به پایانهٔ منفی باتری متصل است. در نتیجه، این صفحه با به‌دست آوردن الکترون دارای بار منفی می‌شود که درست به همان اندازه‌ای است که صفحهٔ دیگر با از دست دادن الکترون دارای بار مثبت شده است. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحهٔ خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانهٔ باتری یکسان شود. از این لحظه به بعد در سیم‌ها دیگر میدان الکتریکی نداریم و الکترون‌ها دیگر به حرکت واداشته نمی‌شوند. در این لحظه خازن باردار شده است. با توجه به اینکه صفحه‌های خازن رساناست تمام نقاط هر صفحه پتانسیل یکسانی دارد و خطوط میدان الکتریکی عمود بر این صفحه‌ها و از صفحهٔ مثبت به سمت صفحهٔ منفی است. وقتی یک خازن باردار می‌شود، صفحه‌های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی علامت مخالف می‌شود : $+Q$ و $-Q$.

گرچه در متن به‌طور نهان اشاره شده است، ولی خوب است دانش‌آموزان به‌وضوح دریابند که در خازن محدودیتی در افزایش مقدار بار براثر افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی وجود دارد که این محدودیت را عاملی به نام ظرفیت خازن بروز می‌دهد و همچنین خوب است به ولتاژ بیشینه اشاره شود که بیشترین ولتاژی است که می‌تواند بین دو صفحهٔ خازن برقرار شود بی‌آنکه به ساختمان خازن صدمه زده شود. در واقع دلیل اینکه با زدن دو شاخهٔ تلفن به پریز برق، تلفن اصطلاحاً «می‌سوزد» همین است. در اثر وصل شدن خازن به ولتاژ $220\,V$ برق شهر، خازن تاب نمی‌آورد و می‌سوزد. البته بحث کامل‌تر آن را می‌توانید با توضیح مبحث فروشکست و حاشیه‌ای که برای آن آمده است، ارائه کنید.

از لحاظ جنبهٔ تاریخی خوب است اشاره شود که در واقع در سال ۱۷۴۵ میلادی دو آزمایشگر آلمانی به نام‌های جی. *فون کلایست*[۱] و پی. *وان ماشن‌بروک*[۲] به‌طورمستقل این خازن ابتدایی را طراحی کرده و ساختند.

در این فیلم با اساس کار بطری لیدن آشنا شوید.

فیلم

۱ــ۱۱ــ خازن با دی‌الکتریک

دانستنی برای معلم

مفهوم ظرفیت خازن و رابطهٔ آن با اختلاف پتانسیل الکتریکی

در شکل ۱ــ الف ارتفاع آب در دو ظرف با ظرفیت‌های متفاوت یکی است. همان‌طور که می‌دانیم، اختلاف پتانسیل گرانشی سطح آب در دو ظرف به ارتفاع سطح آب در آنها بستگی دارد. چون ارتفاع سطح آب در دو ظرف یکسان است، بنابراین اختلاف پتانسیل گرانشی سطح آب در دو ظرف مساوی است. از شباهت ظرف‌های آب با مداری که در آن یک خازن و باتری (با اختلاف پتانسیل الکتریکی V) وجود دارد می‌توان مفهوم ظرفیت خازن و رابطهٔ آن با اختلاف پتانسیل الکتریکی و مقدار بار روی خازن را بهتر بیان کرد.

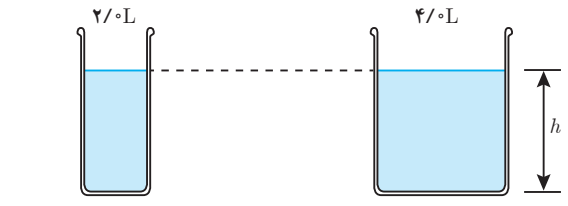
با وجود اینکه اختلاف پتانسیل گرانشی در دو ظرف یکی است، به دلیل بزرگ‌تر بودن یکی از ظرف‌ها، مقدار آب موجود در آن بیشتر است. و با وجود اینکه اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو خازن یکی است، به دلیل بیشتر بودن ظرفیت یکی از خازن‌ها، مقدار بار الکتریکی ذخیره شده در آن بیشتر است.

مطلب بالا را می‌توان برای دو ظرف با ظرفیت‌های یکسان ولی مقدار آب مختلف (ارتفاع آب در آنها متفاوت است زیرا سطح مقطع ظرف‌ها را یکی فرض می‌کنیم) و تشابه آن با دو خازن با ظرفیت‌های مساوی ولی متصل به باتری‌هایی با اختلاف پتانسیل‌های الکتریکی متفاوت تعمیم داد (شکل ۲).

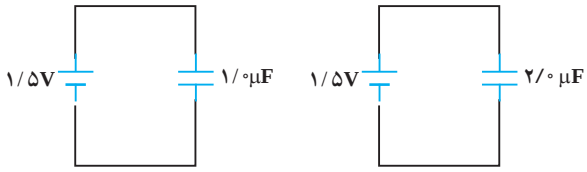
۱ــ G. Von Kliest

۲ــ P. Van Musschenbrock

با وجود اینکه ظرفیت دو ظرف یکی است، به دلیل اختلاف پتانسیل گرانشی سطح آب‌ها در دو ظرف، مقدار آب موجود در آنها متفاوت است. و با وجود اینکه ظرفیت دو خازن یکی است، به دلیل اختلاف پتانسیل الکتریکی متصل به صفحه‌های خازن‌ها، مقدار بار الکتریکی ذخیره شده در آنها متفاوت است.



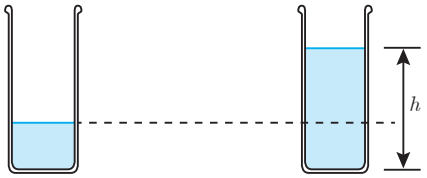
(الف)



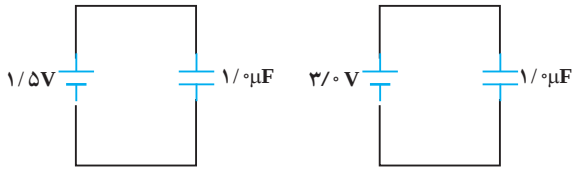
$q_1 = C_1V_1 = ۱/۵\,\mu F$ $q_2 = C_2V_2 = ۳/۰\,\mu F$

(ب)

شکل ۱



(الف)



$q_1 = C_1V_1 = ۱/۵\,\mu F$ $q_2 = C_2V_2 = ۳/۰\,\mu F$

(ب)

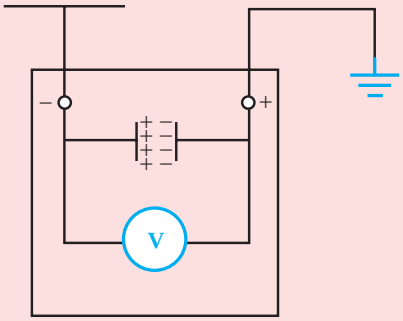
شکل ۲

پرسش‌های پیشنهادی

۱ آیا می‌توان مولّد واندوگراف را به‌عنوان مخزن و انباری برای ذخیره کردن بارهای الکتریکی در نظر گرفت؟ چگونه می‌توان از ذخیره شدن بارهای الکتریکی در آن مطمئن شد؟

پاسخ : بله، با نزدیک شدن گلوله‌ای رسانا که بر روی پایهٔ عایقی قرار دارد می‌توانیم پدیدهٔ تخلیهٔ الکتریکی را که ناشی از حرکت بارهای ذخیره‌شده در مولّد واندوگراف در اثر نزدیک شدن گلوله است مشاهده کرد.

۲ الف) اگر یکی از دو صفحهٔ رسانای موازی هم‌اندازه، مقابل و نزدیک یکدیگر را به اندازهٔ $q+$ باردار کنیم، به نظر شما تأثیر بارها بر روی صفحهٔ رسانای دیگر که وصل به زمین است، چیست؟



پاسخ : بار $q+$ صفحهٔ رسانای اوّل در اثر القای الکتریکی، بار $q-$ را در صفحهٔ مقابل القا می‌کند.

ب) اگر دو صفحهٔ رسانای حالت الف را با یک سیم رسانا به یکدیگر وصل کنیم چه اتفاقی می‌افتد؟ آیا بار ذخیره شده کاهش می‌یابد؟ تا چه اندازه؟

پاسخ : بارهای منفی از طریق سیم رسانا به صفحهٔ باردار مثبت می‌روند و در نهایت، بار دو صفحه چون مساوی و مخالف یکدیگرند، بار کل صفر می‌شود.

پ) آیا می‌توان گفت در حالت اوّل بار ذخیره‌شده روی صفحه‌ها q و در حالت دوم بار ذخیره‌شده صفر است؟

پاسخ : بله.

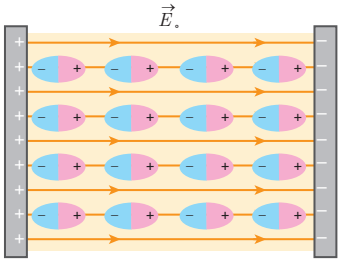
در اینجا خوب است برای دانش‌آموزان مستعدتر مبحث کامل شود و همان‌طور که در پاسخ پرسش ۱ــ۶ اشاره شده است با رسم شکل نشان داد که میدان‌های الکتریکی حاصل از دوقطبی‌ها می‌کوشند میدان الکتریکی اعمال شدهٔ خارجی را تضعیف کنند. به‌عبارتی میدان الکتریکی‌ای ایجاد می‌شود که جهت آن در خلاف جهت میدان الکتریکی اولیهٔ بین صفحه‌های خازن است و بنابراین میدان الکتریکی برایند، گرچه همچنان در جهت میدان الکتریکی اولیه است، ولی بزرگی آن کوچک‌تر است و موجب تضعیف میدان الکتریکی اولیه می‌شود. با تضعیف میدان الکتریکی، اختلاف پتانسیل بین صفحه‌ها نیز کاهش می‌یابد و بدین ترتیب ظرفیت خازن افزایش پیدا می‌کند. در این استدلال توجه کنید که خازن به باتری متصل نیست.

پاسخ پرسش ۱ــ۶

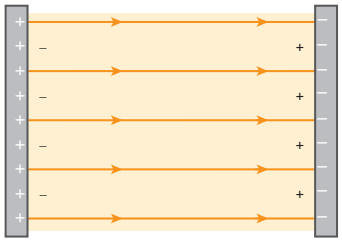
به این پرسش به دو صورت می‌توان پاسخ داد. یک روش، با توجه به طرح درس کتاب است و اینکه بگوییم چون ظرفیت خازن با حضور دی‌الکتریک افزایش می‌یابد، بنابراین طبق رابطهٔ $V=Q/C$ ، با توجه به اینکه بار تغییر نکرده است، اختلاف پتانسیل باید کاهش یابد.

اما توضیح دقیق‌تر و علمی ماجرا آن است که همان‌طور که در متن درس اشاره شد، وقتی دی‌الکتریک قطبی در میدان الکتریکی بین دو صفحهٔ خازن قرار می‌گیرد، مولکول‌های دوقطبی آن در جهت میدان الکتریکی هم‌ردیف می‌شوند و وقتی یک دی‌الکتریک غیرقطبی در این میدان قرار گیرد، مولکول‌های آن در راستای میدان قطبیده می‌شوند. چه در مورد دی‌الکتریک‌های قطبی و چه در مورد دی‌الکتریک‌های غیرقطبی، دوقطبی‌های مولکولی در فضای بین دو صفحهٔ خازن میدانی الکتریکی ایجاد می‌کنند، به‌طوری که میدان الکتریکی حاصل از آنها می‌کوشند میدان الکتریکی خارجی را تضعیف کنند. به عبارتی، میدان الکتریکی ناشی از بارهای قطبیده در خلاف جهت میدان الکتریکی خارجی است و بدین ترتیب برای خازنی که به باتری وصل نیست، میدان الکتریکی برایند داخل دی‌الکتریک ضعیف‌تر از میدان الکتریکی اولیه می‌شود. به عبارتی،

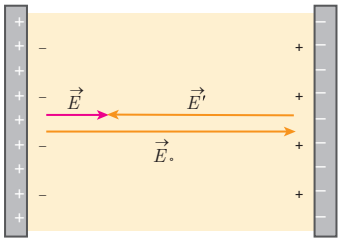
حضور دی‌الکتریک در فضای بین دو صفحهٔ خازن، میدان الکتریکی اولیه را تضعیف می‌کند. بنابراین، وقتی خازن به باتری وصل نیست، میدان اولیهٔ بین صفحه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف پتانسیل بین صفحه‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند. شکل زیر هم‌ردیف شدن مولکول‌های یک دی‌الکتریک قطبی را در میدان دو صفحهٔ خازن نشان می‌دهد.



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



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



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

پاسخ فعالیت ۱ـ۱۰

در این کیسه‌های هوا، حسگرِ کیسهٔ هوا خازنی است که از دو صفحهٔ فلزی کوچک و نزدیک به هم ساخته شده است که بارهای $+Q$ و $-Q$ دارند. وقتی اتومبیل ناگهان متوقف می‌شود، صفحهٔ عقبی که سبک‌تر است به سمت صفحهٔ سنگین‌تر جلویی حرکت می‌کند. این حرکت موجب تغییر ظرفیت خازن (نسبت Q به اختلاف پتانسیل V ی بین صفحه‌ها) می‌شود و یک مدار الکتریکی این تغییر را آشکارسازی کرده و کیسه‌های هوا را به‌کار می‌اندازد.

خوب است بدانید که کلاً سه نوع برهم‌کنش در دستهٔ نیروی وان در والس قرار می‌گیرد: ۱ـ برهم‌کنش دوقطبی ـ دوقطبی، ۲ـ برهم‌کنش دوقطبی القایی ـ دوقطبی و ۳ـ برهم‌کنش دوقطبی لحظه‌ای ـ دوقطبی القایی. توضیح مفصل این‌ها را می‌توانید در کتاب‌های شیمی دورهٔ متوسطه بیابید.

فیلم

در این فیلم چگونگی بالا رفتن مارمولک بر دیوار را می‌بینید.

مقدار بیشینهٔ میدان الکتریکی که دی‌الکتریک می‌تواند بدون فروریزش عمل کند، **قدرت دی‌الکتریک** گفته می‌شود. گرچه این مفهوم جزو تدریس نیست ولی می‌توان اشاره‌ای ضمنی به آن داشت. جدول زیر برخی از قدرت‌های دی‌الکتریک را که یکای آن kV/mm است نشان می‌دهد. به لحاظ میکروسکوپی، فروریزش الکتریکی ناشی از کنده شدن الکترون‌های اتم‌های مادهٔ دی الکتریک توسط میدان الکتریکی و سپس رانده شدن این الکترون‌ها توسط میدان الکتریکی و ایجاد یک مسیر رسانایی درون دی الکتریک (*نقش‌های لیچنبرک*) است وقتی دی الکتریکی درون یک خازن قرار می‌گیرد، آنگاه اختلاف پتانسیلی بین صفحه‌های خازن وجود خواهد داشت که از آن پس، دی الکتریک دستخوش فروریزش الکتریکی می‌شود. به این بیشینه، *پتانسیل فروریزش* گفته می‌شود. جدول زیر قدرت دی‌الکتریک برخی مواد را نشان می‌دهد.

مادهٔ دی‌الکتریک	قدرت دی‌الکتریک (kV/mm)
هوای ۱atm	۳
تفلون	۶۰
پارافین	۱۰
پلی‌استرین	۲۴
میلار	۲۸۰
PVC (پلی وینیل کلراید)	۲۹
کاغذ	۱۶
کوارتز	۸
شیشه پیرکس	۱۴
میکا	۱۵۰
آب	۶۵
تیتانید استرانسیوم	۸

فیلم

در این فیلم، فرو ریزش یک خازن را می‌بینید.

پاسخ تمرین ۱ــ۱۲

با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۸ داریم :

$$C = k\varepsilon_0 \frac{A}{d} = ۳/۰(۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\,\mathrm{F/m})\frac{۱/۰\times۱۰^{-۱۰}\,\mathrm{m^۲}}{۱۰/۰\times۱۰^{-۹}\,\mathrm{m}} = ۲/۶۶\times۱۰^{-۱۳}\,\mathrm{F} \approx ۰/۲۷\,\mathrm{pF}$$

حال با استفاده از تعریف ظرفیت، بار Q را به‌دست می‌آوریم :

$$Q = C\Delta V = (۲/۶۶\times۱۰^{-۱۳}\,\mathrm{F})(۰/۰۸۵\mathrm{V}) = ۲/۲۶\times۱۰^{-۱۴}\,\mathrm{C} \approx ۲/۳\times۱۰^{-۱۴}\,\mathrm{C}$$

بزرگی بار هر یون در هر طرف غشاء برابر $۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\mathrm{C}$ است. بنابراین تعداد یون‌ها برابر است با

$$\text{تعداد یون‌ها} = \frac{۲/۲۶\times۱۰^{-۱۴}\,\mathrm{C}}{۱/۶۰\times۱۰^{-۹}\,\mathrm{C/یون}} = ۱/۴۱\times۱۰^{۵}\ \text{یون}$$

که با توجه به اینکه اختلاف پتانسیل با دو رقم با معنا داده شده است آن را باید به‌صورت $۱/۴\times۱۰^{۵}$ یون بیان کرد.

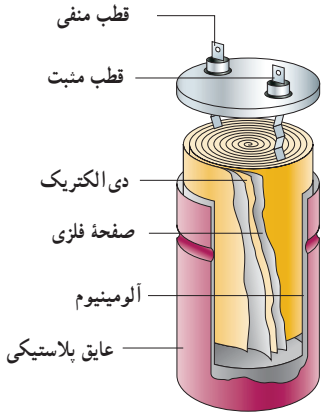
پاسخ فعالیت ۱ــ۱۱

خازن‌ها انواع متعددی دارند؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی ساخته می‌شوند. در اینجا با چند نمونه خازن آشنا می‌شوید.

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 ۵۰ تا ۵۰۰ پیکوفاراد است.

خازن‌های ورقه‌ای : این خازن‌ها از دو ورقهٔ قلع یا آلومینیوم تشکیل شده‌اند که بین آنها دو ورقهٔ دی‌الکتریک مانند کاغذ یا پلاستیک جا داده می‌شود. این ورق‌ها را لوله می‌کنند و به‌صورت یک استوانه در می‌آورند و در محفظه‌ای پلاستیکی قرار می‌دهند. ظرفیت این نوع خازن‌ها از ۱nF تا ۱μF است

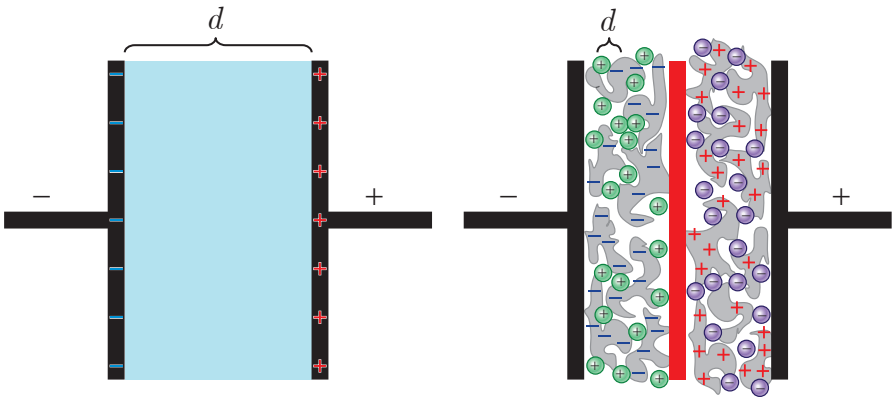
خازن‌های سرامیکی : دی‌الکتریک این خازن‌ها سرامیک است که با استفاده از انواع سیلیکات‌ها در دمای بالا تهیه می‌شود. ثابت دی‌الکتریک این خازن‌ها زیاد و در حدود ۱۰۰۰ است. خازن‌های سرامیکی به شکل عدس تهیه می‌شوند و حجم آنها کم است. صفحه‌های رسانای آنها نیز با ذوب نقره در دو طرف سرامیک تهیه می‌شود. ظرفیت این خازن‌ها حدود ده‌ها نانوفاراد (nF) است.



خازن‌های الکترولیتی : این خازن‌ها از یک صفحهٔ فلزی اندودشده با اکسید آلومینیوم، به‌طوری که صفحهٔ فلزی قطب مثبت خازن و لایهٔ اکسید، دی‌الکتریک آن باشد. تشکیل شده‌اند. الکترولیت جامد یا مایع (که غالباً کاغذی آغشته به مایع الکترولیت است) به عنوان قطب منفی خازن عمل می‌کند. ظرفیت این خازن‌ها بالاست و تا حدود ۰/۱ F می‌رسد.

اَبَرخازن : این نوع خازن‌ها از موادی مانند زغال فعال[۱] پر شده‌اند که خود درون نوعی الکتریک قرار گرفته‌اند. زغال‌ها پس از قرار گرفتن در دو سوی خازن که توسط غشای عایق و نفوذپذیری به نام *جداکننده* از هم جدا شده‌اند بارهایی با علامت مخالف می‌گیرند. با توجه به نفوذپذیری جداکننده، یون‌های موجود در الکترولیت از غشای جداکننده عبور می‌کنند به‌طوری که یون‌های منفی در سمت زغال‌های باردار مثبت و یون‌های مثبت در سمت زغال‌های باردار منفی قرار می‌گیرند. هر یک از جفت بارهای مثبت و منفی زغال ــ یون به مثابهٔ خازنی با فاصلهٔ جدایی d است که میلیون‌ها بار کوچک‌تر از فاصلهٔ جدایی صفحه‌های یک خازن معمولی است. از طرفی ساختار میکروسکوپی زغال‌های فعال اسفنجی‌شکل است، به‌طوری که در مقیاس نانو سطح تماس بسیار بزرگی با یون‌ها دارند و بدین ترتیب مساحت Aی صفحه‌های این خازن نیز به مراتب بزرگ‌تر از مساحت سطح یک خازن معمولی است. بنابراین این خازن‌ها ظرفیت‌های بسیار بزرگی از مرتبهٔ کیلوفاراد دارند که میلیون‌ها برابر ظرفیت خازن‌های معمولی است. 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 باتری‌ها شارژ کرد. همین ویژگی است که باعث استفاده از این خازن‌ها در وسایل نقلیهٔ الکتریکی می‌شود.

۱ ــ Activated charcoal



طرحی از ساختار یک اَبَرخازن در مقایسه با یک خازن تخت معمولی. به تفاوت dها توجه کنید. در عمل این تفاوت به‌مراتب بیشتر است. d در یک اَبَرخازن از مرتبهٔ نانومتر است.

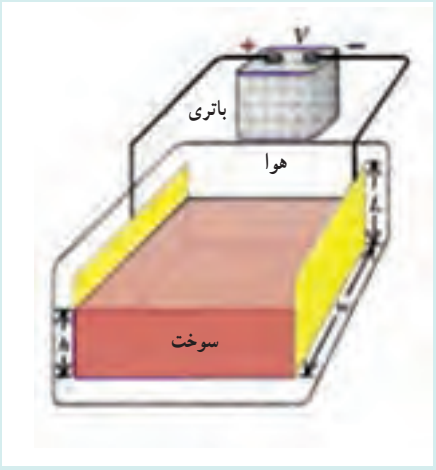
خازن‌های متغیر : دی‌الکتریک این خازن‌ها معمولاً هواست. در ساختمان آنها دو نوع صفحهٔ فلزی، یک دسته ثابت و دسته دیگر متحرّک به‌کار رفته است که هر دو دسته، روی یک محور قرار گرفته‌اند؛ ولی صفحه‌های متحرّک روی این محور می‌چرخند. صفحه‌ها به شکل نیم‌دایره‌اند و با چرخیدن صفحه‌های متحرّک، ظرفیت خازن کم و زیاد می‌شود. این نوع خازن‌ها در گیرنده‌های رادیویی به‌کار می‌رفته است. نماد مداری این خازن‌های به صورت ⫽↗ است.

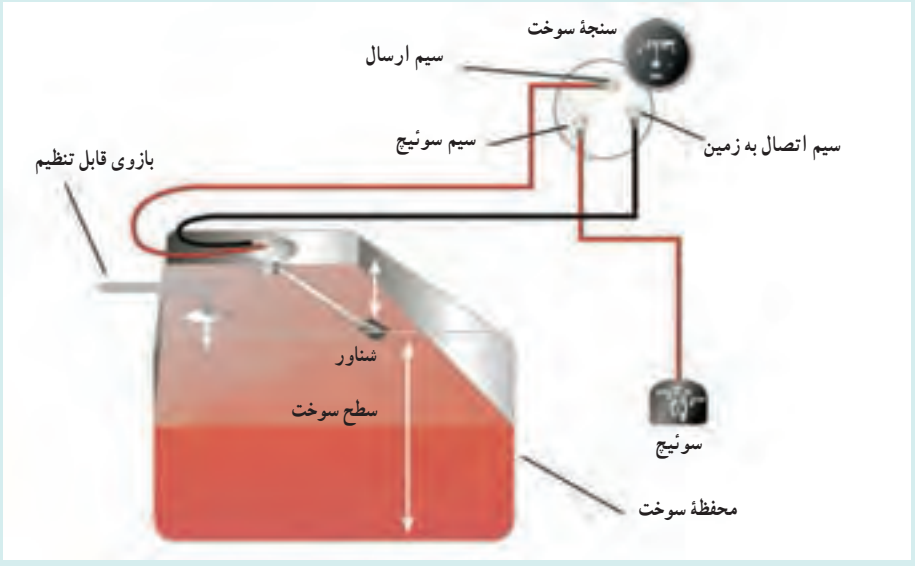
در این فیلم با چند خازن آشنا می‌شوید.

فیلم

سنجهٔ اندازه‌گیری مقدار سوخت اتومبیل

دستگاه اندازه‌گیری مقدار سوخت اتومبیل (عقربهٔ بنزین) دارای یک خازن است که سوخت، مانند شکل زیر بین دو صفحهٔ آن قرار دارد. ثابت دی‌الکتریک مؤثر $k_{مؤثر}$ ، برحسب اینکه خازن پر یا خالی باشد، بین یک و k تغییر می‌کند. مادهٔ دی‌الکتریک، بنزین یا گازوئیل است. یک مدار الکترونیکی ثابت دی‌الکتریک مؤثر را اندازه می‌گیرد. اساس کار دستگاه اندازه‌گیری سوخت اتومبیل با تعیین رابطهٔ بین $k_{مؤثر}$ و ارتفاع h بنا شده است.





پرسش های پیشنهادی

۱ دو خازن تخت مساحت صفحه‌های یکسان A و بار یکسان Q دارند، ولی فاصلهٔ بین صفحه‌های خازن ۱ برابر با d و فاصلهٔ بین صفحه‌های خازن ۲ برابر $2d$ است. اگر ولتاژ بین صفحه‌های خازن ۱ برابر V باشد، ولتاژ بین صفحه‌های خازن ۲ چیست؟

پاسخ : $2V$.

۲ آیا می‌شود پدیدهٔ فروشکست را برای آذرخش نیز مطرح کرد؟

پاسخ : بله. ابر و زمین مانند صفحه‌های خازن و هوا به‌عنوان دی‌الکتریک عمل می‌کند. بر اثر تجمع بیش از حدّ بارها، اختلاف پتانسیل زیاد شده و پدیدهٔ فروشکست رخ می‌دهد.

۳ چه چیزی موجب تابش نوری از تخته اسکی می‌شود که گاهی اسکی‌بازان در شب متوجه آن می‌گردند؟

پاسخ : تخته اسکی عموماً از جنس فلز نیست. وقتی تخته اسکی بر روی برف می‌سُرد، بار الکتریکی بین تخته اسکی و برف منتقل می‌شود و در این صورت تخته اسکی به‌طور الکتریکی قطبیده می‌شود و در نتیجه یک میدان الکتریکی در دو طرف تخته ایجاد می‌شود. مثلاً پایین تخته اسکی دارای بار منفی، و بالای آن دارای بار مثبت می‌شود (به عبارتی تخته اسکی تبدیل به یک خازن شده است). وقتی تخته اسکی روی برف سُر می‌خورد، جرقه‌های کوچک بسیاری می‌تواند بین برف و صفحه‌های بالا و پایین تخته اسکی جهش کند و اسکی‌بازی که چشمانش به تاریکی عادت دارد می‌تواند تعدادی از آنها را ببیند.

تمرین های پیشنهادی

۱ فاصلهٔ بین صفحه‌های یک خازن تخت $5/00\ \text{mm}$ و مساحت صفحه‌های آن $2/00\ \text{m}^2$ است. اختلاف پتانسیل $10/0\ \text{kV}$ به صفحه‌ها اعمال می‌شود. مطلوب است الف) ظرفیت خازن، ب) بار روی هر صفحه، پ) بزرگی میدان الکتریکی بین صفحه‌ها.

پاسخ :

الف) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۷ به $C = 3/54 \times 10^{-9}\ \text{F}$ می‌رسیم.

ب) با استفاده از رابطهٔ ۱ــ۱۵ به $Q = 35/4\ \mu\text{C}$ می‌رسیم.

پ) با استفاده از رابطهٔ $E = |\Delta V| / d$ به $E = 2/00 \times 10^6\ \text{V/m}$ می‌رسیم.

۲ یک خازن تخت پر شده از هوا دارای ظرفیت $1/3\ \text{pF}$ است. فاصلهٔ صفحه‌های آن را دو برابر می‌کنیم و میان آنها موم قرار می‌دهیم. ظرفیت جدید خازن $2/6\ \text{pF}$ می‌شود. ثابت دی‌الکتریک موم را پیدا کنید.

پاسخ : ۴/۰

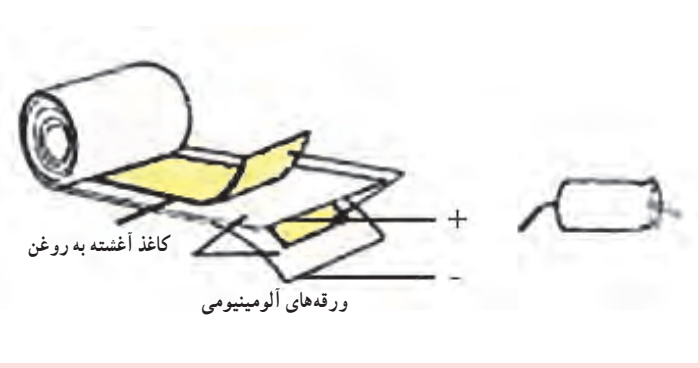
فعالیت های پیشنهادی

۱ صفحهٔ فلزی متصل به یک دسته عایق را باردار کنید (در صورت لزوم می‌توانید از مولّد واندوگراف استفاده کنید). صفحهٔ فلزی را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک کنید و به روش القا، الکتروسکوپ را باردار کنید (فعلاً صفحهٔ فلزی را از کلاهک دور نکنید). در ورقه‌های الکتروسکوپ چه تغییری مشاهده می‌کنید؟ (بار القایی در الکتروسکوپ مخالف و هم‌اندازه با بار الکتریکی صفحهٔ فلزی است. در این حالت مجموعهٔ صفحهٔ فلزی و کلاهک الکتروسکوپ، یک خازن را تشکیل می‌دهند. برای فاصله معینی بین صفحهٔ فلزی و کلاهک الکتروسکوپ، رابطهٔ $C=\frac{Q}{V}$ صدق می‌کند). اکنون به‌تدریج صفحهٔ فلزی را از کلاهک الکتروسکوپ دور کنید، فاصلهٔ بین ورقه‌های الکتروسکوپ چه تغییری می‌کند؟

پاسخ : بیشتر می‌شود.

۲ خازن بسازید.

دو نواربسیار باریک به پهنای ۰/۵ سانتی‌متر از ورقه‌ای آلومینیومی به طول ۵ cm را برش بزنید. به همین اندازه دو نوار کاغذی را که آغشته به روغن مایع شده است نیز آماده کنید. کاغذها را بین دو نوار ورقه‌های آلومینیومی قرار داده و آنها را به‌صورت بسیار فشرده بپیچانید. سیم‌های اتصالی به انتهای ورقه‌های آلومینیومی متصل کنید که نقش آند و کاتد را بازی خواهند کرد. این مجموعه را می‌توانید در یک کپسول داروی آنتی‌بیوتیک جاسازی کرده و دو سر خروجی آنها را بیرون بکشید.



۱ــ۱۲ــ انرژی خازن

برای شارژ کردن یک خازن، یعنی ایجاد اختلاف پتانسیل بین دو صفحهٔ آن، باید مقداری کار انجام گیرد. بنابراین خازن پر مقداری انرژی پتانسیل در خود ذخیره دارد که این انرژی برابر با کاری است که در جریان باردار کردن خازن مصرف شده است. هنگام باردار کردن خازن، در داخل آن یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کنیم و موقع خالی شدن خازن، این میدان از دست می‌رود. کار انجام شده صرف ایجاد میدان الکتریکی شده است، در حالی که کاری که در خالی شدن خازن انجام می‌شود نتیجهٔ از بین رفتن این میدان است. به‌عبارتی، هر میدانی مقداری انرژی پتانسیل در خود ذخیره دارد که هنگام از بین رفتن میدان، آزاد می‌شود.

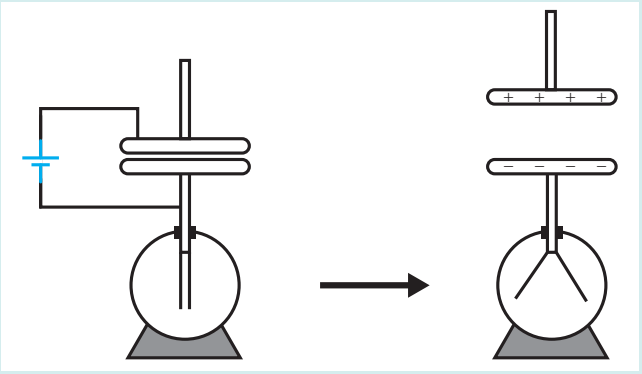
خوب است در اینجا به چگونگی باردار شدن خازن توسط باتری که پیشتر توضیح داده شد، دوباره اشاره شود.

خوب است تأکید شود که انرژی در میدان الکتریکی ذخیره می‌شود و اگر بر فرض در یک خازن تخت می‌گوییم انرژی در فضای بین صفحات ذخیره شده است، به این دلیل است که میدان الکتریکی در بین دو صفحه برقرار شده است. در این مورد پیشنهاد می‌شود پرسش پیشنهادی ۱ در همین جا مطرح شود. همچنین خوب است به تفاوت خازن با باتری اشاره شود. همان‌طور که گفتیم در خازن انرژی الکتریکی در میدان الکتریکی ذخیره می‌شود، در حالی که یک باتری انرژی پتانسیل خود را به شکل شیمیایی ذخیره می‌کند.

بررسی انرژی الکتریکی ذخیره شده در خازن با استفاده از الکتروسکوپ

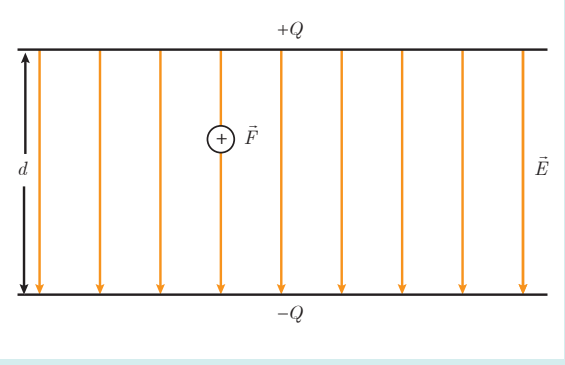
برای انباشتن بار منفی روی یک صفحه و بار مثبت روی صفحهٔ دیگر و غلبه بر جاذبهٔ بین این بارهای مخالف یا به عبارت صحیح‌تر برای شارژ (پُر) کردن یک خازن باید کار انجام داد. وقتی خازن تخلیه می‌شود و بارها به همدیگر جذب می‌شوند، نیروهای الکتریکی همان کار را انجام می‌دهند. بنابراین، خازن پُر دارای انرژی پتانسیل است. این انرژی برابر با کاری است که در جریان شارژ کردن خازن مصرف شده است.

می‌توان با کمک یک باتری و اتصال پایانه‌های آن به صفحه‌ای فلزی و کلاهک الکتروسکوپ در آنها بار الکتریکی و انرژی پتانسیل الکتریکی ذخیره کرد (شکل ۱). به علت وجود اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های باتری و صفحه‌هایی که به آن متصل شده‌اند، بارهای الکتریکی شروع به جابه‌جا شدن می‌کنند. وقتی اختلاف پتانسیل خازن با باتری برابر شد فرایند باردار شدن متوقف می‌شود. با باردار کردن خازن و انجام کار، در بین صفحه‌های آن یک میدان الکتریکی به‌وجود می‌آوریم. بنابراین هر میدان الکتریکی مقداری انرژی پتانسیل دارد که این انرژی به هنگام از بین رفتن میدان (تخلیهٔ خازن) آزاد می‌شود.



شکل ۱

اکنون خازن تختی با صفحه‌های نامتناهی را در نظر بگیرید. با توجه به اینکه میدان هر صفحه یکنواخت و میدان صفحه‌ها با هم برابرند بزرگی میدان E بین صفحه‌های خازن را می‌توان برایند دو میدان الکتریکی با بزرگی‌های E_1 (ناشی از بار مثبت روی یک صفحه) و E_2 (ناشی از بار منفی روی صفحهٔ دیگر) در نظر گرفت. این دو میدان در یک راستایند (شکل ۲)؛ به‌طوری‌که $E_1=E_2$ و $E_2+E=E_1$ بنابراین $E_2=E_1=\frac{1}{2}E$.



شکل ۲

نیروی بر هم کنش صفحه‌ها $\vec{F}$ ، نیرویی است که در آن میدان $\vec{E}_1$ ناشی از بار مثبت صفحهٔ بالایی روی بار منفی صفحهٔ پایینی اثر می‌کند و آن را به طرف خود می‌کشد و برعکس با توجه به اینکه مقدار بار خازن با تغییر فاصلهٔ بین صفحه‌های آن تغییر نمی‌کند نیروی جاذبهٔ $\vec{F}$ نیز بدون تغییر می‌ماند و کاری که باید انجام شود تا صفحه‌ها را از حالت فاصلهٔ صفر به فاصلهٔ d حرکت دهیم برابر است با $W=Fd$. انرژی یک خازن پر (U) برابر است با کاری که به هنگام پر کردن آن انجام می‌شود (Fd) و در نتیجه :

$$F = E_1 Q = E_2 Q = \frac{1}{2} EQ$$

$$U = W = Ed = \frac{1}{2} EQd$$

با توجه به اینکه در خازن تخت میدان یکنواخت است و شدت آن برابر با $E = \frac{V}{d}$ است، انرژی خازن تخت را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

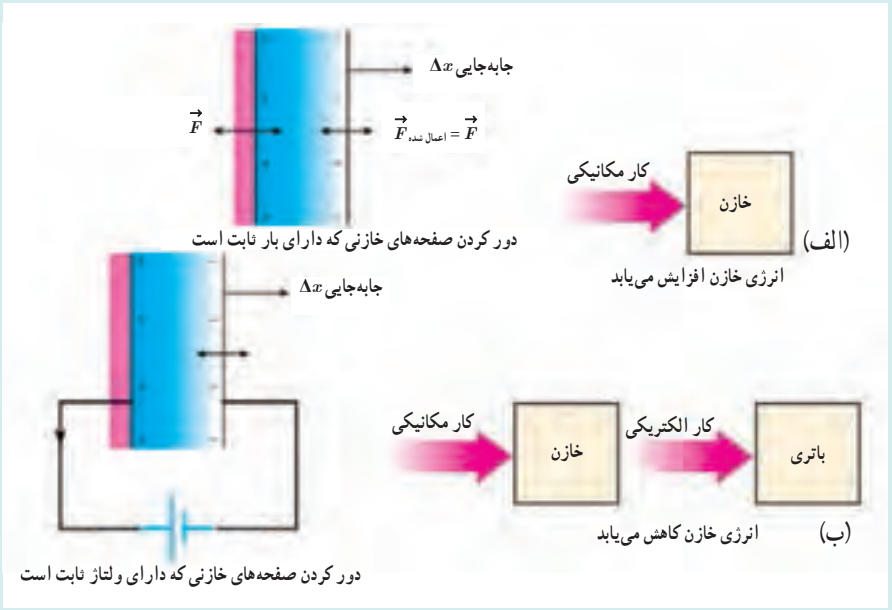
$$U = \frac{1}{2} QV$$

گرچه این رابطه را برای خازنی تخت ثابت کردیم، ولی نشان داده می‌شود برای هر خازنی برقرار است.

دانستنی برای معلم

تغییر کمیت‌های خازن و اثر آن بر انرژی خازن

صفحه‌های خازن بارداری را از هم دور می‌کنیم. اگر بار خازن ثابت بماند (خازن پر و به باتری وصل نباشد) انرژی خازن افزایش می‌یابد و اگر ولتاژ خازن ثابت بماند (دو سر خازن به باتری وصل باشد) انرژی خازن کاهش می‌یابد.



طبق شکل الف نیروی وارد شده، صفحه منفی را با سرعت ثابت به طرف راست حرکت می‌دهد، در حالی که صفحهٔ مثبت، ساکن نگه داشته شده است. بار خازن Q ثابت است و ظرفیت خازن کاهش می‌یابد. در این حالت کار مکانیکی مثبت است، این کار مثبت انجام شده (به‌وسیلهٔ نیروی وارد شده) انرژی ذخیره شدهٔ خازن را افزایش می‌دهد. به عبارتی، با ثابت ماندن بار Q و کاهش ظرفیت C ی خازن، انرژی خازن طبق رابطهٔ $U=\frac{۱}{۲}\frac{Q^۲}{C^۲}$ کاهش می‌یابد.

طبق شکل ب صفحهٔ منفی درحالی‌که اختلاف پتانسیل دو سر خازن ثابت نگه داشته شده است به طرف راست حرکت داده می‌شود. در این فرایند نیز، ظرفیت خازن کم می‌شود، و چون اختلاف پتانسیل ثابت است بار خازن کاهش می‌یابد، و مقداری از بار خازن به باتری منتقل می‌شود. یعنی بخشی از انرژی خازن به درون باتری تخلیه می‌شود. انرژی از عامل خارجی به داخل خازن جریان می‌یابد اما مقدار بیشتری انرژی از خازن خارج می‌شود و روی باتری کار الکتریکی انجام می‌دهد. بنابراین انرژی ذخیره شده در خازن کاهش می‌یابد. به عبارتی، با ثابت ماندن V و کاهش ظرفیت C ی خازن، انرژی خازن طبق رابطهٔ $U=\frac{۱}{۲}CV^۲$ کاهش می‌یابد.

پرسش‌های پیشنهادی

۱ در بطری لیدن، انرژی الکتریکی واقعاً در کجا ذخیره می‌شود؟

الف) روی ورقهٔ فلزی بیرون بطری　　ب) روی ورقهٔ فلزی درون بطری

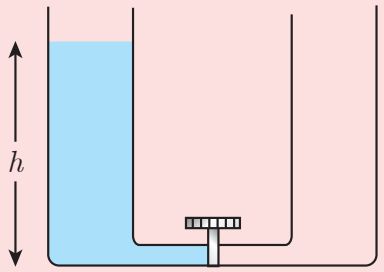
پ) در شیشهٔ بین دو ورقه　　ت) در داخل بطری

پاسخ : پاسخ درست **پ** است. در واقع چنین شکلی داریم

یعنی جهت خطوط میدان الکتریکی از بار مثبت به سمت بار منفی است. چون انرژی الکتریکی در میدان ذخیره می‌شود، این بدین معنی است انرژی در شیشه ذخیره می‌گردد.

۲ انرژی پتانسیلی که باتری فراهم می‌آورد از رابطهٔ $U_{\text{باتری}}=qV$ به‌دست می‌آید. از طرفی انرژی خازن طبق رابطهٔ ۱ــ۱۹ برابر $U_{\text{خازن}}=\frac{۱}{۲}qV$ است. آیا به نظر شما پایستگی انرژی نقض شده است؟

پاسخ : این پرسشی مشهور و متداول است که پاسخ معمول آن نیز این است که مقداری از انرژی به‌صورت گرما در سیم‌ها تلف می‌شود و همین باعث تفاوت این دو مقدار شده است. اما پرسش هوشمندانه‌ای که بی‌درنگ مطرح می‌شود این است که آیا با استفاده از سیم‌های نازک‌تر این تفاوت کمتر می‌شود؟ که قاعدتاً باید چنین شود. در حالی که این نتیجه همواره برقرار است و هیچ ربطی به مقاومت سیم‌ها ندارد. بنابراین، برای دانش‌آموزان هوشمند باید پاسخ قانع‌کننده‌ای ارائه کرد. به این منظور، از مثالی دیگر کمک می‌گیریم. ظرفی U‌شکل را در نظر بگیرید که از پایین توسط لولهٔ باریکی به یک شیر متصل شده است و شاخهٔ سمت چپ آن پر از آب است.



انرژی پتانسیل اولیه $U = mg(\frac{h}{۲})$ است. حال ببینیم بعد از باز کردن شیر چه اتفاقی می‌افتد. پس از چند رفت و برگشت، آب در ارتفاع $h/۲$ در هر دو شاخهٔ ظرف به سکون می‌رسد. بنابراین اکنون برای انرژی پتانسیل دستگاه داریم :

$$U = (m/۲)g(h/۴) + (m/۲)g(h/۴) = \frac{mg}{۸}h + \frac{mg}{۸}h = \frac{mg}{۴}h$$

می‌بینید که جواب دقیقاً نصف وضعیت اولیه شد. پس در اینجا نیز می‌توان این پرسش را مطرح ساخت که آیا انرژی گم و پایستگی انرژی نقض شده است؟ یقیناً نه. سعی می‌کنیم از این مثال پاسخی بیابیم که برای مسئله اصلی ما هم راهگشا باشد.

اگر آب را به بار موجود در دستگاه، اختلاف ارتفاع را به اختلاف پتانسیل الکتریکی، نوسان آب را به نوسان بارهای الکتریکی و اصطکاک در لولهٔ رابط را به مقاومت سیم‌ها تشبیه کنیم، می‌توان گفت که انرژی در گذار از حالت اولیه به نهایی تلف می‌شود همان‌طور که در لولهٔ U شکل انرژی تلف شده به‌صورت گرما ظاهر می‌شود در اینجا نیز در اثر عبور جریان در سیم‌های رابط، انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. همان‌طور که شکل ظرف، لوله‌های رابط و سایر پارامترهای فیزیکی مسئله، صرفاً بر زمان رسیدن به شرایط نهایی اثر می‌گذارد، در اینجا نیز نوع سیم به کار رفته تنها زمان رسیدن به تعادل را تغییر می‌دهد و نقشی در میزان انرژی تلف‌شده، ندارد.

تمرین های پیشنهادی

۱ خازنی به ظرفیت $C = ۸/۰\ \mu F$ به اختلاف پتانسیل $V = ۱۲۰\ V$ متصل است. الف) بزرگی بار Q و ب) انرژی کل ذخیره شده در خازن، وقتی نصف آن پر شده است، چقدر است؟

پاسخ :

الف)
$$Q = CV = (۸/۰\ \mu F)(۱۲۰\ V) = ۹۶۰\ \mu F$$

ب)
$$U = \frac{۱}{۲} QV$$
$$= \frac{۱}{۲} (۹۶۰ \times ۱۰^{-۶} C)(۱۲۰\ V) = ۰/۰۵۸ J$$

۲ NIF[۱] یک لیزر پرقدرت برای ایجاد واکنش‌های گداخت است. این لیزر مشتمل بر ۱۹۲ واحد خازنی است که هر کدام با ظرفیت معادل ۶/۰۰ mF دارند و تحت اختلاف پتانسیل ۲۴ V باردار می‌شوند. این خازن‌ها در یک بازهٔ ۹۰ s پر شده و سپس در ۴۰۰ μs تخلیه می‌شوند.

الف) انرژی ذخیره‌شده در خازن‌های NIF چقدر است؟
$$U = \frac{۱}{۲} C(\Delta V)^۲ = \frac{۱}{۲} (۶/۰۰ \times ۱۰^{-۳} F)(۲۴ \times ۱۰^{۲} V)^۲ = ۱/۷۳\ MJ$$

بنابراین، انرژی کلّ ذخیره‌شده در خازن‌های NIF برابر است با
$$U_{کل} = ۱۹۲\ (۱/۷۳\ MJ) = ۳۳۲\ MJ$$

ب) توان متوسط آزاد شده در حین هر پالس چقدر است؟
$$P = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{۳۳۲ MJ}{۴۰۰ \mu s} = \frac{۳۳۲ \times ۱۰^{۶} J}{۴۰۰ \times ۱۰^{-۶} s} = ۸/۳۰ \times ۱۰^{۱۱} W = ۰/۸۳۰\ TW$$

۳ هزار قطرهٔ باران باردار مشابه، طوری به هم می‌چسبند که بار تک‌قطرهٔ حاصل برابر با مجموع بار تک‌تک قطرات می‌شود. با فرض اینکه قطرات کروی‌شکل باشند، انرژی الکتریکی جدید قطرات نسبت به انرژی الکتریکی اولیهٔ آنها چقدر است؟ (**راهنمایی** : هر گوی باردار را می‌توان خازنی با ظرفیت $۴\pi\varepsilon_۰ R$ در نظر گرفت).

پاسخ : بدیهی است $Q = nq$ و نیز
$$\frac{۴}{۳}\pi R^۳ = n\frac{۴}{۳}\pi r^۳$$

که در آن R شعاع قطرهٔ بزرگ حاصل و r شعاع هر قطره است. بنابراین $R/r = \sqrt[۳]{n} = C_{کل}/C_۱$ است. انرژی خازن برابر $Q^۲/۲C$ است. بنابراین داریم :
$$\frac{U_{کل}}{U_۱} = ۱۰۰$$

۱ـ National Ignition Facility

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱

۱ این تمرین مروری است بر آنچه در کتاب علوم تجربی پایهٔ هشتم تدریس شده و خوب است دانش‌آموزان به مرور آن مطالب تشویق شوند.

الف) میلهٔ پلاستیکی یا میلهٔ شیشه‌ای باردار را به کلاهک الکتروسکوپ بدون بار نزدیک می‌کنیم و با فاصله گرفتن صفحات آن، به باردار بودن میله‌ها پی می‌بریم.

ب) نخست مثلاً توسط یک میلهٔ پلاستیکی باردار الکتروسکوپ را از طریق تماس میله با کلاهک آن باردار می‌کنیم. حال اگر به کلاهک الکتروسکوپ باردار، میلهٔ رسانا را (در حالی که آن را با دست خود گرفته‌ایم) تماس دهیم الکتروسکوپ تخلیه می‌شود، ولی میلهٔ عایق نمی‌تواند الکتروسکوپ را تخلیه کند.

پ) اکنون باید میلهٔ باردار شیشه‌ای یا پلاستیکی را به الکتروسکوپ باردارشده نزدیک کنیم. اگر الکتروسکوپ پیشتر باردار منفی شده باشد با نزدیک شدن میلهٔ باردار منفی صفحه‌های آن بیشتر فاصله می‌گیرند، در حالی که نزدیک شدن میلهٔ باردار مثبت صفحات را به هم نزدیک می‌کند و اگر الکتروسکوپ پیشتر باردار مثبت شده باشد، برعکس.

۲ الف) بار الکتریکی در پارچهٔ پشمی به همان اندازه، ولی با علامت مثبت می‌شود.

ب) با توجه به اینکه $q=ne$ است، از اینجا می‌توانیم تعداد n الکترون‌های منتقل شده را بیابیم :

$$n=\frac{۱۲/۸\times۱۰^{-۹}\text{C}}{۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\text{C/الکترون}}=۸/۰۰\times۱۰^{۱۰}\ \text{الکترون}$$

۳ الف) بار الکتریکی اتم کربنِ خنثی، صفر است، ولی هستهٔ اتم کربن ۶ پروتون دارد و بنابراین بار آن برابر $q=+۶e$ می‌شود که در آن $e=۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\text{C}$ است :

$$q=۶(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\text{C})=۹/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\text{C}$$

ب) بار اتم کربن یک بار یونیده $+۱e$ است.

۴ چون اندازهٔ گوی‌ها با هم برابر است و هر دو رسانا هستند، پس از تماس گوی‌ها بارهای یکسانی در آنها ظاهر می‌شود. بنابراین پس از تماس گوی‌های داریم.

$$q=\frac{q_۱+q_۲}{۲}=\frac{۴/۰\,\text{nC}-۶/۰\,\text{nC}}{۲}=-۱/۰\,\text{nC}$$

و در نتیجه نیروی بین دو گوی چنین می‌شود :

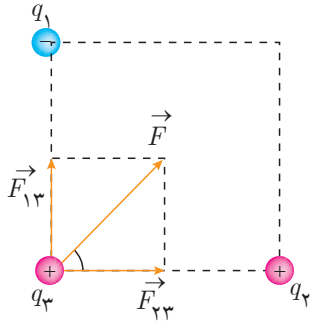
$$F=k\frac{|q_۱||q_۲|}{r^۲}=k\frac{|q|^۲}{r^۲}$$

$$=(۹/۰\times۱۰^۹\,\frac{\text{N.m}^۲}{\text{C}^۲})\frac{(۱/۰\times۱۰^{-۹}\,\text{C})^۲}{(۰/۳۰\,\text{m})^۲}$$

$$=۱/۰\times۱۰^{-۷}\,\text{N}$$

همان‌طور که گفتیم، پس از تماس، بار گوی‌ها یکسان می‌شود و بنابراین همدیگر را دفع می‌کنند. یعنی نیرو، رانشی است.

۵ نخست، نیروی وارد بر بار $q_۳$ را رسم می‌کنیم.



از آنجا داریم

$$\vec{F}=F_{۲۳}\,\vec{i}+F_{۱۳}\,\vec{j}$$

که با توجه به اینکه $q_۱=q_۲$ و فاصلهٔ بارها از $q_۳$ یکسان است، $F_{۲۳}=F_{۱۳}$ است و از قانون کولن داریم :

$$F_{۲۳}=F_{۱۳}=k\frac{|q_۲||q_۳|}{r_{۲۳}^۲}$$

$$=(۹/۰\times۱۰^۹\,\frac{\text{N.m}^۲}{\text{C}^۲})\frac{(۵\times۱۰^{-۶}\,\text{C})(۰/۲\times۱۰^{-۶}\,\text{C})}{(۳\text{m})^۲}$$

$$=۰/۰۰۱\,\text{N}=۱\,\text{mN}$$

در نتیجه نیروی خالص وارد بر بار $q_۳$ چنین می‌شود :

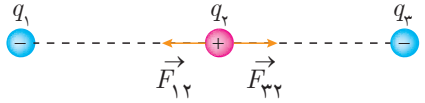
$$\vec{F}=(۱\text{mN})\,\vec{i}+(۱\text{mN})\,\vec{j}$$

می‌توانیم بزرگی این نیرو را نیز محاسبه کنیم :

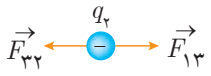
$$F=\sqrt{(۰/۰۰۱\text{N})^۲+(۰/۰۰۱\text{N})^۲}=۱/۴۱\times۱۰^{-۳}\,\text{N}$$
$$\approx۱\,\text{mN}$$

توجه کنید چون داده‌های مسئله فقط با یک رقم معنی‌دار داده شده‌اند، پاسخ نهایی نیز باید با یک رقم معنی‌دار، به‌صورت $F=۱\,\text{mN}$ گزارش شود.

۶ نیروهای وارد بر بار $q_۲$ مانند شکل زیر می‌شود :



همان‌طور که می‌بینیم $\vec{F}_{۱۲}$ در خلاف جهت $\vec{F}_{۳۲}$ است و چون بارهای $q_۱$ و $q_۳$ و فاصلهٔ آنها از $q_۲$ یکسان است. بنابراین $F_{۱۲}=F_{۳۲}$، و در نتیجه نیروی خالص وارد بر $q_۲$ برابر صفر می‌شود. اما در مورد $q_۳$ داریم :



دوباره نیروها در خلاف جهت هم هستند، ولی چون فاصلهٔ بارهای $q_۲$ و $q_۳$ کمتر از فاصلهٔ بارهای $q_۱$ و $q_۳$ است و همچنین $|q_۱|>|q_۳|$ است، $|\vec{F}_{۲۳}|>|\vec{F}_{۱۳}|$ خواهد بود و نیروی برایند در خلاف جهت مثبت محور x وارد می‌شود. بزرگی این نیروها با استفاده از قانون کولن برابر است با

$$F_{۲۳}=k\frac{|q_۲||q_۳|}{r_{۲۳}^{۲}}$$

$$=(۹/۰\times۱۰^{۹}\frac{\mathrm{N.m^{۲}}}{\mathrm{C^{۲}}})\frac{(۵\times۱۰^{-۹}\mathrm{C})(۴/۰\times۱۰^{-۹}\mathrm{C})}{(۰/۰۸۰\mathrm{m})^{۲}}$$

$$=۲/۸\times۱۰^{-۵}\mathrm{N}$$

$$F_{۱۳}=k\frac{|q_۱||q_۳|}{r_{۱۳}^{۲}}$$

$$=(۹/۰\times۱۰^{۹}\frac{\mathrm{N.m^{۲}}}{\mathrm{C^{۲}}})\frac{(۴/۰\times۱۰^{-۹}\mathrm{C})(۴/۰\times۱۰^{-۹}\mathrm{C})}{(۰/۱۶\mathrm{m})^{۲}}$$

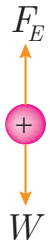
$$=۵/۶۲\times۱۰^{-۶}\mathrm{N}$$

بنابراین $\vec{F}$ چنین می‌شود :

$$F=(۵/۶۲\times۱۰^{-۶}\mathrm{N})\,\vec{i}-(۲/۸\times۱۰^{-۵}\mathrm{N})\,\vec{i}$$

$$\approx ۲/۲\times۱۰^{-۵}(-\vec{i})$$

۷ الف) از برابر قرار دادن بزرگی نیروی الکتریکی دافعهٔ کولنی و نیروی وزن که در خلاف جهت هم‌اند داریم :



$$mg=k\frac{q^{۲}}{r^{۲}}$$

و از آنجا

$$q=\sqrt{\frac{mgr^2}{k}}$$

$$=\sqrt{\frac{(۲/۵\times۱۰^{-۳}\,\text{kg})(۹/۸\frac{\text{N}}{\text{kg}})(۰/۰۱\,\text{m})^2}{۹/۰\times۱۰^{۹}\,\text{N}.\frac{\text{m}^2}{\text{C}^2}}}$$

$$=۱/۶۵\times۱۰^{-۸}\,\text{C}\approx۱۶\,\text{nC}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ $q=ne$ داریم :

$$n=\frac{q}{e}=\frac{۱/۶۵\times۱۰^{-۸}\,\text{C}}{۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,\text{C}}\approx۱۰^{۱۱}$$ الکترون

خوب است توجه کنید پاسخ‌های به‌دست آمده در این مسئله فقط تخمین‌هایی از مقادیر واقعی هستند؛ زیرا همان‌طور که در متن درس بیان کردیم شرط استفاده از قانون کولن آن است که فاصلهٔ بین دو جسم باردار، خیلی بزرگ‌تر از ابعاد هر یک از دو جسم باشد و گوی‌هایی که بتوانند بار ۱۶nC را روی خود نگه دارند باید شعاعی در حدود چند سانتی‌متر داشته باشند تا هوای پیرامون‌شان دستخوش فرو ریزش نگردد. وقتی این گوی‌ها در فاصلهٔ ۱cm از هم باشند، شرط ذره‌ای بودن برآورده نمی‌شود.

۸ با توجه به یکنواخت بودن میدان الکتریکی و با توجه به اینکه $\vec{F}=q\vec{E}$ است، نیروی وارد بر ذره در هر دو نقطه برابر است.

۹ الف) هر پروتون را می‌توان به‌صورت یک ذرهٔ باردار در نظر گرفت. بنابراین بزرگی نیروی دافعهٔ الکتروستاتیکی وارد بر یکی، از سوی دیگری با قانون کولن داده می‌شود :

$$F=k\frac{|q_p||q_p|}{r^2}=k\frac{|q_p|^2}{r^2}$$

$$=(۹/۰\times۱۰^{۹}\,\text{N}.\frac{\text{m}^2}{\text{C}^2})\frac{(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,\text{C})^2}{(۴/۰\times۱۰^{-۱۵}\,\text{m})^2}$$

$$=۱۴/۴\,\text{N}\approx۱۴\,\text{N}$$

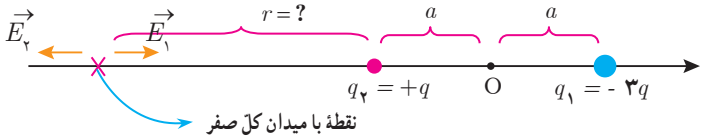
ب) هسته شامل ۲۶ پروتون است. بنابراین $q_{\text{هسته}}=۲۶e$ و داریم :

$$E=k\frac{q_{\text{هسته}}}{R^2}$$

$$=(۹/۰\times۱۰\quad.\frac{\text{m}^2}{\text{C}^2})\frac{۲۶(۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\,\text{C})}{(۱/۰\times۱۰^{-۱۰}\,\text{m})^2}$$

$$=۳/۷۴۴\times۱۰^{۱۲}\frac{\text{N}}{\text{C}}\approx۳/۷\times۱۰^{۱۲}\frac{\text{N}}{\text{C}}$$

۱۰ توجه کنید برای بررسی این موضوع باید بار آزمون را در سه نقطهٔ سمت چپ $q+$، در حدّ واسط $q+$ و $3q-$، و در سمت راست $3q-$ قرار دهیم. اگر بار آزمون را در سمت راست $3q-$ یا در حدّ واسط بارهای $q+$ و $3q-$ قرار دهیم، امکان ایجاد تعادل، و صفر شدن میدان الکتریکی وجود ندارد؛ چرا که اگر بار آزمون (مثبت) را در سمت راست $3q-$ قرار دهیم یک نیروی دافعه از سوی $q+$ و یک نیروی جاذبه از سوی $3q-$ دریافت می‌کند. اما نیروی جاذبهٔ حاصل از بار $3q-$ به دلیل آنکه ناشی از اندازهٔ بار بزرگ‌تری است و نیز در فاصلهٔ کمتری از بار $q+$ قرار دارد، امکان ندارد با نیروی دافعهٔ حاصل از $q+$ به تعادل در آید و خنثی شود. اما در خطّ واصل بارهای $q+$ و $3q-$، سوی نیروهای وارد از بارهای $q+$ و $3q-$ در یک جهت است و اصلاً حالتی متصور نیست که این دو نیرو، همدیگر را خنثی کنند. تنها می‌ماند سمت چپ بار $q+$. در این سمت، نیروی دافعهٔ حاصل از بار $q+$ و نیروی جاذبهٔ حاصل از بار $3q-$ بر خلاف جهت یکدیگرند، اما برخلاف وضعیتی که در سمت راست بار $3q-$ هستیم، هر دو پارامتر بزرگی بار و اندازهٔ فاصله، به نفع یک نیرو چربش ندارد. در حالی که بار $q+$ کوچک‌تر است، اما در عوض فاصلهٔ آن هم کمتر است و در حالی که فاصلهٔ $3q-$ زیاد است، اما در عوض بزرگی بار آن هم زیاد است. می‌توانیم محل دقیق صفر شدن میدان کل را نیز به‌دست آوریم. همان‌طور که دیدیم، میدان کل در سمت چپ بار $q+$ می‌تواند صفر باشد. با توجه به اینکه میدان‌های $\vec{E}_1$ و $\vec{E}_2$ هم‌اندازه و در خلاف سوی یکدیگرند، خواهیم داشت :



$$E_1=E_2$$

$$k\frac{|q_1|}{r_1^2}=k\frac{|q_2|}{r_2^2}$$

$$k\frac{3q}{(r+2a)^2}=k\frac{q}{r^2}$$

و در نتیجه

$$\frac{\sqrt{3}}{r+2a}=\frac{1}{r}$$

و از آنجا

$$r=\frac{2}{\sqrt{3}-1}a\simeq(\sqrt{3}+1)a$$

$$\approx 2/7a$$

یعنی نقطهٔ با میدان کلّ صفر روی محور x، در سمت چپ بار $q+$، و در فاصلهٔ $r=(\sqrt{3}+1)a$ ، از بار $q+$ واقع است.

تبصره : ما سه حالت روی محور را در قسمت الف بررسی کردیم، اگر بار آزمون را در هر نقطه‌ای غیر از محور شکل قرار دهیم و خطوط میدان را رسم کنیم، در خواهیم یافت که در هر نقطه یک میدان برایند غیر صفر خواهیم داشت و امکان ندارد میدان الکتریکی صفر شود.

البته در کتاب‌های پیشرفته‌تر، پایداری تعادل بار آزمون در نقطهٔ میدان صفر نیز بررسی می‌شود. به این ترتیب که آیا با جابه‌جا کردن بار آزمون از نقطهٔ با میدان صفر، آیا بار دوباره به محل خود (نقطهٔ تعادل) بازمی‌گردد یا خیر. ثابت می‌شود که در حالت کلی، در نقطهٔ با میدان الکتریکی صفر، و صرفاً با حضور نیروهای کولنی، تعادل پایدار نداریم و از این واقعیت به عنوان قضیهٔ *Earnshaw* یاد می‌شود، به عبارتی، قضیهٔ *Earnshaw* در حالت کلی بیان می‌دارد که در الکتروستاتیک تعادل پایدار نداریم.

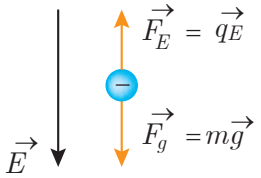
ب) جهت نیروهای وارد بر بار آزمون واقع بر مبدأ هر دو در سوی مثبت محور x است و بنابراین، بزرگی میدان‌های الکتریکی در نقطهٔ O با هم جمع می‌شود :

$$E = k\frac{q}{a^2}\vec{i} + k\frac{3q}{a^2}\vec{i}$$

$$= 4k\frac{q}{a^2}\vec{i}$$

بنابراین، بزرگی میدان الکتریکی برایند در مبداء مختصات $E = 4k\frac{q}{a^2}$ ، و جهت آن در سوی مثبت محور x است.

۱۱ چون نیروی گرانشی رو به پایین بر ذره اثر می‌کند، نیروی الکتریکی باید در خلاف جهت آن و رو به بالا باشد. می‌دانیم نیروی الکتریکی وارد بر بار منفی در خلاف جهت میدان الکتریکی است. بنابراین نوع بار باید حتماً منفی باشد و شکلی مانند زیر داریم.



از شرط تعادل نیروها داریم

$$|q|E = mg$$

$$\Rightarrow |q| = \frac{mg}{E} = \frac{(2/0\times10^{-3})(10\frac{N}{kg})}{(5/0\times10^{5}\frac{N}{C})}$$

$$= 4/0\times10^{-8}C = 40nC$$

۱۲ از تقارن شکل واضح است که همهٔ میدان‌های حاصل از بارهای روی دو مربع همدیگر را دو به دو خنثی می‌کند، به جز دو باری که در وسط دو ضلع سمت و چپ و راست مربع بزرگ قرار دارند. در این صورت، میدان الکتریکی در نقطهٔ P، برایند میدان‌های حاصل از میدان این دو بار می‌شود. توجه کنید برای بررسی جهت میدان، باید بار آزمون (مثبت) را در نقطهٔ P قرار دهیم. بار آزمون توسط هر دو بار جذب می‌شود، اما چون بار سمت چپ بزرگ‌تر است، جهت میدان برایند به سوی آن است. بنابراین، خواهیم داشت :

$$\vec{E}_P = k\frac{2q}{d^2}(-\vec{i}) + k\frac{q}{d^2}(\vec{i})$$

$$= \frac{kq}{d^2}(-\vec{i})$$

بنابراین، بزرگی میدان در نقطهٔ P برابر با $E_P = k\frac{q}{d^2}$ ، و جهت آن رو به سمت چپ است.

۱۳ از متن درس آموختیم که خطوط میدان الکتریکی در جهت نیروی وارد بر بار آزمون هستند و بنابراین برای بار مثبت، رو به خارج و برای بار منفی، رو به داخل می‌شود. پس بار $q_۱$ مثبت و بار $q_۲$ منفی است. همچنین آموختیم در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خطوط میدان الکتریکی فشرده‌ترند. بنابراین، با توجه به فشردگی بیشتر خطوط میدان الکتریکی در نزدیکی بار $q_۱$، درمی‌یابیم بزرگی بار $q_۱$ بیشتر است. این را می‌توان از تعداد خطوط میدان خروجی از بار $q_۱$ و ورودی به بار $q_۲$ نیز دریافت. به عبارتی هرچه تعداد خطوط خروجی از یک بار مثبت (یا ورودی به یک بار منفی) بیشتر باشد، به معنی بزرگ‌تر بودن، اندازهٔ آن بار است.

۱۴ با توجه به آنچه از متن درس آموختیم، درمی‌یابیم همهٔ موارد غیر از مورد (ت) نادرست‌اند. در ادامه، دلایل ارائه می‌شود.

شکل الف :

یکی از موارد نادرست در این شکل آن است که برای هر دو بار مثبت و منفی، خطوط میدان را رو به بیرون گرفته است. در حالی که می‌دانیم برای بار منفی باید خطوط میدان رو به داخل باشد.

شکل ب :

یکی از موارد نادرست در این شکل آن است که خطوط میدان، در نقاط غیرواقع بر خطّ واصل دو بار، جهت میدان برایند را به درستی نشان نمی‌دهند؛ یعنی خطوط میدان آغاز شده از بار مثبت، فقط جهت میدان ناشی از بار مثبت را نشان می‌دهند، و خطوط میدان ختم شده به بار منفی، فقط جهت میدان ناشی از بار منفی را نشان می‌دهند.

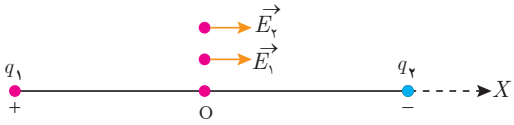
شکل پ :

خطای این شکل، در نادرستی جهت خطوط میدان است. در این شکل، خطوط از بار منفی آغاز و به بار مثبت ختم شده‌اند، که درست نیست.

شکل ت :

این شکل صحیح است. در این شکل، خطوط میدان دوقطبی الکتریکی را می‌بینند. شکل ۱ــ۱۸، کتاب، نمایش سه بعدی همین خطوط را نشان می‌دهد. همچنین در پرسش ۱ــ۵ کتاب، رسم دوبعدی این خطوط را دیدید. در فعالیت ۱ــ۳ کتاب نیز، طرحی واقعی از خطوط میدان دوقطبی الکتریکی را مشاهده کردید.

۱۵ الف) با قراردادن بار آزمون در نقطهٔ O درمی‌یابیم میدان‌های حاصل از بارهای $q_۱$ و $q_۲$ در یک جهت (سوی $+\vec{i}$) هستند.



بنابراین در نقطهٔ O داریم :

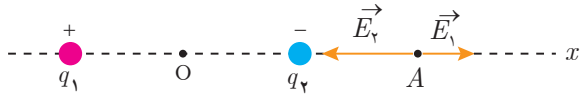
$$\vec{E}_O = \vec{E}_۱ + \vec{E}_۲ = ۲\vec{E}_۱ = ۲k\frac{q_۱}{r_۲^۲}\vec{i}$$

$$= ۲(۹/۰\times ۱۰^۹ \,\mathrm{N.m^۲/C^۲})\frac{(۱/۰\times ۱۰^{-۹}\,\mathrm{C})}{(۰/۰۳۰\,\mathrm{m})^۲}\vec{i}$$

$$= (۲/۰\times ۱۰^۴\,\mathrm{N/C})\vec{i}$$

بنابراین، بزرگ میدان در نقطهٔ O برابر با $۲/۰\times ۱۰^۴\,\mathrm{N}$ و جهت آن به طرف راست ($+\vec{i}$) است.

در نقطه A، میدان‌ها در خلاف جهت یکدیگرند و بنابراین بزرگی میدان‌ها از هم کم می‌شود.



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

که چون، به نقطهٔ A نزدیک‌تر است $E_2 < E_1$ می‌شود و میدان الکتریکی برایند در جهت $-\vec{i}$ خواهد بود :

$$\vec{E}_A = (E_2 - E_1)(-\vec{i})$$

$$= (\frac{kq}{r_2^2} - \frac{kq}{r_1^2})(-\vec{i})$$

$$= (۹/۰\times۱۰^۹ \,\mathrm{N.m^2/C^2})(۱/۰\times۱۰^{-۹}\,\mathrm{C})(\frac{۱}{(۰/۰۳۰\mathrm{m})^2} - \frac{۱}{(۰/۰۹۰\mathrm{m})^2})(-\vec{i})$$

$$= ۸/۹\times۱۰^۳\,\mathrm{N/C}(-\vec{i})$$

بنابراین، بزرگی میدان در نقطهٔ A برابر $E_A = ۸/۹\times۱۰^۳\,\mathrm{N/C}$ ، جهت آن به طرف چپ $(-\vec{i})$ است.

ب) خیر. در پاسخ پرسش ۱۰ استدلال کردیم که برای دو بار نقطه‌ای ناهمنام، نقطه‌ای که در آن میدان الکتریکی برایند صفر باشد، خارج از فاصلهٔ بین دوبار، و در طرف بار با اندازهٔ کوچک‌تر است. با توجه به اینکه در این مسئله، اندازهٔ دو بار مساوی است، مرور آن استدلال به شما نشان می‌دهد چنین نقطه‌ای در فضای پیرامون این دو بار وجود ندارد، که میدان خالص در آن صفر باشد.

۱۶ الف) نیرو از رابطهٔ $F_E=|q|E$ به‌دست می‌آید. بنابراین چون میدان، یکنواخت است نیروی الکتریکی وارد بر بار q در تمام نقاط مسیر برابر است با

$$F_E=(۵۰\times۱۰^{-۹}\,\mathrm{C})(۸/۰\times۱۰^۵\,\mathrm{N/C})=۴/۰\times۱۰^{-۲}\,\mathrm{N}$$

ب) کار نیروی الکتریکی از رابطهٔ $W=|q|Ed\cos\theta$ به‌دست می‌آید. بنابراین در مسیر AB که $\theta=۹۰^\circ$ است. $W_{AB}=۰$ می‌شود، ولی در مسیر BC جابه‌جایی در خلاف جهت نیروی الکتریکی و $\theta=۱۸۰^\circ$ است، داریم :

$$W_{BC}=-|q|Ed$$

$$=-(۵۰\times۱۰^{-۹}\,\mathrm{C})(۸/۰\times۱۰^۵\,\mathrm{N/C})(۰/۴۰\mathrm{m})$$

$$=-۰/۰۱۶\,\mathrm{J}$$

کار نیروی الکتریکی در مسیر ABC برابر با حاصل جمع کار نیروی الکتریکی در مسیرهای AB و BC است، و بنابراین برابر همان $-۰/۰۱۶\,J$ می‌شود.

پ) می‌دانیم $\Delta U=-W_E$ است و بنابراین $\Delta U_E=۰/۰۱۶\,J$ می‌شود.

۱۷ الف) چون بار آزمون در خلاف جهت میدان جابه‌جا شده است و نیروی الکتریکی وارد به میدان هم‌سو با میدان است، $\theta=۱۸۰^\circ$ است، و در نتیجه کار نیروی الکتریکی طبق رابطهٔ $W=\lvert q\rvert Ed\cos\theta$ ، مقداری منفی می‌شود.

ب) چون $\Delta K=۰$ است، مجموع کار نیروی خارجی (W_{ext}) و کار نیروی الکتریکی (W_E) برابر صفر است و بنابراین کار نیروی خارجی، مثبت است.

پ) طبق رابطهٔ $\Delta U=-W_E$ چون $W_E<۰$ شده است، $\Delta U>۰$ می‌شود. پس انرژی پتانسیل زیاد می‌شود.

ت) با توجه به رابطهٔ $\Delta V=\Delta U_E/q$ و مثبت بودن ΔU و q ، ΔV نیز مثبت می‌شود. از طرفی $\Delta V=V_B-V_A$ است. چون $\Delta V>۰$ است، بنابراین پتانسیل B از پتانسیل A بیشتر است.

تبصره : روش دیگر حل چنین مسائلی این است که بگوییم وقتی بار مثبت را برخلاف جهت میدان الکتریکی حرکت می‌دهیم، انرژی پتانسیل الکتریکی زیاد می‌شود. این اظهارنظر در تشابه با گرانش است که وقتی در خلاف جهت میدان گرانشی حرکت کنیم، انرژی پتانسیل گرانشی زیاد می‌شود. افزایش انرژی پتانسیل (برای بار مثبت) و با توجه به رابطهٔ $V=U_E/q$ ، به معنی افزایش پتانسیل است. می‌دانیم که به ازای $\Delta K=۰$ انرژی به کار نیروی خارجی مثبت می‌انجامد و با توجه به اینکه $W_{ext}=-W_E$ می‌شود، کار میدان الکتریکی منفی است.

یک پرسش تکمیلی که می‌توان برای این پرسش مطرح کرد این است که بار را در مسیرهای غیرمستقیمی از A به B نزدیک کرد و دوباره همین پرسش‌ها را مطرح نمود.

۱۸ در شکل الف، در پیرامون همهٔ نقاط مسیر A تا B، خطوط میدان متراکم‌تر از دو شکل دیگر است و بنابراین میدان الکتریکی قوی‌تر و نیروی وارد به پروتون در این حالت بیشتر از بقیهٔ حالت‌ها است و با توجه به اینکه $\vec{a}=\vec{F}/m$ است، شتاب پروتون نیز بیشتر می‌شود. بنابراین، سرعت نهایی پروتون نیز در جابه‌جایی یکسان بیشتر می‌شود. البته خوب بود مسئله ترتیب سرعت‌ها را نیز می‌پرسید. در این صورت، سرعت پروتون در نقطهٔ B برای آرایش (ب) بیشتر از آرایش (پ) می‌شد، زیرا فاصلهٔ خطوط میدان همهٔ نقاط مسیر در شکل پ، در مقایسه با دو شکل دیگر از همه بیشتر است که این به معنی ضعیف‌تر بودن میدان در مقایسه با دو شکل دیگر است. (در حل چنین مسائلی توجه کنید که خطوط میدان در همهٔ شکل‌ها با مقیاس یکسانی رسم شده باشند.)

۱۹ با استفاده از رابطهٔ $|\Delta V|=Ed$، میدان الکتریکی را محاسبه می‌کنیم :

$$E=\frac{|\Delta V|}{d}=\frac{۱۰۰\text{V}}{۲/۰۰\times۱۰^{-۲}\text{m}}=۵/۰۰\times۱۰^{۳}\,\text{V/m}$$

در متن درس اشاره کردیم که با حرکت در سوی خطوط میدان، از پتانسیل الکتریکی بیشتر به سمت پتانسیل الکتریکی کمتر می‌رویم. همچنین دیدیم خطوط میدان از بارهای مثبت آغاز و به بارهای منفی ختم می‌شود. بنابراین، صفحهٔ باردار مثبت در پتانسیل بالاتری نسبت به صفحهٔ باردار منفی قرار دارد.

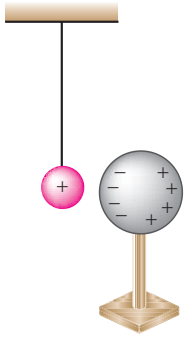
۲۰ (الف) با استفاده از رابطهٔ $U=q\Delta V$ داریم :

$$\begin{aligned}\Delta U&=q(V_۲-V_۱)\\&=(-۴۰\times۱۰^{-۹}\text{C})(-۱۰\text{V}-(-۴۰\text{V}))=-۱/۲\times۱۰^{-۶}\text{J}\\&=-۱/۲\mu\text{J}\end{aligned}$$

چون $\Delta U<۰$ شده است، پس انرژی پتانسیل الکتریکی بار q کاهش یافته است.

ب) چون از انرژی پتانسیل الکتریکی بار کاسته شده است و بار آزادانه حرکت می‌کند، بنابراین از پایستگی انرژی نتیجه می‌گیریم که بر انرژی جنبشی بار افزوده می‌شود و لحظه به لحظه سرعت آن زیاد می‌شود.

۲۱ در متن درس دیدیم وقتی یک رسانای خنثی در میدان الکتریکی خارجی قرار گیرد، بارهای الکتریکی روی سطح رسانا به گونه‌ای القا می‌شوند که میدان الکتریکی خالص درون رسانا صفر شود. بنابراین، با نزدیک کردن کره به آونگ باردار، روی کره بارهای مثبت و منفی مشابه شکل زیر القا می‌شود، به‌طوری که سطح نزدیک به آن دارای بار منفی و سطح دور از آن، دارای بار مثبت می‌گردد. اما توجه کنید بارهای منفی به آونگ نزدیک‌ترند، پس نیروی جاذبهٔ وارد به آونگ بیشتر از نیروی دافعهٔ وارد بر آن می‌شود و کره آونگ را جذب می‌کند. اگر فاصلهٔ کره از آونگ کم باشد، آونگ با کره تماس پیدا می‌کند. اکنون اگر گلولهٔ آونگ هم رسانا باشد، کره و آونگ یک جسم رسانا را تشکیل می‌دهند که باید کلّ بار روی سطح آنها پخش شود تا میدان الکتریکی خالص داخل آن صفر باشد. پس به بیانی ساده، آونگ بارهای منفی کره را خنثی می‌کند و آونگ و کره هر دو دارای بار مثبت می‌شوند و بنابراین آونگ از کره دفع می‌گردد.



۲۲ این پدیده نیز بر اثر القا صورت می‌گیرد. براده‌های ریز آلومینیومی بدون بار مثل یک رسانای خنثی هستند که در میدان الکتریکی حاصل از صفحهٔ پلاستیکی باردار قرار گرفته‌اند. بسته به اینکه بار صفحهٔ پلاستیکی، مثبت یا منفی باشد، در سطح مقابل آن در براده‌ها، بار منفی یا مثبت القا می‌شود که این با توجه به توضیحی که در پاسخ پرسش ۲۱ ارائه شد، مجب جذب براده‌ها به صفحهٔ پلاستیکی می‌شود.

۲۳ با فرض آنکه بار q به یکنواخت روی شش وجه مکعبی ماهواره توزیع شده باشد، روی هر وجه آن باری به اندازهٔ $q/۶$ قرار می‌گیرد. بنابراین، چگالی سطحی بار چنین می‌شود :

$$\sigma=\frac{Q}{A}=\frac{q/۶}{a^۲}=\frac{(۲/۰\times۱۰^{-۹}\mathrm{C})/۶}{(۰/۴۰\mathrm{m})^۲}=۲/۰\times۱۰^{-۹}\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^۲}\approx ۲/۱\times۱۰^{-۹}\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^۲}$$

۲۴ ظرفیت خازن فقط به شکل هندسی خازن (وجنس عایق آن) نه به بار اختلاف پتانسیل بین صفحه‌ها بستگی دارد. بنابراین الف) و ب) هیچ تأثیری بر ظرفیت خازن ندارند.

۲۵ بار خازن از رابطهٔ $Q=CV$ به‌دست می‌آید. با توجه به اینکه ظرفیت خازن ثابت است، بنابراین نمو (تغییر) Q داریم :

$$Q=CV=C(V_۲-V_۱)$$

و از آنجا

$$C=\frac{\Delta Q}{V_۲-V_۱}=\frac{۱۵\times۱۰^{-۶}\mathrm{C}}{۴۰\mathrm{V}-۲۸\mathrm{V}}=۱/۲۵\times۱۰^{-۶}\mathrm{F}$$

$$\approx ۱/۲\mu\mathrm{F}$$

۲۶ وقتی دی‌الکتریکی قطبی مانند آب در میدان الکتریکی خارجی قرار گیرد، مولکول‌های دوقطبی می‌کوشند در جهت میدان الکتریکی هم‌ردیف شوند، به‌طوری که سرِ منفی مولکول‌ها در جهت مقابل پیکانهٔ خطوط میدان الکتریکی، و سرِ مثبت مولکول‌ها در همان جهت پیکانهٔ خطوط میدان الکتریکی قرار گیرند. بنابراین وقتی آب در میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرد. مولکول‌های دوقطبی با میدان هم‌سو می‌شوند و مثلاً اگر بادکنک بار منفی پیدا کرده باشد، سرِ مثبت مولکول‌های دو قطبی در برابر آن قرار می‌گیرد. بادکنکِ منفی، سرِ مثبت هر مولکول را جذب و سرِ منفی همان مولکول را دفع می‌کند. با توجه به مقایسهٔ فاصلهٔ سرهای مثبت و منفی هر مولکول تا بادکنک، درمی‌یابیم نیروی جاذبه قوی‌تر از دافعه است و این باعث جذب آن به طرف بادکنک می‌شود.

۲۷ برای مولکول‌های دو قطبی موجود در کاغذ (مثل مولکول‌های آب)، پاسخ همان پاسخ پرسش ۲۶ است. برای مولکول‌های غیرقطبی موجود در کاغذ، همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، وقتی در میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرند، مولکول‌ها بر اثر القا، قطبیده می‌شوند و اصطلاحاً مولکول قطبیده می‌شود. میدان الکتریکی باعث می‌شود مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا شوند، به‌طوری که سرِ منفی آنها در اینجا در مقابل بار مثبت شیشه قرار گیرد و بدین ترتیب جذب آن شود.

۲۸ از ظرفیت یک خازن تخت، مساحت صفحه‌های Aی آن را به‌دست می‌آوریم :

$$A=\frac{Cd}{\varepsilon_0}=\frac{(1/0\,\mathrm{F})(1/0\times10^{-3}\,\mathrm{m})}{(8/85\times10^{-12}\,\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}})}=1/1\times10^{8}\,\mathrm{m}^2$$

توجه کنید این مساحت، متناظر با مساحت مربعی به ضلع حدوداً ۱۰km است. حجم چنین خازنی دست کم برابر $Ad=1/1\times10^{5}\,\mathrm{m}^2$ است، یعنی مکعبی به ضلع تقریبی ۵۰m. بنابراین امکان ساختن چنین خازنی *به طریق معمول* ناممکن و یا دست‌کم غیر معقول است.

جالب است بدانید یکی از شوخی‌ها رایج در قدیم این بود که برخی از اساتید به دانشجویان خود می‌گفتند : «برو از آزمایشگاه یک خازن ۱F بیاور!» البته امروزه می‌توان خازن‌های یک فارادی یا حتی با ظرفیت‌های بزرگ‌تری را به ضلع فقط چند سانتی‌متر ساخت. شگرد آن این است

که فضای میان صفحه‌ها با مواد مناسبی پر شود. مثلاً اَبَرخازن‌ها که در فعایت ۱ــ۱۱ به آن پرداختیم، از این دست خازن‌ها هستند.

۲۹ توجه کنید که در این مسئله، خازن همچنان به باتری بسته شده است و بنابراین اختلاف پتانسیل بین صفحه‌های آن تغییری نمی‌کند. پس گزینهٔ (ب) نادرست است. با دو برابر کردن فاصلهٔ بین صفحه‌ها، ظرفیت خازن طبق رابطهٔ $C=\varepsilon_0 A/d$ نصف می‌شود و بنابراین گزینهٔ (پ) نیز نادرست است. با توجه به اینکه ظرفیت خازن کاهش می‌یابد، در حالی که اختلاف پتانسیل ثابت است، بار خازن طبق رابطهٔ $Q=CV$ کاهش پیدا می‌کند و بنابراین گزینهٔ (ت) نیز نادرست است.

تنها گزینهٔ درست، گزینهٔ (الف) است؛ چرا که طبق رابطهٔ $|\Delta V|=Ed$، با توجه به اینکه اختلاف پتانسیل ثابت است و فاصلهٔ صفحه‌ها دو برابر می‌شود، E نصف می‌گردد.

۳۰ با استفاده از رابطه‌های $C=kC_0$ و $C_0=\frac{\varepsilon_0 A}{d}$ داریم :

$$C = k\varepsilon_0\frac{A}{d}$$

$$= (۴/۹)(۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\ \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}})\frac{(۱/۰۰\,\mathrm{m})^۲}{(۰/۵۰۰\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{m})} = ۸/۶۷\times۱۰^{-۸}\,\mathrm{F} \approx ۸۷\,\mathrm{nF}$$

۳۱ جرقهٔ حاصل، بزرگ‌تر می‌شود. این انرژی از کاری حاصل می‌شود که با افزایش فاصلهٔ صفحات خازن (بر علیه جاذبهٔ الکتریکی صفحه‌ها) توسط ما ایجاد شده است. روش دیگر آن است که بگوییم ظرفیت خازن کم شده است، ولی بار تغییر نکرده است. طبق رابطهٔ $V=Q/C$ ، این به معنی افزایش اختلاف پتانسیل است. افزایش ولتاژ، خود به معنی افزایش اختلاف انرژی پتانسیل الکتریکی است. این را به‌طور مستقیم از رابطهٔ $U=Q^۲/۲C$ نیز می‌توانستیم دریابیم. پس هنگام تخلیهٔ خازن، جرقهٔ پر انرژی‌تر و بزرگ‌تری خواهیم داشت.

۳۲ با توجه به اینکه بار و ظرفیت خازن در مسئله دخالت دارند از رابطهٔ $U=Q^۲/۲C$ برای انرژی خازن استفاده می‌کنیم. اما پیش از آن بهتر است نگاهی به مفهوم این مسئله بیندازیم. اگر خازن در ابتدا بدون بار باشد، تصور آن ساده‌تر است. مثلاً تصور کنید با استفاده از یک «موچین سحرآمیز» الکترون‌ها را از یک صفحهٔ خازن برداشته و به نوبت به صفحهٔ دیگر منتقل می‌کنیم. بر اثر این کار میدانی الکتریکی بین صفحه‌ها برقرار می‌شود و جالب است که این میدان در جهتی است که با انتقال بیشتر بار مخالفت می‌کند. بنابراین، وقتی بار بر روی صفحه‌های خازن بیشتر و بیشتر می‌شود، مجبورید برای انتقال بارهای بیشتر، به‌طور مدام کار بیشتری انجام دهید. البته در عمل می‌دانید که این کار توسط باتری صورت می‌گیرد. بنابراین، ما در اینجا مسئله‌ای کاملاً ذهنی داریم و عملاً داریم فرض می‌کنیم که با یک موچین سحرآمیز بارها را حرکت می‌دهیم و البته لحظه‌ای بینابینی در حین این روند را در نظر گرفته‌ایم؛ یعنی پس از اینکه موچین سحرآمیز با باردار کردن صفحه‌ها، میدان الکتریکی ایجاد کرده است و داریم به لحظه‌ای توجه می‌کنیم که موچین در حال بردن $+۳/۰\,\mathrm{mC}$ بار از صفحهٔ منفی به صفحهٔ مثبت است.

بنابراین، اگر بار صفحه‌ها را در پیش از این لحظه Q در نظر بگیریم، پس از لحظهٔ مورد نظر بار به $Q+\Delta Q$ تبدیل شده است. در نتیجه، تغییر انرژی پتانسیل با استفاده از رابطهٔ $U=Q^2/2C$ چنین می‌شود :

$$\Delta U=\frac{(Q+\Delta Q)^2}{2C}-\frac{Q^2}{2C}=\frac{\Delta Q^2+2Q\Delta Q}{2C}$$

$$=\frac{(3/0\times10^{-3}\,\mathrm{C})^2+2Q(3/0\times10^{-3}\,\mathrm{C})}{2(12\times10^{-6}\,\mathrm{F})}$$

$$=0/375+Q(0/25\times10^{3})=8$$

و در نتیجه $Q=3/05\times10^{-2}\,\mathrm{C}\approx3/1\,\mathrm{mC}$ می‌شود.

تبصره : خوب است از دیدگاه ریاضی نیز نشان دهیم چرا کار این «موچین سحرآمیز» برابر افزایش انرژی پتانسیل خازن است. در لحظهٔ شروع جابه‌جایی بار، اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ خازن Q/C و در پایان جابه‌جایی $(Q+\Delta Q)/C$ است. با توجه به اینکه اختلاف پتانسیل دو صفحهٔ خازن تابعی درجه اول از بار خازن است $(V=Q/C)$، می‌توان نتیجه گرفت که جابه‌جایی بار ΔQ تحت اختلاف پتانسیل متوسط $\overline{V}$ صورت گرفته است که برابر میانگین مقادیر اولیه و نهایی پتانسیل است که برابر نصف مجموع دو مقدار Q/C و $(Q+\Delta Q)/C$ می‌شود. در آن صورت، پتانسیل متوسط $\overline{V}$ برابر $(Q+\Delta Q)/2C$ به‌دست می‌آید که ضرب آن در ΔQ، همان کار نیروی خارجی در این جابه‌جایی بار را به‌دست می‌دهد. از آنجا درخواهیم یافت که $W=\overline{V}\Delta Q$ برابر مقدار محاسبه شده در بالا برای ΔU است. یعنی کار نیروی خارجی برابر افزایش انرژی پتانسیل خازن شده است.

فصل دوم

جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- با جریان الکتریکی و سرعت سوقِ الکترون‌های آزاد آشنا می‌شوند.
- با مقاومت الکتریکی، قانون اهم و عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی آشنا می‌شوند.
- تأثیر دما بر مقاومت الکتریکی را می‌شناسند.
- با انواع مقاومت‌ها، مقاومت‌های خاص و دیودها آشنا می‌شوند.
- با مفهوم نیروی محرکهٔ الکتریکی و نقش آن در مدارهای الکتریکی آشنا می‌شوند.
- فرق منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی واقعی و آرمانی را می شناسد.
- با مفهوم افت پتانسیل، و توان تولیدی و مصرفی در مدارهای الکتریکی آشنا می‌شوند.
- با روش بستن متوالی و موازی مقاومت‌ها و چگونگی تعیین مقاومت معادل آنها آشنا می‌شوند.
- توان خروجی یک منبع نیروی محرکهٔ واقعی را می‌شناسند.

چه شناختی مطلوب است؟

- همهٔ بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. جهت واقعی حرکت بارها برخلاف جهت قراردادی است و سرعت سوق الکترون‌ها متفاوت از سرعت انتشار میدان الکتریکی است.
- جریان عبوری از یک مقاومت اهمی همواره با اختلاف پتانسیل اعمال‌شده به دوسر آن رابطهٔ مستقیم دارد.
- مقاومت یک رسانا به طول، مساحت مقطع و جنس آن بستگی دارد.
- افزایش دما، موجب افزایش برخورد حامل‌های بار با شبکهٔ اتمی رسانای فلزی و در نتیجه افزایش مقاومت رسانا در برابر عبور جریان می‌شود.
- مقاومت‌های پیچه‌ای (از جمله رئوستا) و مقاومت‌های ترکیبی از انواع مقاومت‌ها هستند و ترمیستور و مقاومت‌های نوری، به ترتیب مقاومت‌های وابسته به دما و نور هستند. دیود قطعه‌ای است که به عنوان یکسوکنندهٔ جریان در مدارهای الکتریکی عمل می‌کند.
- برای اینکه بارهای الکتریکی را در یک مدار به حرکت واداریم، به وسیله‌هایی مانند باتری نیاز داریم تا بارهای مثبت را در خلاف جهت میدان الکتریکی از پتانسیل پایین‌تر به پتانسیل بالاتر ببرند.
- هرگاه در جهت جریان مقاومتی عبور کنیم، پتانسیل کاهش می‌یابد و بالعکس. هرگاه از پایانهٔ منفی منبع نیروی محرکه به سمت پایانهٔ مثبت آن حرکت کنیم، پتانسیل افزایش می‌یابد و بالعکس.
- در هر دور زدن کامل حلقه‌ای از مدار، جمع جبری اختلاف پتانسیل‌های اجزای مدار صفر است.
- منبع‌های نیروی محرکهٔ الکتریکی واقعی همواره دارای مقاومت داخلی هستند.
- یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی در دوسر آن برقرار است، می‌تواند بسته به آنکه توان آن مثبت یا منفی باشد به بقیهٔ مدار انرژی بدهد یا از بقیهٔ مدار انرژی بگیرد.
- مجموع جریان‌هایی که به هر نقطهٔ انشعاب وارد می‌شوند برابر با مجموع جریان‌هایی است که از آن نقطه خارج می‌شوند.
- با دانستن مقاومت‌ها، مقاومت‌های معادلِ مقاومت متوالی یا موازی به‌دست می‌آید.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شوند؟

- جهت قراردادی جریان چیست و آیا هر شارشی از بارهای متحرک لزوماً جریان الکتریکی ایجاد می‌کند؟
- فرق سرعت سوق الکترون‌های آزاد و سرعت انتشار میدان الکتریکی در مدار چیست؟
- فرق تعریف مقاومت و قانون اهم چیست و به چه رساناهایی، رسانای اهمی گفته می‌شود؟
- عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی یک رسانا چیست؟
- رفتار مقاومت یک رسانا با دما چگونه است و چرا در نیم‌رساناها این رفتار متفاوت است؟
- انواع مقاومت‌ها و ساختار آنها چیست؟
- مقاومت‌های خاص و دیودها و کاربردهای آنها کدامند؟
- چگونه منبع‌های نیروی محرکهٔ الکتریکی، جریان ثابتی را در مدار برقرار می‌کنند؟
- فرق یک منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی آرمانی با یک منبع نیروی محرکهٔ واقعی چیست؟
- هرگاه در یک مدار در جهت جریان از مقاومتی عبور کنیم، پتانسیل چگونه تغییر می‌کند؟
- هرگاه در یک مدار از پایانهٔ منفی به طرف پایانهٔ مثبت یک منبع نیروی محرکه حرکت کنیم، پتانسیل چگونه تغییر می‌کند؟
- در هر دور زدن کامل حلقه‌ای از مدار، جمع جبری اختلاف پتانسیل چگونه می‌شود؟
- فرق توان تولیدی در مدارهای الکتریکی با توان مصرفی چیست و در چه صورت یک جز مدار به بقیهٔ مدار انرژی می‌دهد و یا این جز از بقیهٔ مدار انرژی می‌گیرد؟
- توان خروجی یک منبع نیروی محرکه چیست؟
- انواع ترکیب مقاومت‌ها چگونه است و مقاومت معادل ترکیبی از مقاومت‌ها را چگونه محاسبه می‌کنند؟
- در هر نقطهٔ انشعاب، جریان‌ها چگونه رفتار می‌کنند؟

در پایان این واحد یادگیری دانش‌آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می‌کنند؟

دانشی

با مفاهیم جریان الکتریکی، سرعت سوق، مقاومت الکتریکی و قانون اهم، عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی، مقاومت ویژه، تغییر مقاومت با دما و رفتار مقاومت رساناها و نارساناها، انواع مقاومت‌ها و کدگذاری رنگی مقاومت‌های کربنی، مقاومت‌های خاص از جمله ترمیستور و مقاومت‌های نوری، و دیودها، منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی واقعی و آرمانی، قاعده‌های حلقه و انشعاب، توان تولیدی و توان مصرفی در مدارهای الکتریکی، توان خروجی یک منبع نیروی محرکهٔ واقعی، ترکیب مقاومت‌ها و تعیین مقاومت معادل در اتصال‌های متوالی و موازی آشنا می‌شوند.

مهارتی

به مهارت بستن مدارهای الکتریکی ساده، شناسایی باتری‌ها از روی آمپر ــ ساعت آنها، مهارت انجام آزمایش تحقیق قانون اهم، مهارت انجام آزمایش تعیین عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی، تعیین مقاومت یک لامپ رشته‌ای، چگونگی کار یک مقاومت پلاتینی، نمره‌بندی مهندسی سیم‌ها، تشخیص انواع مقاومت‌ها از یکدیگر و خواندن مقاومتِ مقاومت‌های ترکیبی از روی حلقه‌های روی آنها، مهارت انجام آزمایش با ترمیستور، مقاومت‌های نوری، دیود و کاربردهای آنها، تشخیص آثار تخریبی الکتریسیته بر بدن، محاسبهٔ مقاومت داخلی باتری‌ها و تشخیص تفاوت یک باتری نو از فرسوده، چگونگی تعیین قیمت برق مصرفی، مهارت انجام آزمایش ژول، لامپ‌های سه‌راهه و کاربردهای آنها و نیز کلیدهای الکترونیکی و طرز کار آمپرسنج، ولت‌سنج و اهم‌سنج آشنا می‌شوند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

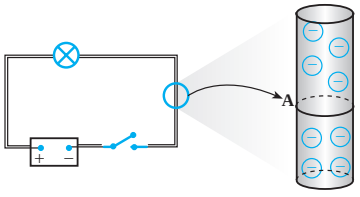
بنا به صلاحدید مدرس، ۱۴ جلسهٔ ۹۰ دقیقه‌ای

توجه دانش‌آموزان را به تصویر ورودی فصل و متن زیر آن جلب کنید تا به اهمیت دانشی که در این فصل می‌آموزند آگاه شوند. این تصویر بدان جهت انتخاب شده است که به یکی از کاربردهای مفاهیم این فصل اشاره شود. افزون بر این تصویر می‌توانید با مثال‌های کاربردی دیگر، زمینهٔ مناسبی را برای ورود به فصل مهیا سازید.

۲ــ۱ ــ جریان الکتریکی

خوب است با توجه به دانشی که دانش‌آموزان از فصل پیش کسب کرده‌اند، علاوه بر جهت جریان، جهت میدان الکتریکی نیز پرسیده شود که برخلاف جهت حرکت خالص بارهای منفی است و بنابراین در جهت جریان قرار دادی می‌شود.

می‌توانید به‌گونه‌ای ملموس با طرح پرسش‌هایی که دانش‌آموزان می‌توانند با دانشی که از فصل ۱ به‌دست آورده‌اند به آنها پاسخ دهند، این بحث را بیشتر بشکافید. مثلاً برای مدار شکل ۲ــ۵، شکلی مانند زیر رسم کنید و اشاره کنید که با بستن کلید، بین دو رسانا اختلاف پتانسیل ایجاد می‌شود و از آنها بخواهید حرکت الکترون‌های آزاد و اینکه جهت جریان آیا از پتانسیل بیشتر است به‌سمت پتانسیل کمتر یا برعکس، توضیح دهند. انتظار داریم دانش‌آموزان به برقراری میدان الکتریکی در داخل رسانا اشاره کنند و براساس آن، نیروی وارد بر بارالکتریکی را توضیح دهند و نتیجه بگیرند شارش آرامی از الکترون‌های آزاد در خلاف جهت میدان الکتریکی به‌وجود می‌آید و اینکه اگر در جهت میدان حرکت کنیم در واقع به طرف نقطه‌هایی با پتانسیل الکتریکی کمتر می‌رویم.



خوب است در مورد شکل ۲ــ۷ اشاره شود که در حضور میدان الکتریکی، در واقع امر، هر بخش مسیر زیگزاگ اندکی خمیده می‌شود.

در این فیلم ایجاد نوعی جریان الکتریکی را مشاهده می کنید.

فیلم

خوب است تأکید شود که آنچه اصطلاحاً سرعت جریان می‌نامیم عبارت از سرعت انتشار تغییرات میدان الکتریکی در امتداد رسانا است و ابداً سرعت حرکت (سوق) حامل‌های بار نیست. مثال مکانیکی مشابه دیگر سوخت‌رسانی از یک شهر به شهر دیگراست. با افزایش فشار در شهر مبدأ، سوخت با سرعت زیادی انتقال می‌یابد و در زمان کوتاهی به شهر دوم می‌رسد. ولی حرکت ذراتِ خودِ سوخت بسیار کند است و ممکن است روزها طول بکشد تا ذرهٔ معینی از سوخت، از شهر اول به شهر دوم برسد.

پاسخ فعالیت ۲ــ۱

وقتی کلید را می‌زنیم، میدان الکتریکی با سرعتی نزدیک به سرعت نور برقرار می‌شود و الکترون‌های آزاد در سرتاسر سیم به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر این میدان قرار می‌گیرند. توجه کنید این ربطی به زمانی ندارد که طول می‌کشد تا یک الکترون از کلید به لامپ برسد، بلکه این زمان انتشار میدان الکتریکی است. برای آنکه به درکی از موضوع برسید، یک مثال خوب آن است که یک گروه سرباز (در تشابه با الکترون‌ها) را درنظر بگیرید که به حالت خبردار ایستاده‌اند. وقتی دستور قدم رو صادر می‌شود (در تشابه با زده شدن کلید) این دستور با سرعت صوت (در تشابه با سرعت نور در مسئلهٔ ما) به‌گوش سربازان (الکترون‌ها) می‌رسد و آنها هم‌زمان گام برمی‌دارند؛ زیرا این سرعت بسیار سریع‌تر از سرعت حرکت سربازان (الکترون‌ها) است و به همین علت است که سربازان (الکترون‌ها) تقریباً هم‌زمان شروع به حرکت می‌کنند.

خوب است تأکید شود انتقال بار $+q$ در یک جهت، یا بار $-q$ در خلاف جهت آن کاملاً مشابه یکدیگرند. بنابراین باری که در رابطهٔ **۲ــ۱** ظاهر شده حاکی از مجموع بارهایی است که عملاً توسط حامل‌های بار مثبت در جهت قراردادی جریان، و توسط حامل‌های بار منفی در خلاف این جهت انتقال یافته است.

پاسخ تمرین ۲ــ۱

از رابطهٔ **۲ــ۱** به‌صورت $\Delta t = \Delta q / I$ استفاده می‌کنیم.

الف)
$$\Delta t = \frac{۵۰\text{Ah}}{۵/۰\text{A}} = ۱۰\text{h}$$

ب) اکنون داریم :

$$\Delta t = \frac{۱۰۰۰\text{mAh}}{۱۰۰\mu\text{A}} = \frac{۱۰۰۰\text{mAh}}{۰/۱۰۰\text{mA}} = ۱/۰۰\times۱۰^{۴}\text{h}$$

این زمان کمی بیشتر از یک سال است و مثلاً یک باتری قلمی تقریباً در چنین مدتی، انرژی مورد نیاز یک ساعت دیواری را تأمین می‌کند.

توجه داده شود که یکای آمپر ــ ساعت یک یکای غیر SI (متری) بار الکتریکی و معادل ۳۶۰۰C است که عموماً برای آنچه *ظرفیت باتری* گفته می‌شود به کار برده می‌شود. بار الکتریکی یکای غیرمتری دیگری از جمله *ثابت فاراده* نیز دارد که بار یک مول الکترون و تقریباً برابر ۲۶/۸Ah است.

فیلم

در این فیلم، تزریق دارو به روش *یون رانی* را می‌بینید.

پرسش های پیشنهادی

۱ چرا هنگام آذرخش، وقتی که برق می‌زند، همه چیز بی‌حرکت به‌نظر می‌رسد؟

پاسخ : علت آن است که برق مانند هر جرقهٔ الکتریکی دیگری، مدت زمان بسیار کوتاهی طول می‌کشد و در این مدت کوتاه، کمتر چیزی می‌تواند آنقدر تغییر مکان دهد تا با چشم دیده شود.

۲ در هر یک از شکل‌های زیر با بستن کلید k، بارهای الکتریکی از کدام جسم به دیگری منتقل می‌شود؟ اجسام و سیم‌های رابط، رسانا هستند و اندازهٔ اجسام با هم برابر است.

الف) $q_1(+)$ — k — $q_2(+)$; $q_1 > q_2$

ب) $q_1(-)$ — k — $q_2(-)$; $q_1 = |q_2|$

پ) $q_1(+)$ — k — q_2 ; $q_2 = 0$

ت) $q_1(-)$ — k — q_2 ; $q_2 = 0$

پاسخ : می‌دانیم در رساناها، الکترون‌های آزاد جابه‌جا می‌شوند. بنابراین :

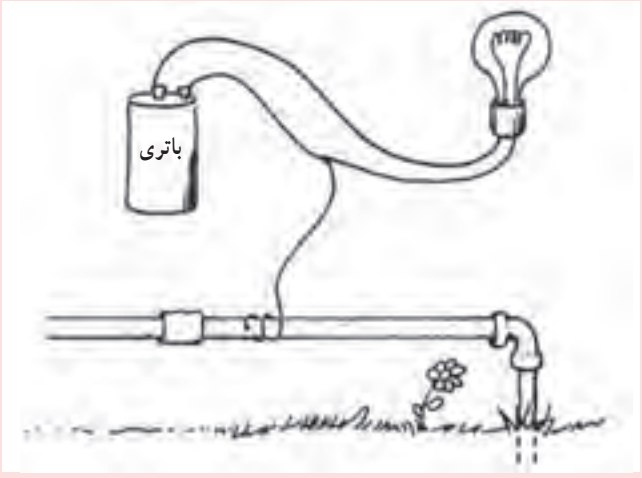
الف) الکترون‌ها از جسم (۲) به جسم (۱) آنقدر جابه‌جا می‌شوند تا بار دو جسم یکی شود؛ یعنی بار هر دو جسم ($\frac{q_۱ + q_۲}{۲}$) می‌شود.

ب) الکترون‌ها از جسم (۲) به جسم (۱) جابه‌جا می‌شوند و چون اندازهٔ دو بار یکسان است، سرانجام هر دو جسم بدون بار می‌شوند.

پ) از جسم (۲) آنقدر الکترون‌ها به سمت جسم (۱) جابه‌جا می‌شود تا بار هر دو جسم یکسان شود؛ یعنی بار هر دو جسم ($\frac{+q_۱}{۲}$) می‌شود.

ت) از جسم (۱) الکترون‌ها به سمت (۲) آنقدر جابه‌جا می‌شود تا بار دو جسم یکسان شود؛ یعنی هر دو جسم دارای بار منفی ($\frac{-q}{۲}$) شوند.

۳ اگر مطابق شکل زیر یک سیم اتصال به زمین شود، آیا لامپ روشن خواهد ماند؟



پاسخ : بله.

تمرین‌های پیشنهادی

یکی از مدارهای یک وسیلهٔ الکتریکی با جریان ۲/۵ mA کار می‌کند. در مدت ۱/۰ s چه تعداد الکترون به این بخش وسیله وارد و از آن خارج می‌شود؟

پاسخ : از رابطهٔ ۲ــ۱ داریم :

$$\Delta Q = I\,\Delta t = (۲/۵ \times ۱۰^{-۳}\mathrm{A})\,(۱/۰\mathrm{s}) = ۲/۵ \times ۱۰^{-۳}\mathrm{C}$$

هر الکترون بار $e = ۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\mathrm{C}$ دارد. بنابراین تعداد الکترون برابر است با

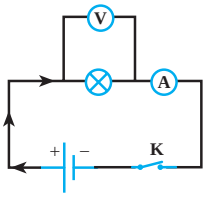
$$N = \frac{\Delta Q}{e} = \frac{۲/۵ \times ۱۰^{-۳}\mathrm{C}}{۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\mathrm{C}} = ۱/۶ \times ۱۰^{۱۶}$$

۲ــ۲ ــ مقاومت الکتریکی و قانون اهم

خوب است دوباره اشاره شود که اختلاف پتانسیل را در اینجا با نماد V مشخص کرده‌ایم.

برای اطلاعات عمومی می‌توان اشاره کرد که وارون مقاومت الکتریکی، رسانای الکتریکی نام دارد و یکای آن زیمنس (Siemens) نامیده می‌شود. اما کمیتی که معمولاً در کتاب‌های الکتریسیته معرفی می‌شود، رسانندگی الکتریکی است که وارون مقاومت ویژه است.

خوب است پیش از معرفی اسباب تحقیق قانون اهم از دانش‌آموزان بخواهیم مروری بر دانش‌های قبلی خود در دورهٔ اول متوسطه داشته باشند و اجزای سادهٔ مدار و نمادهای آن را به خاطر آورند و مثلاً بتوانند مداری مانند مدار شکل زیر را ببندند و آن را با علامت‌های اختصاری این اجزا نمایش دهند.



خوب است دوباره تأکید شود قانون اهم دربارهٔ همهٔ رساناها برقرار نیست. این قانون دربارهٔ رساناهایی برقرار است که مقاومتشان به ولتاژ اعمال‌شده و جریان بستگی نداشته باشد. به‌همین دلیل، گازهای یونیده که رسانای جریان هستند، از قانون اهم پیروی نمی‌کنند؛ زیرا مقاومت این گازها به ولتاژ اعمال‌شده بستگی دارد.

۲ــ۳ ــ عوامل مؤثر بر مقاومت الکتریکی

انجام فعالیت ۲ــ۲ بسیار اهمیت دارد و با انجام آن دانش‌آموزان حدس می‌زنند مقاومت یک رسانای فلزی به چه عامل‌هایی بستگی دارد و از آنجا به رابطهٔ بین مقاومت و متغیرهای مرتبط دست می‌یابند.

دانستنی برای معلم

خطر برخی از تجهیزات پزشکی

برخی از تجهیزات پزشکی، مسیر مستقیمی از جریان را به قلب فراهم می‌کنند. ولی این کار مثل یک شمشیر دو دَم است. زیرا در این صورت جریان‌های خیلی کوچک نیز می‌توانند خطرآفرین 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 وسیلهٔ 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.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ جدول‌های زیر، جریان I را که از دو وسیله به ازای چند مقدار اختلاف پتانسیل می‌گذرد، نشان می‌دهد. با استفاده از این داده‌ها تعیین کنید کدام یک از این دو وسیله از قانون اهم پیروی می‌کنند؟

وسیلهٔ ۱

I (A)	V (V)
۴/۵۰	۲/۰۰
۰/۷۵	۳/۰۰
۹/۰۰	۴/۰۰

وسیلهٔ ۲

I (A)	V (V)
۱/۵۰	۲/۰۰
۲/۲۰	۳/۰۰
۲/۸۰	۴/۰۰

پاسخ : وسیلهٔ ۲.

۲ مقاومت بدن انسان می‌تواند چندین ده‌هزار اهم باشد. این مقاومت را مساوی $36000\ \Omega$ بگیرید. جریانی را محاسبه کنید که با لمس سیم $220\ V$ از بدن شخص می‌گذرد.

پاسخ : $6/1\ mA$.

این تشابه را می‌توان به طول لوله نیز تعمیم داد. مقاومت لولهٔ بلند در برابر آب بیشتر از مقاومت لولهٔ کوتاه است. همچنین اگر لوله را با پنبه یا ماسه نیم‌مسدود کنند، این مانند مقاومت ویژه عمل می‌کند که مقاومت در برابر جاری شدن آب را زیاد می‌کند. آهنگ جاری شدن آب مانند جریان الکتریکی، و اختلاف فشار مانند اختلاف پتانسیل است.

در استفاده از معادلهٔ ۲ــ۴ توجه داده شود که چون دما به‌صورت اختلاف ظاهر شده است، می‌توان از هر دو مقیاس کلوین و سلسیوس استفاده کرد. همچنین خوب است تذکر داده شود که دانش‌آموزان α در اینجا را برای ضریب انبساط که در سال گذشته خوانده‌اند اشتباه نگیرند. البته می‌توان برای اینکه این تمایز جا بیفتد به تشابهات دو رابطه و نیز تمایز آنها اشاره شود.

در اینجا فعالیت پیشنهادی این بخش حتماً مطرح شود.

فیلم

در این فیلم رفتار یک مایع اَبَر شاره را می‌بینید.

خوب است دلیل استفاده از مقاومت‌های متغیر بیان شود. این مقاومت‌ها برای هدف‌های مختلف از جمله محدود کردن جریان در مدار، ایجاد اختلاف پتانسیل‌هایی که بتوان به‌عنوان سیگنال به‌کار برد، یا فراهم آوردن ایمنی به‌کار می‌روند. به همین منظور در آزمایشگاه‌ها از مقاومت‌های متغیر استفاده می‌کنند. در آزمایشگاه معمولاً ابتدا مدارها را در حالت بیشترین مقاومت تنظیم می‌کنند و سپس مقاومت آن را به‌تدریج تغییر می‌دهند تا به جریان دلخواه برسند. دلیل این امر آن است که معمولاً عبور جریان زیاد از یک قطعهٔ الکتریکی سبب سوختن آن می‌شود. وقتی مقاومت زیاد باشد، جریان کمی از مدار می‌گذرد و با تنظیم مقاومت می‌توان به جریان مناسب دست یافت.

خوب است اشاره شود که مقاومت‌ها را می‌توان گذشته از مقاومت الکتریکی، توسط بیشینهٔ توان مصرفی مجاز نیز طبقه‌بندی کرد. همان‌طور که خواهیم دید توان مصرفی مقاومت‌ها از رابطهٔ V^2/R به‌دست می‌آید. بنابراین وقتی مقاومت به ولتاژ بالایی وصل شود، بسیار بیشتر از زمانی که به ولتاژ کمی وصل شده است، گرم می‌شود. اگر توان مصرفی از حدّ معینی فراتر رود، دمای مقاومت چنان بالا می‌رود که به خود و اجزای مجاور صدمه می‌زند. بیشینهٔ توان مصرفی می‌تواند از $\frac{1}{4}$ وات در وسیله‌های الکتریکی تا ۱۰۰ وات یا بیشتر در صنایع غذایی باشد.

فیلم

در این فیلم سوختن مقاومت بر اثر جریان الکتریکی زیاد را می‌بینید.

پاسخ تمرین ۲ــ۲

با استفاده از جدول ۲ــ۲ و دستورالعمل متن درس داریم :

$$R = (\text{رقم اول})(\text{رقم دوم}) \times ۱۰^{(\text{رقم سوم})}$$

$$= (۴)(۷) \times ۱۰^{۲} = ۴۷۰۰\ \Omega$$

بنابراین، مقدار مقاومت نشان داده شده $۴/۷k\,\Omega$ و با تلرانس ۱۰ درصد است. یعنی مقدار مجاز انحراف $\frac{۱۰}{۱۰۰}(۴۷۰\,\Omega) = ۴۷۰\Omega$ می‌شود. به عبارتی، مقاومت می‌تواند $۴/۷k\,\Omega \pm ۰/۴۷۰k\,\Omega$ باشد.

(توجه کنید تلرانس به بیان آماری در واقع انحراف معیار توزیع میانگین این نوع مقاومت‌های کارخانهٔ سازنده در اندازه‌گیری‌های مقاومت الکتریکی است.)

فیلم

در این فیلم‌ها چگونگی کار نوعی ترمیستور در مدار را می‌بینید.

توجه کنید روشنایی (با یکای LUX) یا شدت روشنایی (با یکای Candlela) که در کتاب فیزیک (۱) آمده متفاوت است ولی با آن رابطه دارد. یک مقدار نور مشخص اگر بر سطح بزرگ‌تری پخش شود، روشنایی کمتری ایجاد خواهد کرد. رابطهٔ lx با cd برابر است با

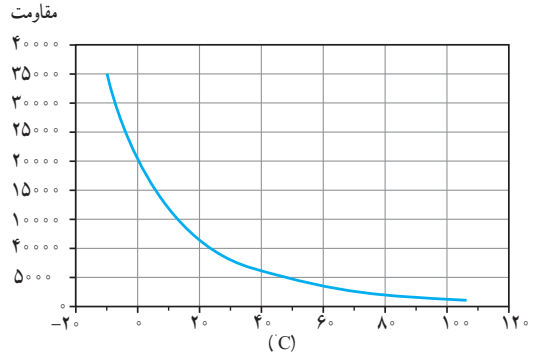
$$۱lx = ۱cd.sr/m^{۲}$$

که در آن sr یکای SI ی زاویه فضایی است.

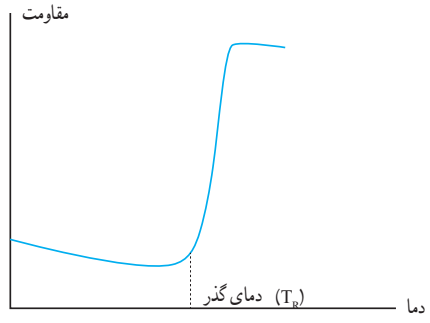
پاسخ فعالیت ۲ــ۳

ترمیستورها بر دو نوع NTC[۱] و PTC[۲] هستند. NTCها از نیم‌رساناهای خالص مانند سیلسیم یا ژرمانیم ساخته شده‌اند که همان‌طور که در مبحث تغییر مقاومت ویژه با دما دیدیم، با افزایش دما بر تعداد حامل‌های بار آنها افزوده می‌گردد و بدین ترتیب از مقاومت آنها کاسته می‌شود. به‌عبارت دیگر، ضریب دمایی مقاومت ویژه αی آنها منفی است (شکل الف).

PTCها خود بر دو نوع‌اند. یک نوع که به نام *سیلیستور*[۳] شناخته شده‌اند در واقع از سیلیسیوم غیرخالص (آلاییده) ساخته شده است که با افزودن یک ناخالصی به سیلیسیوم، ویژگی رسانش الکتریکی پیدا کرده است. این نوع PTCها مانند فلزات رفتار کرده و مقاومت آنها با افزایش دما زیاد می شود. به عبارت دیگر، ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ آنها مثبت است. نوع دیگر آنها، رفتار ویژه‌ای دارد، به‌طوری که ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ آنها تا پیش از دمایی خاص موسوم به دمای گذار (با نماد T_R که به آن *نقطهٔ کوری*[۴] نیز می‌گویند) اندکی منفی است و پس از آن در یک محدودهٔ دمایی تغییر چشمگیری می‌کند و به شدت مثبت می‌گردد. به این نوع PTCها، *نوع تعویضی*[۵] گفته می‌شود؛ چرا که ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ آنها پس از نقطهٔ کوری تغییر چشمگیری پیدا می‌کند و از یک مقدار کم منفی به مقدار مثبت بالایی تعویض می‌شود (شکل ب). به عبارتی، یک تغییر دمای چنددرجه‌ای به تغییر مقاومتی با چندین مرتبهٔ بزرگی می‌انجامد. این نوع PTC ها اغلب در یک گسترهٔ دمایی $60^\circ C$ تا $120^\circ C$ طراحی شده‌اند. از PTC ها برای تنظیم جریان و جلوگیری از افزایش آن در مدارهای الکتریکی استفاده می شود.



الف) مقاومت برحسب اهم در یک گسترهٔ دمایی برای یک نمونه ترمیستور NTC



ب) نمودار مقاومت دما برای نوع تعویضی PTCها (نمودار به مقیاس نیست)

۱ــ NTC برگرفته از *Negative Temperature Coefficient* به معنای ضریب دمایی منفی

۲ــ PTC برگرفته از *Positive Temperature Coefficient* به معنای ضریب دمایی مثبت

۳ــ Silistor برگرفته از *Silicon Thermistor*

۴ ــ Curie point

۵ ــ Switching

چه در مورد ترمیستور و چه در مورد LDR با توجه به اینکه مقاومت با دما یا تابش نور تغییر می‌کند، توجه داده شود که یکی از کاربردهای مهم این دو مقاومت خاص در تقسیم ولتاژ است. در این مورد می‌توانید مثال ۲ــ۱۶ را که در آن یک LDR این وظیفه را انجام داده است، بدون تفصیل فرمولی مطرح کنید. مقاومت خاص دیگری از این دست، سنجه‌های کرنشی (strain gauges) هستند که می‌توانید از دانش‌آموزان بخواهید در مورد آنها نیز تحقیق کنند.

فیلم

در این فیلم‌ها چگونگی کار نوعی LDR در مدار را می‌بینید.

پاسخ پرسش ۲ــ۱

با بستن کلید، جریان در جهت نیروی محرکهٔ الکتریکی (درون باتری، از قطب منفی به سمت قطب مثبت) به جریان می‌افتد که در شکل سمت چپ، دیود امکان عبور را نمی‌دهد. در واقع، دیود شبیه یک شیر یک‌طرفه یا خیابانی یک‌طرفه در برابر عبور جریان عمل می‌کند و در برابر عبور جریان از طرف مخالف، مقاومت بسیار زیادی نشان می‌دهد و مانع از عبور جریان می‌شود. بنابراین، با بستن کلید در شکل سمت راست، LED روشن می‌شود.

دانستنی برای معلم

فاجعهٔ هیندنبرگ

یکی از افتخارات کشور آلمان و یکی از عجایب آن زمان، کشتی هوایی *هیندنبرگ*[۱] بود که طولی تقریباً سه برابر یک زمین فوتبال داشت ــ این بزرگ‌ترین ماشین پروازی بود که تا آن زمان ساخته شده بود. هرچند این کشتی توسط ۱۶ مخزن هیدروژن که به طرز خطرناکی قابل اشتعال بود در هوا نگه داشته می‌شد، با این حال بدون هیچ‌گونه حادثه‌ای، سفرهای زیادی بر فراز اقیانوس اطلس انجام داده بود. در واقع، برای کشتی‌های هوایی آلمان که پرواز همگی آنها متکی بر هیدروژن بود، هیچ حادثه‌ای که ناشی از وجود هیدروژن باشد، رخ نداده بود. ولی، در ۶ مه ۱۹۳۷، وقتی *هیندنبرگ* برای فرود بر پایگاه نیروی دریایی آمریکا واقع در *لاکهارست*[۲] نیوجرسی آماده می‌شد، آتش گرفت.

خدمهٔ کشتی که منتظر مانده بودند تا باد و باران تقریباً منطقه را ترک کند، طناب‌هایی را برای خدمهٔ پایگاه زمینی انداختند. در همین زمان بود که موج‌هایی در اطراف کشتی به فاصلهٔ حدود یک سوم از عقب آن مشاهده شد. چند ثانیه بعد، آتش در آن ناحیه زبانه کشید و نور قرمز رنگی، درون کشتی را روشن ساخت. پس از حدود ۳۰ ثانیه این کشتیِ سوزان سقوط کرد، ۳۶ نفر را کشت و موجب سوختگی خیلی‌های دیگر شد. در اینجا می‌خواهیم بررسی کنیم چرا پس از آن همه پروازهای مطمئنی که کشتی‌های هوایی انجام داده بودند، این کشتی هوایی آتش گرفت.

وقتی *هیندنبرگ* آمادهٔ فرود بود، و پس از انداخته شدن طناب‌ها به سوی خدمهٔ روی زمین، طناب‌ها در باران خیس شدند (و در نتیجه توانستند جریان الکتریکی را رسانش دهند). طناب‌ها اسکلت فلز کشتی را که به آن متصل بودند به زمین *اتصال دادند*؛ یعنی، آنها مسیری رسانا را بین اسکلت فلزی کشتی و زمین تشکیل دادند، که این موجب هم‌پتانسیل شدن پتانسیل الکتریکی اسکلت با پتانسیل الکتریکی زمین شد. بدنهٔ بیرونی کشتی نیز بایستی متصل به زمین می‌شد، امّا *هیندنبرگ* نخستین کشتی هوایی بود که بدنهٔ آن با چندین لایهٔ مختلف که دارای مقاومت الکتریکی بالایی بودند، بتونه شده بود (و در نتیجه جریان را به میزان ناچیزی رسانش می‌داد). بنابراین، پتانسیل الکتریکی بدنه در همان پتانسیل الکتریکی جو، در ارتفاع حدوداً ۴۳ متری کشتی هوایی، باقی ماند. به دلیل وجود باران، این پتانسیل نسبت به پتانسیل زمین، بزرگ بود.

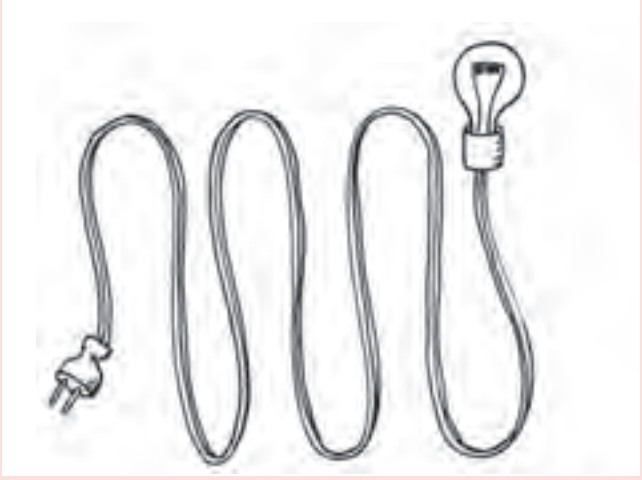
۱ــ Hindenburg

۲ــ Lakehurst

چنین وضعیتی خطرناک بود : بدنهٔ کشتی در پتانسیل کاملاً متفاوتی با اسکلت فلزی کشتی قرار داشت. ظاهراً بار الکتریکی بر روی سطح خیس بیرونی بدنه جاری شد، و سپس رو به داخل، به سمت اسکلت فلزی کشتی جرقه زد. دو استدلال مهم دربارهٔ اینکه چگونه این تخلیهٔ جرقه‌ای موجب آتش‌سوزی شد، وجود دارد. یک استدلال این است که جرقه باعث احتراق لایه‌های بتونه شد. استدلال دیگر آن است که یکی از مخازن هیدروژن از هم گسیخت، و باعث آزاد شدن هیدروژن بین آن مخزن و بدنهٔ خارجی کشتی شد. (موج‌های مشاهده شده در اطراف بدنه، این استدلال را تقویت می‌کند.) سپس بر اثر تخلیهٔ جرقه‌ای، این هیدروژن آتش گرفت. در هر دو استدلال، اشتعال به سرعت مخازن هیدروژن را به آتش کشید و کشتی را پایین کشاند. اگر بتونهٔ بدنهٔ خارجی *هیندنبرگ* رسانایی بیشتر می‌داشت (مانند کشتی‌های هوایی قبل و بعد از آن) احتمالاً فاجعهٔ *هیندنبرگ* رخ نمی‌داد.

پرسش‌های پیشنهادی

۱ مقاومت سیم پهن (cord) که به لامپ متصل است بیشتر است یا مقاومت خود لامپ؟



پاسخ : خود لامپ. در غیر این صورت، سیم داغ‌تر از لامپ می‌شد.

۲ دو سیم از جنس مس خالص، مقاومت‌های متفاوتی دارند. دلیل آن چه می‌تواند باشد؟

الف) طول ب) سطح مقطع پ) مقاومت ویژه ت) همهٔ موارد

پاسخ : توجه کنید که در صورت پرسش به دمای یکسان اشاره نشده است. بنابراین اگر دما متفاوت باشد، مقاومت ویژه نیز می‌تواند تغییر کند. پس گزینهٔ درست **ت** است.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ یک سیم رابط به طول ۳۰/۰ m از دو سیم مسی نمرهٔ ۱۹ ساخته شده است که از آنها جریان‌های یکسانی در دو جهت مخالف می‌گذرد. الف) مقاومت دو سیم در دمای ۲۰°C چقدر است؟ (قطر سیم نمرهٔ ۱۹ برابر ۰/۹۱۲mm است. ب) اگر این سیم مسی با سیمی آلومینیومی با همان طول جایگزین شود، کوچک‌ترین قطر لازم چقدر باشد تا سیم جدید مقاومتی بیشتر از سیم قبلی نداشته باشد؟

پاسخ : الف) می‌دانیم $R=\rho\frac{L}{A}$ است، که در آن $A=\frac{۱}{۴}\pi d^۲=\frac{۱}{۴}\pi(۹/۱۲\times۱۰^{-۴}\,\mathrm{m})^۲=۶/۵۳۳\times۱۰^{-۷}\,\mathrm{m}^۲$

از طرفی $\rho_{Cu}=۱/۶۷\times۱۰^{-۸}\,\Omega\,.\,\mathrm{m}$ است و بنابراین $R=۰/۷۶۷\,\Omega$ می‌شود.

ب) می‌خواهیم مقاومت سیم آلومینیومی کمتر یا مساوی مقاومت سیم مسی باشد $(R_{AL}\le R_{Cu})$:

$$\frac{\rho_{AL}L}{\frac{۱}{۴}\pi d^۲_{AL}}\le\frac{\rho_{Cu}L}{\frac{۱}{۴}\pi d^۲_{Cu}}$$

$$\Rightarrow d_{AL}\ge d_{Cu}\sqrt{\frac{\rho_{AL}}{\rho_{Cu}}}$$

$$=(۰/۲۱۲\,\mathrm{mm})\sqrt{\frac{۲/۶۸\times۱۰^{-۸}\ \Omega.\mathrm{m}}{۱/۶۷\times۱۰^{-۸}\ \Omega.\mathrm{m}}}=۱/۱۵\,\mathrm{mm}$$

۲ فرض کنید می‌خواهید دستگاه پخش صوت خود را به دو بلندگوی آن متصل کنید. الف) اگر طول سیم ۲۰ m باشد، قطر هر سیم مسی باید چقدر باشد تا مقاومت در هر متر ۰/۱۰ Ω گردد؟

ب) اگر جریان هر بلندگو ۴/۰A باشد، افت پتانسیل در هر سیم چقدر می‌شود؟

پاسخ : الف) با توجه به اینکه $R=\rho L/A$ است داریم :

$$A=\rho\frac{L}{R}=(۱/۶۷\times۱۰^{-۸}\ \Omega.\mathrm{m})(۲۰\,\mathrm{m})/(۰/۱۰\Omega)=۳/۴\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{m}^۲$$

مساحت مقطع دایره‌ای $A=\pi r^۲$ است. بنابراین

$$r=\sqrt{\frac{A}{\pi}}=۱/۰۴\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{m}=۱/۰۴\,\mathrm{mm}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ $V=RI$ داریم :

$$V=(۰/۱۰\ \Omega)\ (۴/۰\mathrm{A})=۰/۴۰\ \mathrm{V}$$

۳ در دمای ۲۰°C سیمی به قطر ۴/۰۰ mm و طول ۱۰/۰ m مقاومت ویژه‌ای برابر $۱/۷۰\times۱۰^{-۸}\,\Omega\,.\,\mathrm{m}$ دارد. ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ مس در این آزمایش $۳/۹\times۱۰^{-۳}\,\mathrm{K}^{-۱}$ است. بر اثر عبور جریان ۱/۰۰ A، میدانی به بزرگی $۱/۳۵\times۱۰^{-۲}\,\mathrm{V/m}$ ایجاد می‌شود. الف) اختلاف پتانسیل دو سر سیم چقدر است؟ ب) مقاومت سیم چقدر است؟ پ) وقتی این سیم در دماسنجی

برای اندازه‌گیری نقطهٔ ذوب فلز ایندیوم استفاده شود، مقاومت محاسبه شده در قسمت (ت) به ۰/۰۲۰۷ Ω افزایش می‌یابد. نقطهٔ ذوب ایندیوم چقدر است؟

پاسخ :

الف) $|\Delta V| = EL = (۱/۳۵۳ \times ۱۰^{-۳}\ \mathrm{V/m})(۱۰\ \mathrm{m}) = ۱/۳۵۲ \times ۱۰^{۲}\mathrm{V} \approx ۱/۳۵ \times ۱۰^{۲}\ \mathrm{V}$

ب) $R = \rho L / A = (۱/۷۷ \times ۱۰^{-۸}\ \Omega.\mathrm{m})\dfrac{۱۰\ \mathrm{m}}{\pi(۲/۰۰ \times ۱۰^{-۳}\ \mathrm{m})^{۲}} = ۰/۰۱۳۵\Omega$

پ) $\Delta R = \alpha R_{۰} \Delta T$

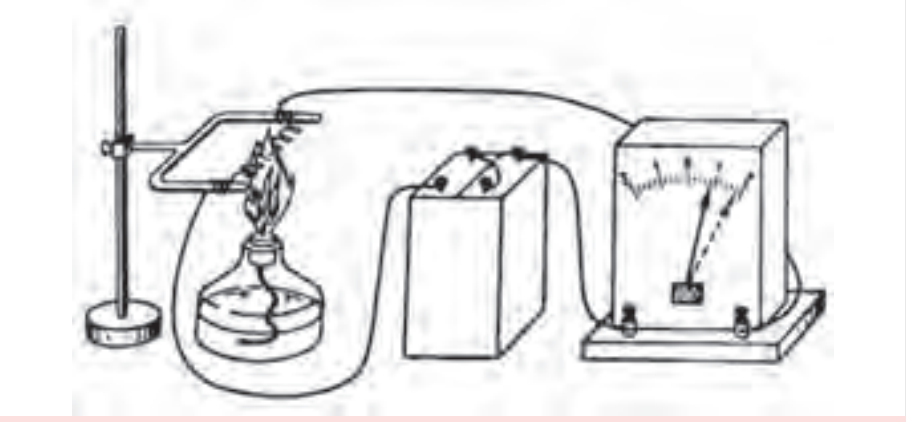
$$\Rightarrow \Delta T = \frac{R - R_{۰}}{\alpha R_{۰}} = \frac{۰/۰۲۰۷\Omega - ۰/۰۱۳۵\Omega}{(۳/۹ \times ۱۰ - ۳\ ^{\circ}\mathrm{C})(۰/۰۱۳۵\Omega)} = ۱۳۶/۸^{\circ}\mathrm{C} \approx ۱۳۷^{\circ}\mathrm{C}$$

چون $T_{۰} = ۲۰^{\circ}\mathrm{C}$ است، نقطهٔ ذوب ایندیوم چنین می‌شود :

$$T = T_{۰} + \Delta T = ۲۰^{\circ}\mathrm{C} + ۱۳۶/۸^{\circ}\mathrm{C} = ۱۵۶/۸^{\circ}\mathrm{C} \approx ۱۵۷^{\circ}\mathrm{C}$$

فعالیت پیشنهادی

مداری شامل یک مقاومت فلزی (که می‌تواند سیم آهنی نازکی به قطر ۰/۱ mm تا ۰/۲ mm به شکل حلقوی باشد)، یک منبع تغذیه و یک آمپرسنج را به‌ترتیب طرح شکل زیر می‌بندیم. بهتر است مقاومت را طوری انتخاب کنیم که عقربهٔ آمپرسنج در دمای اتاق تقریباً تا آخرین درجه منحرف شود. آن درجه را یادداشت می‌کنیم و سپس به کمک شعله‌ای، حلقه را گرم می‌کنیم. دیده می‌شود که با گرم شدن مقاومت، جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد کاهش می‌یابد و این حاکی از افزایش مقاومت فلز با دما است.



پاسخ پرسش ۲ــ۱

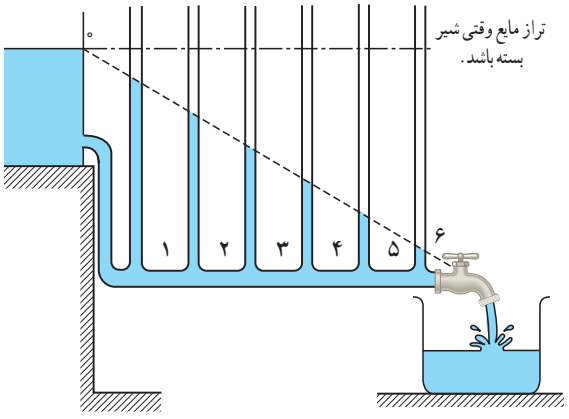
با بستن کلید، جریان در جهت نیروی محرکهٔ الکتریکی (درون باتری، از قطب منفی به سمت قطب مثبت) به جریان می‌افتد که در شکل سمت چپ، دیود امکان عبور را نمی‌دهد. در واقع، دیود شبیه یک شیر یک‌طرفه یا خیابانی یک‌طرفه در برابر عبور جریان عمل می‌کند و در برابر عبور جریان از طرف مخالف، مقاومت بسیار زیادی نشان می‌دهد و مانع از عبور جریان می‌شود. بنابراین، با بستن کلید در شکل سمت راست، LED روشن می‌شود.

فیلم

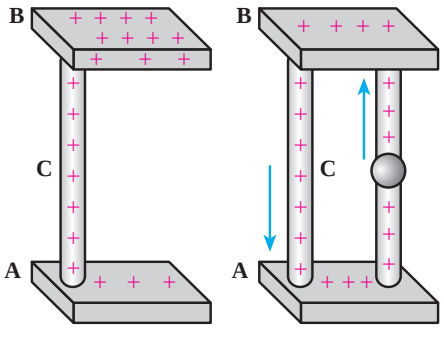
در این فیلم با بیانی ساده با مقاومت‌ها و انواع آن آشنا می‌شوید.

۲ــ۴ ــ نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

این مشابه‌سازی اصلاً بی‌راه نیست و اختلاف پتانسیل موجود بین هر دو نقطه از یک رسانای حامل جریان کاملاً مشابه افت فشار در مایعی است که در لولهٔ دارای اصطکاکی جریان دارد. این تشابه را می‌توان به کمک وسیله‌ای که در شکل زیر نشان داده شده است، توضیح داد. اگر شیر واقع در انتهای سمت راست بسته شود، جریانی وجود نخواهد داشت و ارتفاع مایع در تمام لوله‌ها یکسان خواهد بود. ولی وقتی شیر باز شود، با جاری شدن مایع، سطوح مایع در ستون‌های مختلف در امتداد خطّ مورب قرار می‌گیرند که نشانهٔ اُفت فشار در امتداد لوله است.



دراینجا خوب است با مثال‌هایی ذهن دانش‌آموزان را برای شروع بحث آماده کنید. مثلاً بپرسید در شکل‌های زیر، دو صفحهٔ رسانای A و B دارای بار مثبت‌اند. اگر آنها را به دو روش نشان داده شده به یکدیگر وصل کنیم چه اتفاقی می‌افتد؟



خوب است به تفاوت باتری با خازن اشاره کنید. دیدیم که در خازن، انرژی الکتریکی در میدان الکتریکی ذخیره می‌شود، در حالی که انرژی پتانسیل الکتریکی باتری به شکل انرژی شیمیایی ذخیره است. همچنین توجه کنید که در باتری برخلاف خازن، باری ذخیره نمی‌شود و باتری با ایجاد اختلاف پتانسیل موجب حرکت بار الکتریکی در مدار می‌گردد.

پاسخ فعالیت ۲ــ۴

مقاومت داخلی باتری موجب این تفاوت می‌شود. وقتی از باتری یا هر منبع نیروی محرکه‌ای جریان می‌گیریم، جریان از خود منبع نیز که دارای مقاومت داخلی است می‌گذرد و این موجب کاهش انرژی الکتریکی و افت پتانسیل دوسر منبع می‌شود.

مقاومت داخلی باتری‌ها به مرور زمان افزایش می‌یابد. با آزمایشی مانند فعالیت ۲ــ۴ می‌توان مقاومت داخلی یک باتری را به‌دست آورد. نخست باید کلید قطع باشد و ولتاژ دو سر باتری که ولتاژ بیشینهٔ آن ($\mathscr{E}$) است اندازه‌گیری شود. سپس، با وصل کردن کلید، دوباره باید ولتاژ دوسر باتری را که مثلاً V می‌شود اندازه‌گیری کرد، که کمتر از $\mathscr{E}$ است. همان‌طور که گفتیم این به مقاومت داخلی باتری مربوط می‌شود. با توجه به اینکه دانش‌آموزان در ادامهٔ درس با مقاومت داخلی و قاعدهٔ حلقه آشنا می‌شوند، می‌توان با قرار دادن آمپرسنج به‌طور متوالی، جریان الکتریکی I و از آنجا مقاومت داخلی r را محاسبه کرد که به این موضوع در فعالیت ۲ــ۶ پرداخته‌ایم.

پاسخ فعالیت ۲ــ۵

در فصل پیش دیدیم که پتانسیل با جابه‌جایی در جهت میدان الکتریکی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، اگر از پایانهٔ منفی باتری به‌سمت پایانهٔ مثبت آن حرکت کنیم، خلاف جهت میدان الکتریکی حرکت کرده‌ایم و پتانسیل الکتریکی افزایش می‌یابد و بالعکس وقتی از پایانهٔ مثبت باتری به سمت پایانهٔ منفی آن حرکت کنیم، در جهت میدان الکتریکی حرکت کرده‌ایم و پتانسیل کاهش می‌یابد.

به تحلیل دقیق رفتار این ماهی مبتنی بر مدارهای الکتریکی در دانستنی مربوط به آن رجوع کنید.

فیلم

در این فیلم چگونگی ایجاد شوک توسط یک مارماهی الکتریکی را می‌بینید.

در اینجا اشاره و تأکید شود که این جریان الکتریکی (شارش الکترون‌ها) است که سبب آسیب یا مرگ یک شخص می‌شود، نه پتانسیل الکتریکی. مثلاً اگر شخصی با یک دست سیم برق حامل جریان خانگی و با دست دیگر رابطی را بگیرد که به طور الکتریکی به زمین متصل است، اختلاف پتانسیل بین دو دست او ۲۲۰V می‌شود که می‌تواند جریان را بین دو دست او ایجاد کند، ولی آسیبی که به او می‌رسد ناشی از جریانی است که از شخص عبور می‌کند که این به مقاومت الکتریکی بدن بستگی دارد. بنابراین برای برقکاری که تصادفاً ۲۲۰V را بین دستان خود می‌گیرد، مقاومت بالای پوست خشک او می‌تواند جریان را پایین‌تر از مقدار کشنده نگه دارد.

در این مبحث خوب است با یادآوری وضعیت حرکت بارها در رسانا هنگام اعمال میدان الکتریکی، تدریس را آغاز کنید.

پاسخ تمرین ۲ــ۳

الف) اگر مدار را در خلاف جهت جریان نشان داده شده بپیماییم، با استفاده از قاعدهٔ حلقه داریم :

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

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

ب) اگر از نقطهٔ b در خلاف جهت جریان I به سمت نقطهٔ a حرکت کنیم، خواهیم داشت :

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

و در نتیجه

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

$$= 12\text{V} - (2/0\text{A})(2/0\Omega) = 8\text{V}$$

بنابراین می‌بینید چه مدار را در جهت جریان بپیماییم و چه در خلاف جهت جریان، به پاسخ یکسانی برای جریان مدار و یا اختلاف پتانسیل دو سر باتری می‌رسیم.

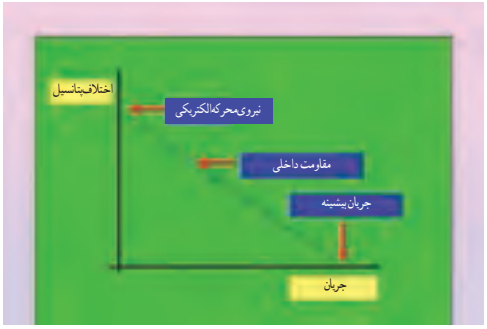
پاسخ فعالیت ۲ــ۶

این فعالیت در امتداد فعالیت ۲ــ۴ است که این بار باید مقاومت داخلی دو باتری را پس از اندازه‌گیری باهم مقایسه کنیم، که یکی نو و دیگری فرسوده است. درهرحال با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۷ می‌توان مقاومت داخلی r را به‌صورت زیر نوشت :

$$r = \frac{\mathscr{E} - V}{I}$$

که V و I به‌ترتیب اختلاف پتانسیل دوسر باتری و جریان آن، پس از بستن کلید و $\mathscr{E}$ اختلاف پتانسیل دوسر باتری پیش از بستن کلید است. مثلاً در یک مقدار نوعی ممکن است $\mathscr{E}$=۱/۲۷V و V=۱/۱۳V به دست آید که تفاوت آنها ۰/۱۴V است. حال اگر آمپرسنج مثلاً ۰/۰۶A را نشان می‌دهد، مقاومت داخلی باتری ۲/۳ Ω خواهد شد. یک محاسبه ریاضی با حذف I در رابطهٔ بالا، به رابطهٔ $r = (\frac{\mathscr{E}}{V} - 1)R$ می‌انجامد. در یک باتری فرسوده، به ازای مقاومت خارجی R یکسان، V از مقدار به‌دست آمده برای همان باتری نو خیلی کوچک‌تر است، در حالی که $\mathscr{E}$ کاهش چندانی پیدا نمی‌کند. بنابراین، کاهش V ، به بزرگ شدن r می‌انجامد. همچنین خوب است نمودار

برحسب جریان عبوری I را نیز رسم کنیم که این در مسئلهٔ ۲۰ پایان فصل مطرح شده است. از آنجا درخواهیم یافت، مقاومت داخلی باتری برابر است با نسبت نیروی محرکهٔ الکتریکی به جریان پیشینه. در هر نقطه‌ای از این نمودار، با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان می‌توان مقاومت داخلی را از این نسبت به‌دست آورد. همچنین در این مسئله می‌توانستیم با درنظر گرفتن حلقه‌ای که شامل مقاومت R باشد، به‌رابطهٔ مفید دیگری نیز برای محاسبهٔ مقاومت داخلی r برسیم :



$$\mathscr{E} - Ir - IR = 0 \Rightarrow \mathscr{E} = I(r + R)$$

و از آنجا نیز می‌توان با دانستن R، مقاومت داخلی r را محاسبه کرد.

در این فیلم چگونگی آزمایش فعالیت ۲ــ۶ را می‌بینید.

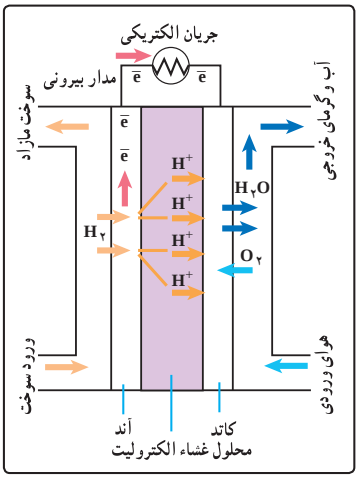
فیلم

دانستنی برای معلم

پیل‌های سوختی

می‌دانیم باتری وسیله‌ای برای ذخیره‌سازی انرژی است. انرژی شیمیایی ذخیره شده پس از تبدیل به انرژی الکتریکی تمام می‌شود. در این صورت باید (اگر باتری یک‌بار مصرف باشد) آن را دور انداخت یا با جریان الکتریسیته شارژ کرد.

ولی پیل سوختی، مادامی که سوخت آن تأمین شود، انرژی شیمیایی سوخت را به‌صورت پیوسته و نامحدود به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و نیاز به شارژ مجدد ندارد. در نوعی از آن، سوخت هیدروژن در واکنش شیمیایی با اکسیژن هوا، الکترون و یون (به همراه آب) تولید می‌کند. یون‌ها به‌صورت داخلی در یک طرف پیل روان می‌شوند و الکترون‌ها در مدار خارجی متصل به آن در جهت دیگر روانه می‌شوند (شکل روبه‌رو). چون این واکنش انرژی شیمیایی را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کند، کارآمدتر از سوزاندن سوخت برای تولید گرماست، که سپس بخار لازم برای چرخاندن توربین‌های تولید الکتریسیته را تأمین می‌کنند، ضمن آنکه آلاینده‌های شیمیایی و آلودگی‌های زیست‌محیطی را نیز ندارد. تنها «محصول زاید» این پیل سوختی آب خالصِ مناسب آشامیدن است!



در این پیل سوختی اتم‌های هیدروژن به یون‌های هیدروژن و الکترون شکسته می‌شوند. یون‌های هیدروژن به غشاء نفوذ کرده و به سمت کاتد می‌روند اما الکترون‌ها نمی‌توانند از غشاء عبور کنند و مجبور به طی مدار خارجی می‌شوند که همین باعث تولید جریان الکتریکی می‌شود.

در این فیلم چگونگی ساخت یک پیل سوختی ساده را می‌بینید.

فیلم

شاتل‌های فضایی از پیل‌های سوختی هیدروژنی برای انرژی الکتریکی مورد نیاز خود استفاده می‌کنند (هم هیدروژن و هم اکسیژن را در محفظه‌های تحت فشار به شاتل می‌برند.) این پیل‌ها بیش از ۱۰۰ گالن آب آشامیدنی را برای مأموریت عادی یک هفته‌ای فضانوردان تأمین می‌کنند. پژوهشگران روی زمین، پیل‌های سوختی را برای اتوبوس‌ها و اتومبیل‌ها توسعه داده‌اند. اتوبوس‌های آزمایشی با پیل سوختی هم‌اکنون در شهرهایی مانند ونکوور در بریتیش کلمبیا، و شیکاگو در ایلینویز، کار می‌کنند. در آینده، شاید ساختمان‌های تجاری و نیز خانه‌ها مجهز به سلول‌های سوختی به‌جای دریافت الکتریسیته از نیروگاه‌های برق محلی شوند.

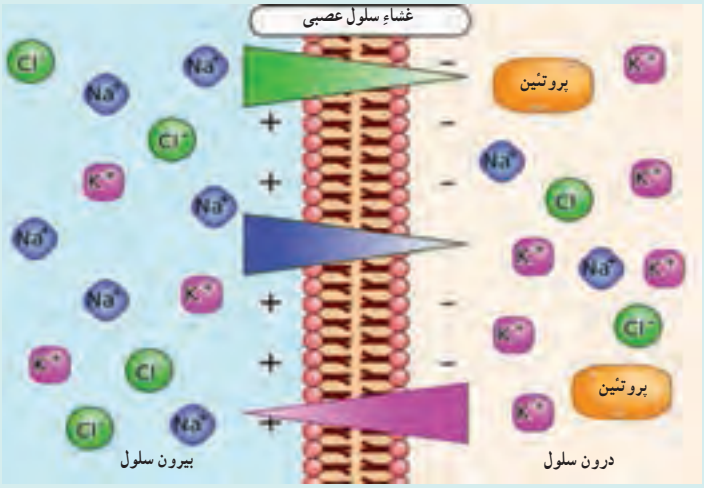
پس چرا پیل‌های سوختی اکنون چندان متداول نیستند؟ در حال حاضر، این پیل‌ها گران‌تر از سایر وسیله‌های تولید انرژی، مانند موتورهای بنزینی یا دیزلی‌اند ــ در واقع، به ازای واحد انرژی تولید شده تقریباً ۱۰۰ برابر گران‌تر هستند. همچنین در اینجا مسئلهٔ در دسترس بودن سوخت مورد نیاز ــ هیدروژن ــ هم هست. گرچه هیدروژن فراوان‌ترین عنصر موجود در عالم و در محیط اطراف ما نیز فراوان است، اما در مولکول‌های آب و هیدروکربن‌ها محبوس است. هیدروژن به‌صورت آزاد وجود ندارد. برای جدا کردن آن از مولکول‌هایی که با آنها پیوندی محکم دارد انرژی لازم است. اکنون انرژی لازم برای تولید هیدروژن را منابع انرژی معمولی تأمین می‌کنند.

در واقع، هیدروژن عملاً محیط ذخیره‌سازی انرژی است. هیدروژن هم مانند الکتریسیته، در جایی تولید می‌شود و در جای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیل‌های سوختی در آینده وقتی جذاب خواهند شد که هیدروژن لازم برای سوخت آنها را منابع دیگر انرژی، مانند قدرت باد، تولید کند.

دانستنی برای معلم

مدل‌سازی سلول عصبی با مدارهای الکتریکی

معمولاً مدرسان فیزیک از نبود مثال‌های ملموسی از کاربردهای مطالب درسی فیزیک رنج می‌برند و دانش‌آموزان نیز عملاً می‌پندارند که مطالب فیزیک صرفاً به درد کتاب‌های درسی می‌خورند. علم بین رشته‌ای علوم اعصاب دارای مثال‌های خوبی از کاربردهای فیزیک در علم زیست‌شناسی است که می‌توانند در کلاس‌های درس مطرح شوند. در اینجا ضمن مروری سریع بر یکی از آن مباحث، نشان می‌دهیم که چگونه می‌توان با استفاده از مبحث سادهٔ مدارهای الکتریکی به تشریح یکی از رفتارهای سلول عصبی پرداخت.



شکل ۱

جدول ۱ــ غلظت‌های یونی در داخل و خارج سلول عصبی*

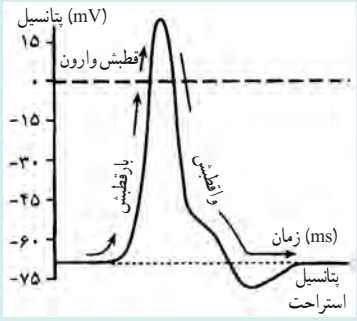
نوع یون	غلظت داخل سلول (mM)	غلظت خارج سلول (mM)
K^+	۴۰۰	۲۰
Na^+	۵۰	۴۴۰
Cl^-	۵۲	۵۶۰

* در اینجا غلظت آنیون‌های آلی (که با A^- نمایش داده می‌شوند) را نادیده گرفته‌ایم، زیرا فقط در داخل سلول هستند و نقشی ندارند.

مروری اجمالی بر فیزیولوژی غشاء تحریک‌پذیر یک سلول عصبی

در داخل یک سلول عصبی (شکل ۱) غلظت K^+ بسیار زیاد و غلظت Na^+ و Cl^- بسیار کم است و این امر در بیرون سلول برعکس می‌شود (جدول ۱). غشاء این سلول نسبت به یون‌های K^+ و Cl^- تراواست ولی در نبود یک محرّک عصبی نسبت به Na^+ صدبار کمتر تراواست و بنابراین این تنها K^+ و Cl^- هستند که در نبود یک محرّک عصبی، از طریق غشاء سلول پخش می‌شوند و میزان نفوذ Na^+ بسیار کم است. بدیهی است که یون‌های K^+ و Cl^- در خلاف جهت هم و به طرف ناحیه‌های با غلظت‌های پایین پخش می‌شوند، یعنی K^+ به طرف خارج و Cl^- به طرف داخل سلول عصبی.

ولی این روند حرکتی بالاخره در جایی متوقف می‌شود. زیرا پس از مدتی بر روی غشاء بار مثبت فراوان و در داخل آن بار منفی فراوان جای می‌گیرد و بدین ترتیب میدان الکتریکی بزرگی از بیرون سلول به طرف داخل آن برقرار می‌شود. می‌دانیم که ذرهٔ باردار مثبت در جهت میدان و ذرهٔ باردار منفی در خلاف جهت میدان شتاب می‌گیرند. بنابراین این میدان الکتریکی که خود زاییدهٔ حرکت بارهای K^+ و Cl^- است پس از مدتی از ادامهٔ این روند جلوگیری می‌کند و در اینجاست که *وضعیت استراحت* رخ می‌دهد؛ به پتانسیل دو سر غشاء در این حالت، *پتانسیل استراحت* (RP)[۱] می‌گویند. حال اگر محرّکی، سلول عصبی را تحریک کند Na^+ نقش مهمی را بازی خواهد کرد. در این وضعیت تراوایی غشاء نسبت به Na^+ که در حالت عادی ۱۰۰ برابر کمتر از دوتای دیگر بود افزایش می‌یابد و هزار بار تراواتر می‌شود و بدین ترتیب پتانسیل داخل سلول از حدود ۶۵− تا ۷۰− میلی‌ولت به حدود ۱۵+ تا ۳۰+ میلی‌ولت افزایش می‌یابد (*مرحلهٔ بازقطبش*[۲]). البته در این مرحله، غشاء نسبت به K^+ نیز تراوا می‌شود ولی این تراوایی نسبت به تراوایی به Na^+ ناچیز است. ولی تراوایی برای Na^+ بسیار زود فرو می‌افتد و با ادامهٔ تراوایی نسبت به K^+، پتانسیل غشاء به طرف پتانسیل استراحت خود حرکت می‌کند. البته این پتانسیل در وهلهٔ نخست حتی منفی‌تر از پیش می‌شود (*اَبَرقطبش*[۳]) و سپس با سازوکاری که در اینجا به آن پرداخته نشده است (سازوکار ATP[۴]) به پتانسیل استراحت بازخواهد گشت (مرحلهٔ *واقطبش*[۵]) (شکل ۲)



شکل ۲

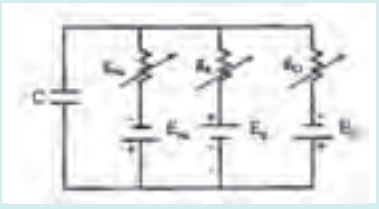
تعادل میان شیب غلظت و نیروی حاصل از میدان الکتریکی یک تعادل انرژی است. معادله‌ای که این تعادل را توصیف می‌کند به *معادلهٔ نرنست*[۶] معروف است. معادلهٔ نرنست، ولتاژ حاصل از تفاوت غلظت‌ها را درصورتی که غشاء فقط به یک یون تراوا باشد به‌دست می‌دهد.

$$E_x \cong \frac{۵۸\text{mV}}{Z}\log\frac{[x_o]}{[x_i]}$$

که در آن Z ظرفیت یونی، $[x_o]$ غلظت در بیرون غشاء و $[x_i]$ غلظت در داخل غشای آن یون است.

۱ــ Resting Potential
۲ــ depolarization
۳ــ hyperpolarization
۴ــ Active Transport Pump
۵ــ Repolarization
۶ــ Nernst

اگر به مبحث قبل به خوبی توجه کرده باشید درمی‌یابید که می‌توان معادل‌سازی‌های زیر را انجام داد. کانال‌های یونی را می‌توان با رساناها یا مقاومت‌هایی جایگزین کرد؛ گرادیان غلظت‌های یونی که عملاً باعث انتقال یون‌ها در دو سوی غشاء می‌شوند، را می‌توان معادل باتری گرفت، و سرانجام دو سر غشاء که روی دو طرف آنها بارهای منفی و مثبت قرار گرفته‌اند را می‌توان معادل یک خازن در نظر گرفت. پس عملاً یک سلول عصبی را می‌توان با مدار سادهٔ شکل ۱ جایگزین کرد.



شکل ۱

توجه کنید که در اینجا نیز مانند کتاب‌های علوم اعصاب از رسانندگی‌های ویژه (که عکس مقاومت هستند) به‌جای مقاومت در مدار استفاده شده است. مقدارهای این رسانندگی‌ها به ترتیب عبارت‌اند از $g_{Cl}=۲/۵\times۱۰^{-۶}\,S$ و $g_K=۱۰\times۱۰^{-۶}\,S$ و $g_{Na}=۰/۵\times۱۰^{-۶}\,S$ که S یکای رسانندگی ویژه موسوم به *زیمنس* است. همین‌طور Eها همان پتانسیل‌های نرنست هستند که با استفاده از معادلهٔ نرنست و جدول ۱ چنین می‌شوند : $E_{Cl}=-۶۹mV$ و $E_K=-۷۵mV$ و $E_{Na}=+۵۵mV$. حال، پایستگی بار (جریان الکتریکی) چنین حکم می‌کند :

$$C\frac{dV}{dt}=-\sum_i I_i$$

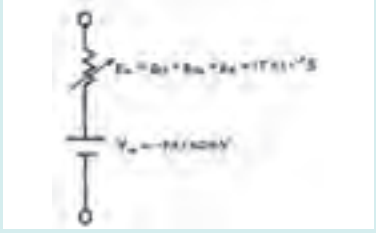
که در آن V پتانسیل دو سر غشاء و $\sum_i I_i$ مجموع جریان‌های یونی است. برای محاسبه پتانسیل استراحت، با توجه به اینکه «ثابت $=V$» است، از معادلهٔ بالا داریم :

$$۰=-\sum I_i=-g_{Na}(V-E_{Na})-g_K(V-E_K)-g_{Cl}(V-E_{Cl})$$

که در آن از قانون اهم استفاده کردیم. از آنجا برای پتانسیل استراحت خواهیم داشت :

$$V=\frac{g_{Na}E_{Na}+g_K E_K+g_{Cl}E_{Cl}}{g_{Na}+g_K+g_{Cl}}$$

که با گذاشتن مقدارهای عددی به $V=-۶۸/۸۵\,mV\approx-۶۹\,mV$ می‌انجامد. بنابراین می‌توان در وضعیت استراحت، یک سلول عصبی را با مدار سادهٔ شکل ۲ جایگزین کرد :



شکل ۲

توجه کنید که اگر بخواهیم تحریک سلول عصبی را در نظر بگیریم، دیگر dV/dt برابر صفر نخواهد بود و به‌علاوه برای محرّک عصبی باید جریان موسوم به $I_{app}(t)$ را به معادلهٔ پایستگی جریان (که حالا وابسته به زمان است) افزود :

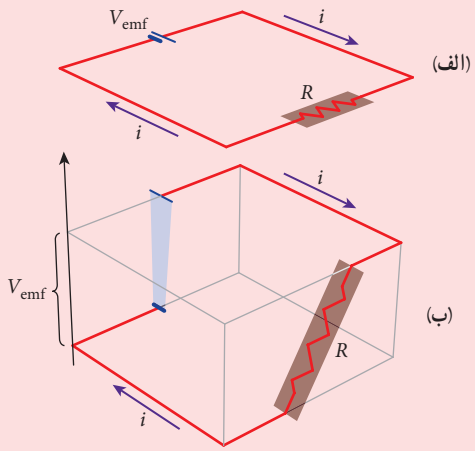
$$C\frac{dV}{dt}=-\sum_i I_i(t)+I_{app}(t)$$

بررسی و حل این معادله خارج از سطح این مقاله است. مدلی که بر مبنای این معادله و حل آن به بررسی رفتار سلول عصبی در حضور محرک عصبی می‌پردازد به مدل *هاچکین ــ هاکسلی*[۱] معروف است که مدلی بسیار مشهور در کتاب‌های علوم اعصاب است. مقالهٔ زیر به طور اجمالی به این مدل پرداخته است :

Electrical circuits as the Nerve cells, Phyics Education (India) (2016) by M.R. Khoshbin–e–Khoshnazar

پرسش‌های پیشنهادی

۱ در مورد مشابهت‌سازی مدار الکتریکی شکل (الف) با نمایش سه‌بُعدی همان مدار که پتانسیل‌ها را در هر نقطهٔ مدار نشان می‌دهد (شکل ب) توضیح دهید.

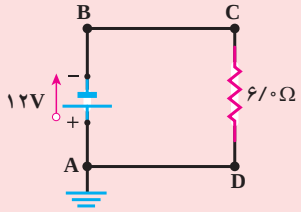


۲ اگر شما دندان پرشده‌ای از یک مادهٔ فلزی داشته باشید و اگر به هر دلیلی چیزی مانند یک زرورق آلومینیومی را بجوید، متوجه گزگزی در لثه‌های خود می‌شوید. دلیل آن چیست؟

پاسخ : وقتی زرورق آلومینیومی با فلز پرکنندهٔ دندان تماس پیدا می‌کند، در حالی که بزاق بین این دو سطح قرار دارد، از دست رفتن و به دست آوردن الکترونی، مانند آنچه درون باتری رخ می‌دهد، صورت می‌پذیرد. مجموعهٔ زرورق ــ بزاق ــ فلز مانند یک باتری عمل می‌کند و جریان را از طریق نقاط تماس مستقیم بزاق با زرورق و فلز راه می‌اندازد، که شما را با گزگزی در لثه‌های خود حس می‌کنید.

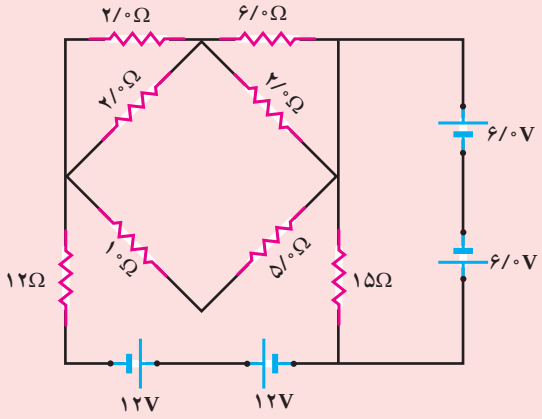
۱ــ Hodgkin ــ Huxley

۳ ولتاژ در نقطه‌های B، C و D شکل زیر چقدر است؟



پاسخ : ولتاژ B و C برابر ۱۲V− و D و A صفر است

۴ در شکل زیر، جریان عبوری از مقاومت‌های ۱۰ Ω و ۱۵ Ω چقدر است؟



پاسخ : توجه کنید که سوی نیروهای محرکهٔ الکتریکی در باتری‌های ۶/۰ V در خلاف جهت یکدیگر و سوی نیروهای محرکهٔ الکتریکی در باتری‌های ۱۲ V نیز در خلاف جهت یکدیگرند و بنابراین چهار منبع، هیچ نیروی محرکه‌ای ایجاد نمی‌کنند و جریان عبوری از مقاومت‌ها صفر است.

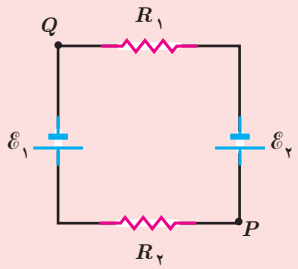
تمرین‌های پیشنهادی

۱ نیروی محرکهٔ الکتریکی یک باتری قلمی فرسوده تقریباً ثابت می‌ماند، ولی مقاومت داخلی آن افزایش می‌یابد. فرض کنید نیروی محرکهٔ الکتریکی یک باتری ۱/۵ V و مقاومت داخلی آن ناچیز است. وقتی تصمیم گرفته می‌شود که این باتری عوض شود، emf آن همچنان ۱/۵ V است، اما مقاومت داخلی آن به ۱۰۰۰ Ω افزایش یافته است. اگر این باتری فرسوده به کار برده شود، جریانی به اندازهٔ ۱/۰ mA در چراغ قوه برقرار می‌گردد. ولتاژ دو سر این باتری چقدر است؟

پاسخ :

$$V_{ab} = \mathscr{E} - Ir = ۱/۵\ \text{V} - (۱/۰ \times ۱۰^{-۳}\text{A})\ (۱۰۰۰\ \Omega) = ۰/۵\ \text{V}$$

۲ در شکل زیر، emf باتری‌های آرمانی عبارت‌اند از : $\mathscr{E}_۱ = ۱۵۰\text{V}$ و $\mathscr{E}_۲ = ۵۰\text{V}$ و مقاومت‌ها عبارت‌اند از $R_۱ = ۳/۰\Omega$ و $R_۲ = ۲/۰\Omega$. اگر پتانسیل در نقطهٔ P برابر ۱۰۰ V باشد، پتانسیل در نقطهٔ Q چقدر است؟



پاسخ : از مقایسهٔ emf نتیجه می‌گیریم که جریان در سوی پادساعتگرد است. حال از نقطهٔ P در جهت جریان به سوی نقطهٔ Q حرکت می‌کنیم :

$$V_P - \mathscr{E}_۲ - IR_۱ = V_Q$$

که در آن $\mathscr{E}_۲ = ۵۰\text{V}$ و $R_۱ = ۳/۰\Omega$ است. برای محاسبه V_Q به جریان I مدار نیاز داریم. به این منظور، مدار را به طور کامل دور می‌زنیم و از قاعدهٔ حلقه استفاده می‌کنیم :

$$-\mathscr{E}_۲ - IR_۱ + \mathscr{E}_۲ - IR_۲ = ۰$$

و از آنجا I چنین می‌شود :

$$I = \frac{\mathscr{E}_۱ - \mathscr{E}_۲}{R_۱ + R_۲} = \frac{۱۵۰\text{V} - ۵۰\text{V}}{۳/۰\ \Omega + ۲/۰\ \Omega} = ۲۰\text{A}$$

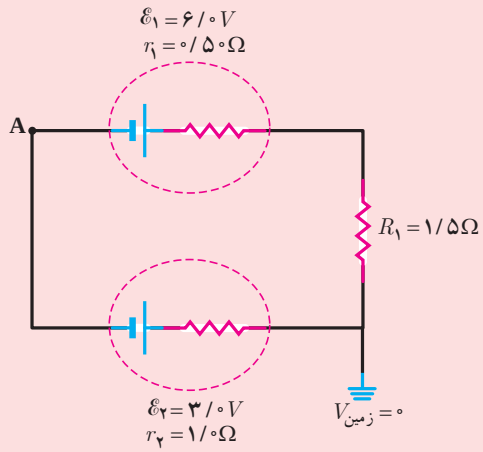
اکنون می‌توانیم V_Q را از رابطهٔ اول به‌دست آوریم :

$$V_Q = ۱۰۰\text{V} - ۵۰\text{V} - (۲۰\text{A})\ (۳/۰\Omega) = -۱۰\text{V}$$

می‌توانیم V_Q را از مسیر دیگری (خلاف جهت جریان) نیز محاسبه کنیم :

$$V_Q = V_P + IR_۲ - \mathscr{E}_۲ = ۱۰۰\text{V} + (۲۰\text{A})\ (۲/۰\Omega) - ۱۵۰\text{V} = -۱۰\text{V}$$

۳ در شکل زیر، پتانسیل نقطهٔ A را محاسبه کنید. (نماد ⏚ اتصال به زمین را نشان می‌دهدکه به آن پتانسیل $V_{\text{زمین}}=۰$ را اختصاص می‌دهند).



پاسخ : به این منظور، نخست جریان را در مدار به دست می‌آوریم. با حرکت پادساعتگرد از نقطهٔ A و بازگشتن به آن خواهیم داشت :

$$V_A+\mathscr{E}_۱-Ir_۱-IR_۱-Ir_۲-\mathscr{E}_۲=V_A$$

در نتیجه جریان I چنین می‌شود :

$$I=\frac{\mathscr{E}_۱-\mathscr{E}_۲}{r_۱+r_۲+R_۱}=\frac{۶/۰\text{V}-۳/۰\text{V}}{۰/۵۰\,\Omega+۱/۰\Omega+۱/۵\Omega}=۱/۰\text{A}$$

بنابراین، جهت جریان پادساعتگرد است. اکنون برای محاسبهٔ V_A ، معادلهٔ اختلاف پتانسیل‌ها را بین نقطه‌های A و E (زمین) می‌نویسیم :

$$V_A+\mathscr{E}_۱-Ir_۱-IR_۱=V_E=۰$$

در نتیجه :

$$V_A=I(r_۱+R_۱)-\mathscr{E}_۱=(۱/۰\text{A})\,(۰/۵۰\Omega)-۶/۰\text{ V}=-۴/۰\text{V}$$

خوب است از مسیر شاخهٔ پایین هم بررسی کنیم :

$$V_A+\mathscr{E}_۲+Ir_۲=V_E=۰$$

در نتیجه :

$$V_A=-\mathscr{E}_۲-Ir_۲=-۳/۰\text{V}-(۱/۰\text{A})\,(۱/۰\ \Omega)=-۴/۰\text{ V}$$

۲ــ۵ ــ توان در مدارهای الکتریکی

خوب است دوباره تأکید شود که گرچه رابطهٔ ۲ــ۸ هم برای توان تولیدی و هم توان مصرفی برقرار است، ولی رابطه‌های ۲ــ۹ و ۲ــ۱۰ فقط برای توان‌های مصرفی برقرارند. همچنین اگر علاوه بر گرما، کار مکانیکی نیز تولید شود (مثل چیزی که در موتور رخ می‌دهد) رابطهٔ ۲ــ۸ با رابطه‌های ۲ــ۹ و ۲ــ۱۰ برابر نیست، زیرا بخشی از توان صرف انجام کار مکانیکی می‌شود.

در مورد دو رابطهٔ توان مصرفی، خوب است با بیان این پرسش که آیا وسیله‌ای که مقاومت بیشتر دارد، توان مصرفی آن بیشتر است یا کمتر، کلاس را به چالش بکشید. چرا که در یک رابطه P متناسب با R و در رابطه‌ای دیگر متناسب با عکس R است. در اینجا باید توجه دانش‌آموزان را به شرایط مسئله و اینکه آیا جریان ثابت است یا اختلاف پتانسیل، جلب کنیم.

خوب است پیش از این مثال دانش‌آموزان را با طرح پرسش‌هایی با مفهوم فیزیکی چنین مسائلی آشنا کنید. مثلاً اینکه ادارهٔ برق با صدور قبض برق، بهای چه چیزی را از شهروندان مطالبه می‌کند.

همچنین خوب است در این مبحث به توان اسمی نیز اشاره شود که آن توانی است که دستگاه در ولتاژ اسمی (یعنی اختلاف پتانسیل مطلوب وسیله) دارد. اگر ولتاژ دو سر وسیله برابر ولتاژ اسمی آن نباشد، بدیهی است توان آن دستگاه نیز در توان اسمی (مطلوب) آن نخواهد بود. مثلاً اگر در منطقه‌ای اُفت ولتاژ داشته باشیم، بدیهی است که کارایی وسیله‌ها کمتر خواهد بود و مثلاً شدت نور یک لامپ، ضعیف‌تر از هنگامی می‌شود که با توان اسمی خود کار می‌کند.

پاسخ فعالیت ۲ــ۷

روشی که در پی می‌آید از کتاب بسیار معتبر زیر اخذ شده است :

Physics Laboratory Manual, 3th edition, David H. Loyd, Thomson Brooks (2006).

توضیح نظری

وقتی از مقاومتی به مقاومت R جریان I تحت ولتاژ V بگذرد، توان جذب شده در مقاومت از $P = I^2R = \frac{V^2}{R} = VI$ به‌دست می‌آید. از طرفی، توان، انرژی برواحد زمان است و بنابراین انرژی U برابر Pt می‌شود. از طرفی با گرماسنجی در فیزیک دهم آشنا شدیم. با گرم شدن مقاومت، دمای آن افزایش می‌یابد و این سبب انتقال گرمای Q از مقاومت به آب و ظرف گرماسنج می‌گردد. گرمای Q باعث افزایش دمای آنها به اندازهٔ ΔT می‌شود. می‌دانیم گرمای Q با تغییر دمای ΔT طبق رابطهٔ زیر به هم مربوط می‌شوند :

$$Q = (m_c c_w + m_c c_c)\,\Delta T = (m_w c_w + C_c)\,\Delta T$$

که در آن شاخص‌های پایین w و c به ترتیب مربوط به آب و ظرف گرماسنج هستند. c گرمای ویژه و C ظرفیت گرمایی است.

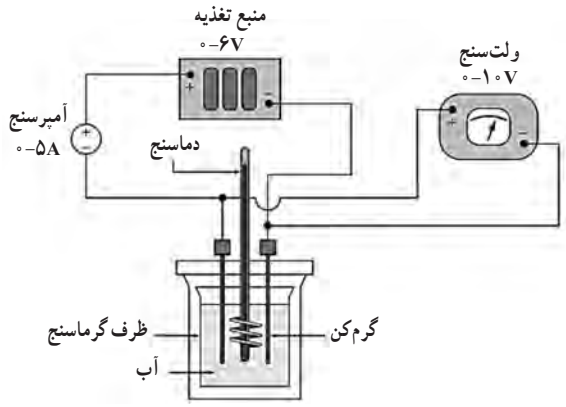
پس از آن که سیمِ گرمکنِ گرماسنج به حدّ کافی گرم شد و به دمای تقریباً ثابتی رسید، انرژی الکتریکی مصرفی در این مقاومت کاملاً به گرما تبدیل می‌شود و داریم :

$$VIt = (m_w c_w + C_c)\Delta T$$

اگر ولتاژ اعمال‌شده به مقاومت غوطه‌ور در آبِ درون گرماسنج در طی آزمایش ثابت باقی می‌ماند و در نتیجه جریان مقاومت نیز ثابت می‌ماند، در آن صورت نمودار VIt برحسب $(mc_w + C_c)\,\Delta T$، یک خط راست می‌شد و به ازای هریک از نقاط نمودار که حاصل اندازه‌گیری است، نسبت $\frac{VIt}{(m_w c_w + C_c)\Delta T}$ برابر یک می‌شد. اما هنگام انجام آزمایش درخواهید یافت که مقادیر V و I پیوسته کم و زیاد می‌شود و بنابراین باید با رویکردی ویژه این آزمایش را انجام داد، که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

روش آزمایش

یا ظرفیت گرمایی گرماسنج را می‌دانیم و یا آن را از حاصل‌ضرب جرم در گرمای ویژهٔ جنس آن محاسبه می‌کنیم. جرمی کافی و معلوم از آب را داخل گرماسنج می‌ریزیم. برای آنکه پاسخ بهتری از آزمایش بگیرید خوب است دمای آب چند درجه کمتر از دمای اتاق باشد. گرمکن را در داخل ظرف گرماسنج وارد می‌کنیم و مداری مانند شکل صفحه بعد می‌بندیم.



آن‌گاه منبع تغذیه را روشن می‌کنیم و جریان را بین ۴/۰ A تا ۵/۰ A تنظیم می‌کنیم. بلافاصله پس از اینکه به جریان موردنظر رسیدیم. منبع تغذیه را خاموش می‌کنیم و نمی‌گذاریم آب به میزان زیادی گرم می‌شود. اکنون آب را به‌هم می‌زنیم تا به تعادل گرمایی برسد. پس از چند دقیقه هم‌زدن، دمای اولیهٔ T_i را یادداشت می‌کنیم و سپس دوباره منبع تغذیه را درحالی که همان جریان خروجی قبلی را به‌دست می دهد، روشن می‌کنیم و هم‌زمان زمان‌سنج را به‌کار می‌اندازیم. مقادیر اولیهٔ جریان و ولتاژ ($V_۱$ و $I_۱$) را در جدول یادداشت می‌کنیم. دمای T، جریان I، ولتاژ V را هر ۶۰ ثانیه یک بار، برای مدت ۸ دقیقه اندازه می‌گیریم، درحالی که آب را همچنان به‌هم می‌زنیم. داده‌ها را در جدولی یادداشت می‌کنیم. $\Delta T = T - T_i$ (افزایش دما نسبت به دمای اولیهٔ T_i) را برای هر مقدار اندازه‌گیری شدهٔ T محاسبه و یادداشت می‌کنیم. همچنین به ازای هر مقدار اندازه‌گیری شدهٔ T، مقدار Q را از رابطهٔ $Q = (m_w c_w + C_c)(T - T_i)$ محاسبه می‌کنیم. برای هر بار، ولتاژ V و جریان I و حاصل‌ضرب VI را یادداشت می‌کنیم. سپس VI متوسط را از رابطهٔ زیر محاسبه می‌کنیم :

$$\overline{VI} = \frac{V_۱I_۱ + V_۲I_۲ + \cdots + V_۹I_۹}{۹}$$

برای هر مقدار اندازه‌گیری شدهٔ t، $\overline{VIt}$ را محاسبه و یادداشت می‌کنیم.

اکنون برای رسم نمودار $\overline{VIt}$ برحسب ΔT ($m_w c_w + C_c$) مقادیر به‌دست آمده از ($T + T_i$) ($m_w c_w + C_c$) را روی محور افقی و مقادیر به‌دست آمده برای $\overline{VIt}$ را روی محور عمودی نشانه‌گذاری می‌کنیم و از تلاقی امتداد آنها به نقاطی در صفحهٔ نمودار می‌رسیم. اینک خط راستی را رسم می‌کنیم که از مبدأ مختصات بگذرد و به بهترین شکل از بین این نقاط عبور کند (اصطلاحاً به این عمل *برازش خطی* گفته می‌شود). می‌توانیم در یک روش دقیق‌تر با استفاده از ماشین حساب‌های مهندسی با قابلیت انجام برازش، این خط را رسم کنیم. انتظار داریم برای هریک از نقاط این خط، نسبت $\frac{\overline{VIt}}{(m_w c_w + C_c)\Delta T}$ با دقت مناسب برابر واحد باشد.

پاسخ فعالیت ۲ــ۸

الف) همان‌طور که در صورت فعالیت آمده است، باید از رابطهٔ ۲ــ۱۰ استفاده کنیم. از این رابطه $R = V^۲/P_{\text{مصرفی}}$ به‌دست می‌آید که این مقاومت الکتریکی در دمایی است که دستگاه (لامپ) به ولتاژ اسمی خود متصل شده است. در استفاده از اهم‌سنج به دانش‌آموزان گوشزد کنید که هنگام استفاده از آن ابتدا سنجه را روی حداکثر مقاومت قابل اندازه‌گیری تنظیم کنند و دوم اینکه همان‌طور که در صورت فعالیت نیز آمده، وسیله (اینجا لامپ) باید خاموش (در دمای اتاق) باشد و هیچ جریانی از آن نگذرد.

این آزمایش، آزمایش مهمی است و دانش‌آموزان پس از انجام آن به تفاوت زیادی بین مقاومت اندازه‌گیری شده و مقاومت حاصل از رابطهٔ ۲ــ۱۰ می‌رسند. مقاومت اندازه‌گیری شده حدود ۲۰ Ω ــ۴۰ Ω می‌شود، درحالی که همان‌طور که خواهید دید رابطهٔ ۲ــ۱۰ برای اندازهٔ مقاومت به عددی حدود ۵۰۰ Ω می‌انجامد.

دانش‌آموزان باید با بحث گروهی و البته راهنمایی معلم به نقش دمای رشته (فیلامان) ملتهب لامپ پی‌ببرند که این موضوعِ قسمت ب فعالیت است.

ب) مقاومت لامپ ۱۰۰ واتی روشن با استفاده از معادلهٔ ۲ــ۱۰ برابر است با

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

اکنون از رابطهٔ ۲ــ۴، دمای رشتهٔ لامپ را به‌دست می‌آوریم. در مثال ۲ــ۴ دیدیم که این معادله به رابطهٔ زیر می‌انجامد :

$$R = R_۰\left[۱+\alpha(T-T_۰)\right]$$

از این‌جا دمای T را محاسبه می‌کنیم :

$$T = T_۰ + \frac{R-R_۰}{\alpha R_۰}$$

$$= ۲۰/۰^\circ\text{C} + \frac{(۴۸۴\Omega - ۴۰\Omega)}{(۴/۵\times۱۰^{-۲}\ ^\circ\text{C}^{-۱})(۴۰\Omega)}$$

$$= ۲/۵\times۱۰^{۳}\ ^\circ\text{C}$$

توجه کنید عدد ۲۵۰۰ °C صرفاً برآوردی برای دمای رشتهٔ لامپ است. همچنین توجه کنید که در محاسبهٔ دما فرض کردیم که اهم‌سنج، مقاومت لامپ خاموش را حدود ۴۰ Ω نشان داده است. دمای اتاق را $T_۰ = ۲۰/۰^\circ\text{C}$ گرفته‌ایم، و ضریب دمایی مقاومت a را نیز از جدول ۲ــ۱ قرار دادیم.

در این فیلم چگونگی فعالیت ۲ــ۸ را می‌بینید.

فیلم

پاسخ پرسش ۲ــ۲

پاسخ این است که همهٔ لامپ‌های رشته‌ای (از جمله لامپ هالوژن) با تبدیل انرژی الکتریکی به‌صورت گرما، رشته (فیلامان) لامپ را گرم می‌کنند. فقط بخشی از این انرژی به نور مرئی تبدیل می‌شود. بنابراین بیشتر آن به‌صورت گرما تلف می‌گردد. اما در LEDها، بخش بزرگی از انرژی الکتریکی داده شده به حامل‌های بار، با حرکت دادن حامل‌های بار و عبور جریان از LED موجب گسیل نور توسط آنها می‌شود. به عبارتی، بخش عمدهٔ انرژی الکتریکی داده شده موجب گسیل نور می‌شود و تنها مقدار ناچیزی از آن به‌صورت گرما تلف می‌گردد. به عبارت دیگر بازدهٔ لامپ‌های LED خیلی بیشتر از لامپ‌های رشته‌ای است. بنابراین برای تولید نور یکسان توسط این دو لامپ، لامپ‌های LED انرژی بسیار کمتری مصرف می‌کنند.

پرسش‌های پیشنهادی

۱ کدام جمله درست است؟

الف) موتور الکتریکی، الکتریسیته مصرف می‌کند.

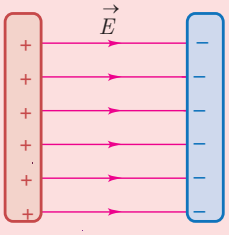
ب) موتور الکتریکی انرژی الکتریکی مصرف می‌کند.

پ) مولّد الکتریکی، الکتریسیته تولید می‌کند.

ت) مولّد الکتریکی انرژی الکتریکی تولید می‌کند.

پاسخ : جمله‌های **ب** و **ت**. (در مورد **ب** توجه کنید بار الکتریکی‌ای که وارد یک موتور الکتریکی می‌شود و از آن خارج می‌گردد یکسان است. آنچه تغییر می‌کند پتانسیل الکتریکی است. مثل ماشین بخار که بخار خروجی آن فشار کمتری دارد).

۲ در دستگاهی مانند شکل زیر اگر بار مثبت را در نزدیکی صفحهٔ مثبت رها کنید، تغییر انرژی پتانسیل و جنبشی آن را براساس قانون پایستگی انرژی توضیح دهید.



پاسخ : بار مثبت هم‌جهت با میدان شروع به حرکت می‌کند و لحظه به لحظه بر سرعت آن افزوده می‌شود، یعنی انرژی پتانسیل الکتریکی آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.

۳ برای خرید یک کتری برقی به مغازه‌ای مراجعه می‌کنیم. فرض کنید فروشنده دو کتری را پیشنهاد می‌دهد : گنجایش هر دو یکسان و به اندازهٔ دو لیوان آب است. هر دو با برق ۲۲۰ ولت کار می‌کنند، ولی کتری A در مدت ۵ دقیقه می‌تواند آب حدود $20^{\circ}C$ را به جوش آورد، در حالی که کتری B همین عمل را در مدت ۳ دقیقه انجام می‌دهد.

الف) کدام کتری برای جوش آوردن ۲ لیوان آب $20^{\circ}C$ انرژی بیشتری مصرف می‌کند؟

ب) کدام کتری را برای خرید انتخاب می‌کنید؟

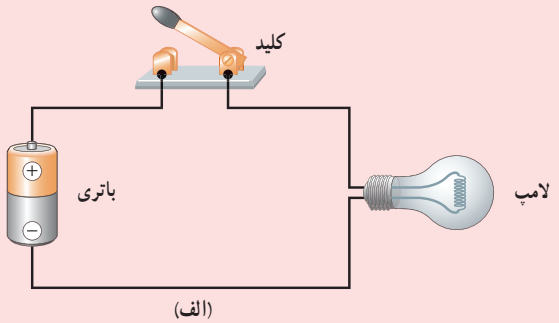
پ) کدام کمیت فیزیکی در این دو کتری متفاوت است؟

پاسخ : الف) انرژی مصرفی هر دو یکسان است. زیرا $Q = mc\,\Delta\theta$ برای هر دو یکسان است.

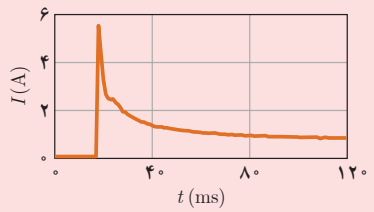
ب) بستگی به نظر خریدار دارد. اگر می‌خواهد در زمان کوتاه‌تری به نتیجهٔ مطلوب برسد، کتری B مناسب است.

پ) بچه‌ها نخست به زمان اشاره می‌کنند. از اینجا می‌توانید آنها را به توان مصرفی جلب کنید که در دو کتری متفاوت است.

۴ وقتی در مدار شکل الف، کلید بسته می‌شود، جریان لامپ مانند شکل ب رفتار می‌کند. الف) چرا جریان در ابتدا بزرگ‌تر از مقدار ثابت نهایی می‌شود؟ ب) چرا جریان در نهایت ثابت می‌ماند؟



(الف)



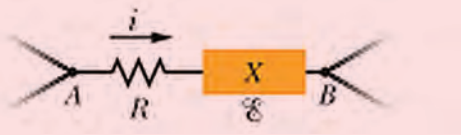
(ب)

پاسخ : الف) زیرا در ابتدای روشن شدن لامپ، رشته لامپ (که از جنس فلز است) نسبتاً سرد است. بنابراین مقاومت آن نسبت به حالتی که از روشن بودن لامپ مدتی می‌گذرد، کمتر است. مقاومت پایین‌تر به معنی جریان بیشتر است.

ب) پس از مدتی که از روشن شدن لامپ می‌گذرد، انرژی‌ای که از باتری به رشتهٔ لامپ می‌رسد با همان آهنگ در رشتهٔ داغ، به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. تحت این شرایط، دمای رشته و بنابراین مقاومت آن ثابت می‌ماند.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ در شکل روبه‌رو بخش AB ی مدار، وقتی جریان $I = ۱/۹\ A$ در جهت نشان داده شده از آن می‌گذرد، انرژی را با آهنگ $۵۰\ W$ جذب می‌کند. اندازهٔ مقاومت $R = ۲/۰\ \Omega$ است.



الف) اختلاف پتانسیل میان A و B چقدر است؟ منبع نیروی محرکه‌ای که با X مشخص شده است، مقاومت داخلی ندارد.
ب) نیروی محرکهٔ الکتریکی آن چقدر است؟ پ) آیا نقطهٔ B به پایانهٔ مثبت X وصل شده است یا به پایانهٔ منفی آن؟

پاسخ : الف) اگر I جریان و ΔV اختلاف پتانسیل باشد، آنگاه توان جذب‌شده با $P = I\,\Delta V$ می‌شود. توجه کنید که چون انرژی جذب می‌شود، پتانسیل A از B بیشتر و $\Delta V_{AB} > ۰$ است. در نتیجه داریم :

$$\Delta V_{AB} = \frac{P}{I} = \frac{۵۰\,W}{۱/۰\,A} = ۵۰\,V$$

ب) از نقطه A به سوی نقطه B در جهت جریان حرکت کرده و اختلاف پتانسیل را محاسبه می‌کنیم :

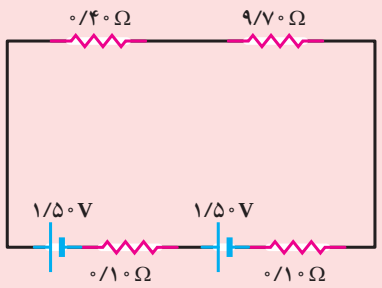
$$V_A - IR - \mathscr{E} = V_B$$

که $\mathscr{E}$ نیروی محرکهٔ الکتریکی منبع X است. از آنجا $\mathscr{E}$ چنین می‌شود :

$$\mathscr{E} = V_A - V_B - IR = ۵۰\,V - (۱/۰\,A)^۲\,(۲/۰\,\Omega) = ۴۸\,V$$

پ) مقدار مثبت $\mathscr{E}$ نشان می‌دهد که سوی نیروی محرکهٔ الکتریکی به سمت چپ است. یعنی پایانهٔ منفی آن در نقطهٔ B قرار دارد.

۲ یک چراغ قوه توسط دو باتری واقعی که به‌طور متوالی بسته شده‌اند روشن می‌شود. هر یک از باتری‌ها نیروهای محرکهٔ $۱/۵۰\ V$ و مقاومت داخلی $۰/۱۰\ \Omega$ دارد. باتری‌ها توسط سیم‌هایی با مقاومت کل $۰/۴۰\ \Omega$ به لامپی وصل هستند که در دمای اتاق مقاومت برابر $۹/۷۰\ \Omega$ دارد. الف) توان تلف‌شده در لامپ یعنی آهنگی که با آن انرژی به‌صورت گرما و نور در لامپ از دست می‌رود چقدر است؟
ب) توان تلف‌شده در سیم‌ها و پ) توان خالصی که توسط باتری‌ها داده می‌شود، چقدر است؟



الف) نخست جریان I را به دست می‌آوریم. با استفاده از قاعدهٔ حلقه به $I = ۰/۲۹۱۳\ A$ می‌رسیم. آنگاه برای توان تلف‌شده در لامپ خواهیم داشت :

$$P_۱ = I^۲ R_۱ = (۰/۲۹۱۳\,A)^۲\,(۹/۷۰\,\Omega) = ۰/۸۲۳\,W$$

ب) توان تلف‌شده در سیم‌ها برابر است با

$$P_۲ = I^۲ R_۲ = (۰/۲۹۱۳\,A)^۲\,(۰/۴۰\,\Omega) = ۰/۰۳۴\,W$$

پ) توان خالص داده شده توسط باتری برابر است با

$$P_{\text{باتری}} = \mathscr{E} I - I^۲ r = (۳/۰۰\,V)\,(۰/۲۹۱۳\,A) - (۰/۲۹۱۳\,A)^۲\,(۰/۲۰\,A) = ۰/۸۵۷\,W$$

که برابر $P_۱ + P_۲$ است.

فعالیت‌های پیشنهادی

وسایل : دو باتری، دو لامپ، سیم رابط.

۱ همراه با گروه خود مدار ساده‌ای شامل یک باتری و یک لامپ ببندید و به نور لامپ توجه کنید (شکل الف).

۲ یک لامپ دیگر به مدار اضافه کنید و در مورد تغییر نور لامپ و علت آن بحث کنید (شکل ب).

۳ یک باتری دیگر به مدار اضافه کنید و در مورد تغییر نور لامپ‌ها و علت آن بحث کنید (شکل پ).

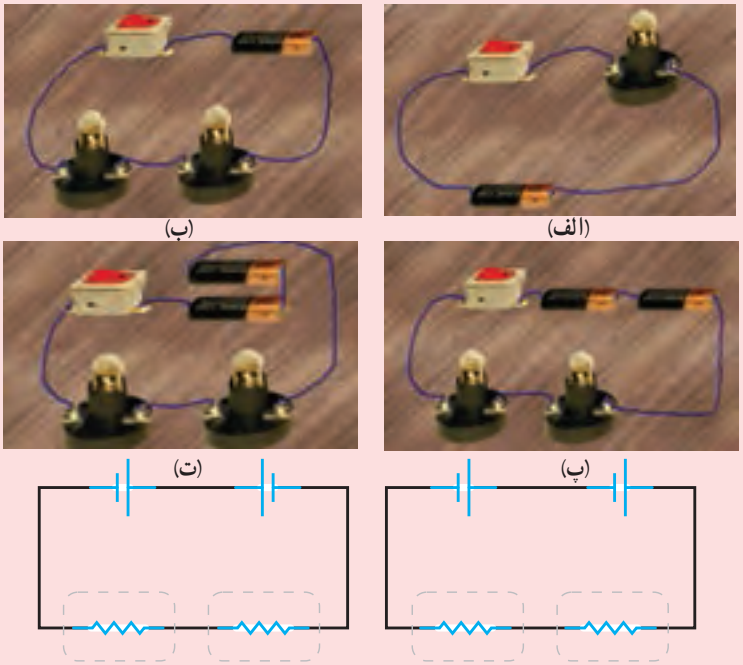
۱ یکی از باتری‌ها را از مدار جدا کنید و با عوض کردن محل قطب‌ها، آن را دوباره به مدار وصل کنید. در مورد تغییر نور لامپ‌ها و علت آن بحث کنید (شکل ت).

پاسخ : بارها ضمن عبور از مقاومت انرژی از دست می‌دهند. پس با ثابت ماندن تعداد باتری اگر تعداد لامپ‌ها بیشتر شود سهم انرژی هر لامپ کم می‌شود و نور آن نیز کم می‌گردد.

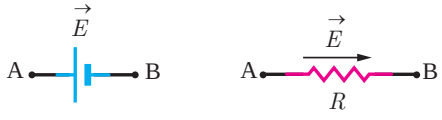
۲ بارها ضمن عبور از باتری انرژی می‌گیرند. پس هر چه تعداد باتری‌ها بیشتر باشد انرژی بارهای عبوری بیشتر می‌شود و می‌توانند در لامپ انرژی بیشتری را به نور تبدیل کنند.

۳ اگر بارها ضمن حرکت از پایانهٔ مثبت باتری به سمت پایانهٔ منفی بروند (یعنی در جهت میدان حرکت کنند) نه تنها انرژی کسب نمی‌کنند بلکه انرژی خود را از دست می‌دهند و اگر باتری‌ها مشابه باشند هر قدر یکی انرژی بدهد، دیگری می‌گیرد. پس انرژی‌ای برای روشن شدن لامپ‌ها باقی نمی‌ماند.

توجه : اگر در مدرسه یا کلاس امکان انجام آزمایش و بستن مدارها وجود ندارد فعالیت پیشنهادی را تبدیل به یک پرسش می‌کنیم و عکس‌های واقعی از مدار را به دانش‌آموزان نشان می‌دهیم و از آنها می‌خواهیم که نماد مداری برای هر کدام رسم کنند و در مورد نور لامپ‌ها پیشگویی کنند.



در پاسخ به تمرین ۲ــ۴ می‌توانستیم به‌طور مستقل راه دیگری نیز برویم و آن اینکه از پایستگی انرژی به قاعدهٔ حلقه برسیم. در این مورد می‌توانیم دوباره یادآوری کنیم که بار مثبت با حرکت در جهت میدان، انرژی الکتریکی از دست می‌دهد و بار منفی بالعکس انرژی الکتریکی به‌دست می‌آورد و با حرکت در خلاف جهت میدان ماجرا برعکس می‌شود. بعد می‌توانیم یک مدار تک‌حلقهٔ ساده را مشتمل بر دو بخش بگیریم.



(ب) (الف)

می‌خواهیم تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار مثبتی را که در این شکل‌ها از A به B می‌رود بررسی کنیم. در شکل الف $V_A > V_B$ و جهت جریان از A به B است و انرژی پتانسیل الکتریکی به اندازهٔ q (IR) کاهش می‌یابد. پس داریم

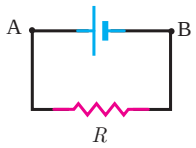
$$U_A - IRq = U_B$$

در شکل ب دوباره $V_A > V_B$ است، اما جهت انتقال بار از B به A است و بار الکتریکی مثبت در خلاف جهت میدان جابه‌جا می‌شود و انرژی پتانسیل آن افزایش می‌یابد :

$$U_B + q\mathscr{E} = U_A$$

از تلفیق این دو رابطه به رابطه زیر می‌رسیم :

$$U_A - IRq = U_A - q\mathscr{E} \Rightarrow \mathscr{E} - IR = 0$$



یعنی وقتی اینها حلقهٔ بسته‌ای را تشکیل می‌دهند، قاعدهٔ حلقه برقرار می‌شود.

پاسخ تمرین ۲ــ۴

در یک مدار ساده شامل یک باتری آرمانی و مقاومت، قاعدهٔ حلقه به‌صورت $\mathscr{E} - IR = 0$ و یا $\mathscr{E} = IR$ درمی‌آید. حال اگر دوطرف این رابطه را در $I\Delta t$ ضرب کنیم به رابطهٔ $\mathscr{E}I\Delta t = I^2R\Delta t$ می‌رسیم. با توجه به اینکه $I\Delta t = \Delta q$ است و با استفاده از تعریف نیروی محرکهٔ الکتریکی $\mathscr{E} = \Delta W/\Delta q$، طرف چپ این معادله برابر با ΔW یا همان کاری که باتری آرمانی روی بار انجام داده است. از طرفی می‌دانیم توان الکتریکی مصرفی در رسانایی با مقاومت R برابر RI^2 است. بنابراین طرف راست معادلهٔ بالا در واقع مقدار انرژی است که در مقاومت به انرژی گرمایی تبدیل شده است. پس رابطهٔ بالا چیزی جز پایستگی انرژی نیست و انرژی تأمین شده توسط باتری آرمانی به‌صورت انرژی گرمایی در مقاومت ظاهر شده است.

۲ــ۶ــ ترکیب مقاومت‌ها

در ترکیب مقاومت‌ها معمولاً فقط از روابط ریاضی استفاده می‌شود. خوب است پیش از شروع بحث با پرسش‌هایی از زندگی روزمره شروع کنیم؛ مثلاً

ــ تعدادی از مصرف‌کننده‌های الکتریکی در خانه را نام ببرید. درخانه منبع تولیدکننده انرژی الکتریکی چیست و اتصال مصرف‌کننده‌ها به آنها از چه طریق است؟

ــ در حالت عادی برای قطع جریان برق در یک مصرف‌کننده از چه وسیله‌ای استفاده می‌کنیم؟ (**پاسخ** : کلید)

ــ موردی را بیان کنید که قطع کردن کلید به خاموش شدن (قطع جریان الکتریکی) هم‌زمان در چند مصرف‌کننده الکتریکی بینجامد. (**پاسخ** : لامپ‌های یک لوستر خانگی)

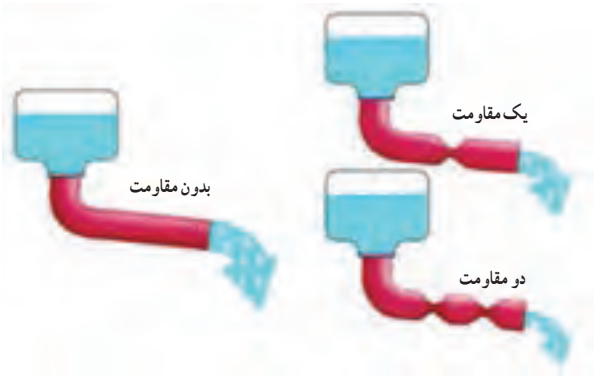
ــ موردی را بیان کنید که قطع کردن کلیدبه خاموش شدن هم‌زمان چند مصرف‌کننده الکتریکی نینجامد. (**پاسخ** : لامپ روشنایی اتاق و تلویزیون)

ــ تفاوت عملکرد مصرف‌کننده‌های الکتریکی در دو مورد اخیر در چیست؟ (**پاسخ** : در به هم بستن مصرف‌کننده‌ها).

بر این نکته تأکید کنید که به هم بستن مقاومت‌ها نقش مهمی در کاربرد آنها دارد و بسته به نوع استفاده‌ای که از مصرف‌کننده‌های الکتریکی می‌کنیم، به هم بستن آن متفاوت است.

در اینجا خوب است با ذکر مثال‌هایی از ترکیب‌های مقاومت‌هایی که به ظاهر متوالی بسته شده‌اند ولی در بین آنها انشعابی وجود دارد، به تفهیم این موضوع بپردازید.

در اتصال موازی، مشابهت‌سازی‌ای با شارش آب آمده است. می‌توان چنین مشابهت‌سازی را برای اتصال متوالی نیز به کاربرد. بنابراین شکل‌هایی مثل شکل زیر آموزنده است.



پاسخ تمرین ۲ــ۵

الف) مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند. بنابراین برای مقاومت معادل مقاومت‌های R_1، R_2 و R_3 داریم :

$$R_{123} = R_1 + R_2 + R_3$$
$$= 3/0\Omega + 6/0\Omega + R_3 = 13/0\Omega$$

در نتیجه $R_3 = 4/0\Omega$ می‌شود.

ب) برای جریان I (که همان جریانی است که آمپرسنج نشان می‌دهد) داریم :

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_{123} + r} = \frac{7/0\text{V}}{13/0\Omega + 1/0\Omega} = 0/50\text{A}$$

پ) گرچه در متن درس نشان دادیم، دوباره می‌خواهیم رابطهٔ ۲ــ۱۱ را به‌دست آوریم. از رابطهٔ $P = I\Delta V$ استفاده کنیم. از طرفی اختلاف پتانسیل دو سر یک باتری واقعی از رابطهٔ $\Delta V = \mathscr{E} - Ir$ به‌دست می‌آید. بنابراین برای توان خروجی باتری داریم :

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

که در اینجا چنین می‌شود :

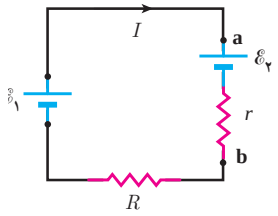
$$P_{\text{خروجی}} = (7/0\text{V})(0/50\text{A}) - (1/0\Omega)(0/50\text{A})^2 = 3/25\,W$$

از طرفی برای توان‌های مصرفی در مقاومت‌های R_1، R_2 و R_3 داریم :

$$P_{\text{مصرفی}} = I^2(R_1 + R_2 + R_3) = I^2 R_{123} = (0/50\text{A})^2(13/0\Omega) = 3/25\text{W}$$

توجه کنید که در حل چنین مسائلی از گرد کردن و به‌کارگیری محاسبات رقم‌های بامعنا در نتیجهٔ نهایی می‌پرهیزیم تا بتوان پاسخ‌های نهایی را به‌دقت مقایسه کرد.

تبصره : توجه کنید رابطه‌ای که برای توان مصرفی باتری به‌دست آوردیم، برای تمام باتری‌ها در هر مداری برقرار نیست. مثلاً مدار شکل زیر را درنظر بگیرید که در آن $\mathscr{E}_1 > \mathscr{E}_2$ است و بنابراین جریان در جهت نشان داده شده است.



در این صورت توان باتری ۲ از رابطه‌ای که در حل مسئله به‌دست آوردیم، به‌دست نمی‌آید؛ زیرا اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\Delta V = \mathscr{E}_2 + Ir$$

البته برای محاسبهٔ توان باتری ۲ باید $V_b - V_a$ را درنظر گرفت و بنابراین رابطهٔ $P = I\Delta V$ به $-I(\mathscr{E}_2 + Ir)$ تبدیل می‌شود و قدرمطلق آن همان توان ورودی به باتری ۲ است.

$$P_{\text{ورودی}} = |P| = \mathscr{E}_2 I + rI^2$$

خوب است این بیان را به‌طور ریاضی نیز بررسی کنیم. اگر مثلاً ولت‌سنج با مقاومت R_V را به‌طور موازی با وسیله‌ای با مقاومت R_d ببندیم، مقاومت کل چنین می‌شود :

$$R = \frac{R_V R_d}{R_V + R_d} = \frac{R_d}{1 + R_d / R_V}$$

هرچه مقاومت R_V ولت‌سنج در مقایسه با مقاومت R_d وسیله بزرگ‌تر باشد، اختلاف بین مقاومت کّل آنها و مقاومت R_d وسیله کوچک‌تر است و بر ولت‌سنج تأثیر کمتری می‌گذارد. پس مقاومت ولت‌سنج باید تا آنجا که ممکن است بزرگ اختیار شود. به این منظور، گاهی یک مقاومت اضافی را که ممکن است مقاومتش به چند هزار اُهم برسد به‌طور متوالی به ولت‌سنج می‌بندند.

برخلاف ولت‌سنج، آمپرسنج باید مقاومت بسیار کوچکی داشته باشد. اگر مقاومت آمپرسنج را با R_a و مقاومت مدار را با R_c نمایش دهیم، مقاومت کلّ مدار (همراه با آمپرسنج) چنین می‌شود :

$$R = R_c + R_a = R_c\left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right)$$

پاسخ پرسش ۲ــ۳

در نقطهٔ انشعاب نشان داده شده، جریان‌های I_1، I_2 و I_4 وارد می‌شوند، درحالی که جریان I_3 خارج می‌گردد. بنابراین

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3$$

که آن را می‌توان (آن‌طور که در بسیاری از کتاب‌ها مرسوم است) به‌صورت زیر نوشت :

$$I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

فعالیت ۲ــ۹

این فعالیتی است که برای آزمودن تجربی قاعدهٔ انشعاب در مدارها مطرح شده است.

در اینجا می‌توان با ذکر مثال ساده‌ای که در آن در مدار شکل ۲ــ۳۹، مقاومت‌ها با لامپ‌هایی جایگزین شده باشند، و با بیان این پرسش که اگر یکی از لامپ‌ها را از مدار خارج کنیم آیا لامپ‌های دیگر خاموش می‌شوند، طرح درس خود را آغاز کنیم.

در اینجا خوب است علاوه بر شکل ۲ــ۳۹، به ترکیب مقاومت‌های دیگری که ظاهر موازی ندارند ولی «به‌صورت موازی» بسته شده‌اند، دانش‌آموزان را درگیر این مفهوم سازیم.

پاسخ تمرین ۲ــ۶

الف) توجه کنید ۱/۶Ω مقاومت معادل مقاومت‌های $R_۱$، $R_۲$، و $R_۳$ است. این سه مقاومت به‌طور موازی بسته شده‌اند و برای مقاومت معادل آنها داریم :

$$\frac{۱}{R_{۱۲۳}}=\frac{۱}{R_۱}+\frac{۱}{R_۲}+\frac{۱}{R_۳}$$

$$\frac{۱}{۱/۶\Omega}=\frac{۱}{۳/۰\Omega}+\frac{۱}{۶/۰\Omega}+\frac{۱}{R_۳}=\frac{۱}{۲/۰\Omega}+\frac{۱}{R_۳}$$

از آنجا داریم :

$$\frac{۱}{R_۳}=\frac{۱}{۱/۶\Omega}-\frac{۱}{۲/۰\Omega}=\frac{۲/۰\Omega-۱/۶\Omega}{(۱/۶\Omega)(۲/۰\Omega)}=\frac{۰/۴۰\Omega}{۳/۲\Omega^{۲}}=۰/۱۲۵\Omega^{-۱}$$

و در نتیجه $R_۳=۸/۰\Omega$ می‌شود.

ب) مقاومت معادل مقاومت‌های $R_۱$، $R_۲$، و $R_۳$ با مقاومت r متوالی هستند و بنابراین مقاومت معادل کلّ مقاومت‌های مدار (که شامل مقاومت باتری نیز می‌شود) برابر است با

$$R_{eq}=R_{۱۲۳}+r=۱/۶\Omega+۱/۰\Omega=۲/۶\Omega$$

بنابراین جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد برابر است با

$$I=\frac{\mathscr{E}}{R_{eq}}=\frac{۳/۰\mathrm{V}}{۲/۶\Omega}\approx ۱/۲\mathrm{A}$$

ولی توجه کنید در حل قسمت پ به‌جای I از کسر $\frac{۳/۰\mathrm{V}}{۲/۶\Omega}$ استفاده خواهیم کرد، زیرا در چنین محاسباتی مجاز به گرد کردن داده‌ها نیستیم.

ب) با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ توان خروجی باتری واقعی را به‌دست می‌آوریم (و نیز نگاه کنید به حل تمرین ۲ــ۵).

$$P_{\text{خروجی}}=\mathscr{E}I-rI^{۲}$$

$$=(۳/۰\mathrm{V})\left(\frac{۳/۰\mathrm{V}}{۲/۶\Omega}\right)-(۱/۰\Omega)\left(\frac{۳/۰\mathrm{V}}{۲/۶\Omega}\right)^{۲}=۲/۱۳۰\mathrm{W}$$

از طرفی، مجموع مقاومت‌های مصرفی در مقاومت‌ها برابر است با

$$P_{\text{مصرفی}}=\frac{V_۱^{۲}}{R_۱}+\frac{V_۲^{۲}}{R_۲}+\frac{V_۳^{۲}}{R_۳}$$

اما می‌دانیم ولتاژ مقاومت‌های موازی با هم برابر است. این ولتاژ برابر با حاصل‌ضرب جریان عبوری از مدار در مقاومت معادل $R_{۱۲۳}$ است :

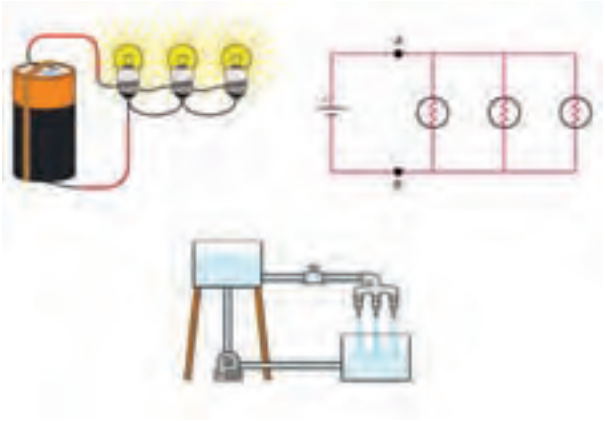
$$V_۱ = V_۲ = V_۳ = IR_{۱۲۳}$$

در نتیجه برای توان مصرفی داریم :

$$P_{\text{مصرفی}} = (IR_{۱۲۳})^۲(\frac{۱}{R_۱}+\frac{۱}{R_۲}+\frac{۱}{R_۳}) = (IR_{۱۲۳})^۲(\frac{۱}{R_{۱۲۳}})$$

$$= I^۲R_{۱۲۳} = (\frac{۳/۰\text{V}}{۲/۶\Omega})^۲(۱/۶\Omega) = ۲/۱۳۰\text{W}$$

در اینجا می‌شود مثال‌های ملموس‌تری مانند شکل زیر را در تفهیم موضوع آورد.



همچنین مقالهٔ آموزنده‌ای تحت عنوان

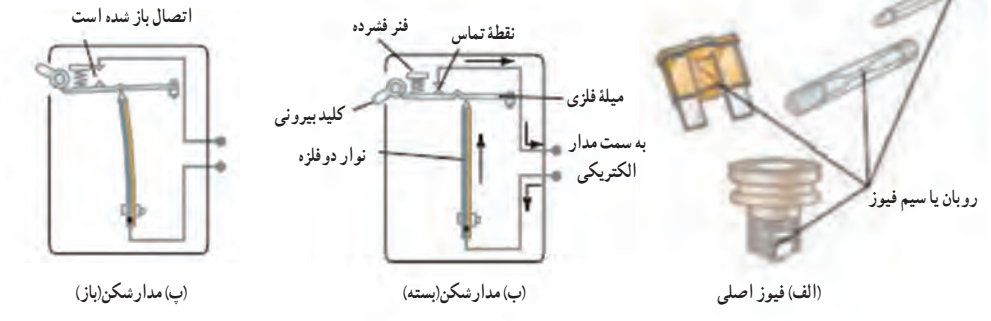
understand electrical circuit – comparison with water system

در اینترنت یافت می‌شود که این مشابهت‌سازی‌ها را با ارائهٔ چند مثال، بیشتر تفهیم می‌کند.

فیلم

در این فیلم‌ها ترکیب مقاومت‌های سری و مقاومت‌های موازی را در عمل مشاهده می‌کنید.

خوب است اشاره شود اساس کار فیوزهای فرعی منازل که اصطلاحاً به آنها مدارشکن (circuit breaker) گفته می‌شود متفاوت با فیوز اصلی است که در مثال ۲ــ۱۴ به آن اشاره شده است. در فیوز اصلی، سیم یا روبان فلزی‌ای قرار دارد که با عبور جریان از حدّ معینی می‌سوزد و باید تعویض گردد (شکل الف). اما اساس کار مدارشکن‌ها متفاوت است. شکل ب ساختار نوع ساده‌ای از مدارشکن‌ها را نشان می‌دهد. با عبور جریان، از حدّ ایمن، گرم شدن نوار دو فلزه باعث می‌شود این نوار آنقدر به سمت چپ خم شود تا برآمدگی روی میلهٔ فلزی‌ای که در انتهای آن فلزی قرار گرفته است، روی نوک نواری دو فلزه قرار گیرد و بدین ترتیب مدار باز شود (شکل پ). با بازشدن مدار، کلید بیرونی نیز برخلاف جهت اولیهٔ خود می‌جهد که ما آن را مشاهده می‌کنیم. البته نوع پیشرفته‌تر این فیوزها براساس القای الکترومغناطیسی کار می‌کنند و به آنها GFCI گفته می‌شود.



(پ) مدارشکن(باز) (ب) مدارشکن(بسته) (الف) فیوز اصلی

در این فیلم با اقسامی از فیوزها آشنا می‌شوید.

فیلم

همچنین خوب است در انتهای این مبحث به سیم کشی برق منازل و واژه‌های فاز و نول هم بپردازید. کابلی که برق شهر را وارد خانه‌ها می‌کند از دو سیم درست شده است، یکی سیم فاز یا سیم دارای بار و دیگری سیم نول یا سیم خنثی. سیم نول در ایستگاه مبدّل محل به زمین متصل شده است و بنابراین پتانسیل زمین را دارد. کابل برق وارد فیوز اصلی و کنتور و سپس مدارشکن‌ها می‌شود.

پاسخ تمرین ۲ــ۷

الف) مقاومت‌های R_1 و R_2 متوالی‌اند و مقاومت معادل آنها را R_{12} می‌نامیم. همین‌طور مقاومت‌های R_4 و R_5 متوالی‌اند و مقاومت معادل آنها را R_{45} می‌نامیم. پس اکنون مقاومت‌های R_{12} و R_3 و R_{45} موازی‌اند. بنابراین برای مقاومت کل مدار بین نقطه‌های F و H داریم :

$$\frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{R_{12}}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_{45}}$$

$$=\frac{1}{8/00\Omega+8/00\Omega}+\frac{1}{8/00\Omega}+\frac{1}{8/00\Omega+8/00\Omega}=\frac{2}{8/00\Omega}=0/250\Omega^{-1}$$

و در نتیجه

$$R_{eq}=\frac{1}{0/250\Omega^{-1}}=4/00\Omega$$

تبصره : با توجه به اینکه در این تمرین مقاومت‌ها با هم برابرند، ساده‌تر آن بود که مسئله را به شکل پارامتری حل می‌کردیم.

$$R_{12}=R+R=2R \quad و \quad R_3=R \quad و \quad R_{45}=R+R=2R$$

و از آنجا

$$\frac{1}{R_{eq}}=\frac{1}{2R}+\frac{1}{R}+\frac{1}{2R}=\frac{4}{2R}=\frac{2}{R}$$

بنابراین $R_{eq}=R/2=4/00\Omega$ می‌شود.

ب) اکنون مانند قسمت الف، $R_۱$ و $R_۲$ متوالی‌اند و مقاومت معادل آنها نیز با $R_۴$ موازی است. ولی در اینجا مقاومت معادل این سه مقاومت با مقاومت $R_۵$ متوالی و مقاومت معادل کل آنها با مقاومت $R_۴$ موازی است. بنابراین برای مقاومت معادل کلّ داریم :

$$\frac{۱}{R_{eq}}=\frac{۱}{R_۴}+\frac{۱}{R_{۱۲۳۵}} \qquad (۱)$$

که در آن $R_{۱۲۳۵}$ خود برابر است با

$$R_{۱۲۳۵}=R_{۱۲۳}+R_۵ \qquad (۲)$$

و $R_{۱۲۳}$ خود از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\frac{۱}{R_{۱۲۳}}=\frac{۱}{R_{۱۲}}+\frac{۱}{R_۳}=\frac{۱}{۸/۰۰\Omega+۸/۰۰\Omega}+\frac{۱}{۸/۰۰\Omega}=\frac{۳}{۱۶/۰\Omega}$$

در نتیجه

$$R_{۱۲۳}=\frac{۱۶/۰\Omega}{۳}=۵/۳۳\Omega$$

اکنون با استفاده از رابطهٔ (۲) داریم :

$$R_{۱۲۳۵}=۵/۳۳\Omega+۸/۰۰\Omega=۱۳/۳۳\Omega$$

که قرار دادن آن در رابطهٔ (۱)، چنین به‌دست می‌دهد :

$$\frac{۱}{R_{eq}}=\frac{۱}{۸/۰۰\Omega}+\frac{۱}{۱۳/۳۳\Omega}=۰/۲۰۰\Omega^{-۱}$$

و در نتیجه R_{eq} چنین می‌شود :

$$R_{eq}=\frac{۱}{۰/۲۰۰\Omega^{-۱}}=۵/۰۰\Omega$$

تبصره : با توجه به اینکه در این تمرین مقاومت‌ها با هم برابرند، می‌توانستیم به‌طور ساده‌تری، به‌روش پارامتری نیز مسئله را حل کنیم :

$$R_{۱۲}=R+R=۲R \quad \text{و} \quad \frac{۱}{R_{۱۲۳}}=\frac{۱}{۲R}+\frac{۱}{R}=\frac{۳}{۲R}\Rightarrow R_{۱۲۳}=\frac{۲R}{۳}$$

$$R_{۱۲۳۵}=\frac{۲R}{۳}+R=\frac{۵R}{۳}$$

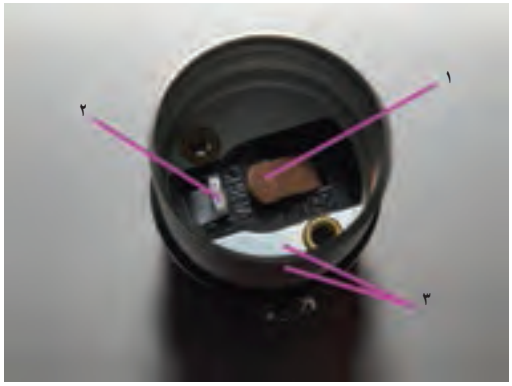
درنتیجه

$$\frac{۱}{R_{eq}}=\frac{۱}{(۵R/۳)}+\frac{۱}{R}=\frac{۸}{۵R}$$

درنتیجه $R_{eq}=۵R/۸$ و یا به عبارتی $R_{eq}=\frac{۵}{۸}(۸/۰۰\Omega)=۵/۰۰\Omega$ می‌شود.

خوب است واژهٔ انگلیسی لامپ سه راهه که 3–way lamp یا tri–light خوانده می‌شود را به دانش‌آموزان بخواهیم دربارهٔ این لامپ‌ها و کاربردشان تحقیق کنند.

تصویری از یک حباب یک لامپ سه راهه



یک سرپیچ «بدون کلید» لامپ سه راهه علاوه بر دو محل تماس معمولی، یک محل تماس بیشتر (محل تماس ۲ در شکل) نیز دارد.

استفاده از جریان برق در جراحی

جراحی الکتریکی[۱] روشی پزشکی است که در آن با یک میلهٔ باریک و رسانا، جریان برق متناوب پربسامدی را بر بیمار اعمال می‌کنند. این روش به جراح اجازه می‌دهد تا بدون ایجاد هیچ‌گونه خونریزی غیرضروری‌ای، شکافی را بر روی بدن بیمار ایجاد کند و نیز رگ‌های خونی بی‌حفاظ را (با حرارت) منعقد سازد.

برای آنکه جریان برق برقرار گردد، الکترودها (و در نتیجه قسمت شکاف‌خورده) بایستی بخشی از یک مدار کامل باشند. در نوعی از این روش، این مدار شامل نیشتر، بیمار و یک الکترود است که در زیر بیمار قرار می‌گیرد. در روزهای آغازینِ استفاده از این روش، بیماران شدیداً دچار سوختگی می‌شدند. در واقع وقتی الکترود به عضوی از بدن اعمال شود که با تکیه‌گاهی به بدن وصل است ــ مثل آنچه که ممکن است در جراحی الکتریکی ختنه رخ دهد ــ خطر سوختگی وجود دارد، که در اینجا می‌خواهیم به آن بپردازیم.

گرچه جریان بر محلّ شکاف متمرکز می‌شود، اما باید اجازه داد تا در ناحیهٔ بسیار بیشتری، در محل قرار گرفتن الکترود در زیر بیمار پخش شود. در غیر این صورت، جریان در تماس با الکترود زیرین، بدن بیمار را خواهد سوزاند. بنابراین، الکترود پهن است (تا جریان را پخش کند) و چنان قرار داده می‌شود که به‌خوبی با بدن تماس یابد، نه اینکه فقط در چند قسمت و یا در نزدیکی قسمت‌های استخوانی که جریان ممکن است در آنها متمرکز شود، تماس یابد. در روزهای آغازینِ استفاده از این روش، چنین احتیاط‌های ایمنی‌ای رعایت نمی‌شد و بیماران به شدت دچار سوختگی می‌شدند.

وقتی الکترود به عضوی از بدن اعمال شود که با تکیه‌گاهی به بدن وصل است، جریان تمایل می‌یابد تا در انتهای این تکیه‌گاه متمرکز شود، وضعیتی که به آن *ازدحام جریان*[۲] گفته می‌شود. در نتیجه، پایین این تکیه‌گاه می‌تواند سریعاً داغ و متلاشی شود، اتفاقی که پیش از آنکه خطر ازدحام جریان شناخته شود، در چند عمل جراحی غم‌انگیز رخ داده بود.

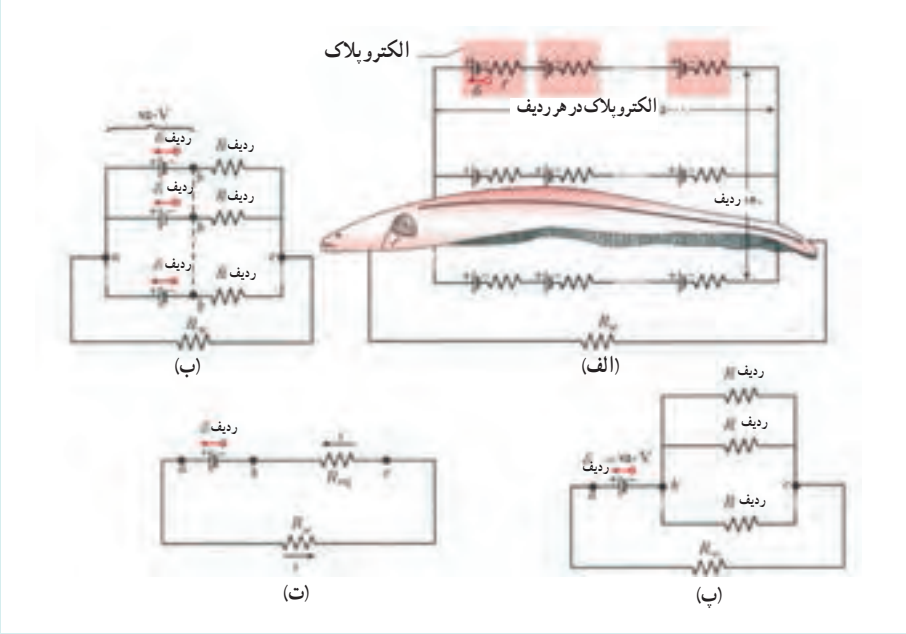
۱ــ Electrosurgery

۲ــ current crowding

دانستنی برای معلم

مدل سازی ماهی های الکتریکی با مدارهای الکتریکی

ماهی‌های الکتریکی که در «خوب است بدانید» بخش ۲ــ۴ کتاب به آن اشاره شده است، به کمک سلول‌های بیولوژیکی‌ای به نام *الکتروپلاک* که منبع‌های نیروی محرکهٔ فیزیولوژیکی هستند، جریان الکتریکی ایجاد می‌کنند. الکتروپلاک‌های موجود در نوعی از این ماهی به نام مارماهی آمریکایی آمریکای جنوبی[1] در ۱۴۰ ردیف آرایش یافته‌اند که هر ردیف در طول بدن ماهی به‌طور افقی امتداد یافته است و شامل ۵۰۰۰ الکتروپلاک هستند. این آرایش در شکل زیر نشان داده شده است. هر الکتروپلاک دارای نیروی محرکه‌ای برابر ۰/۱۵V و مقاومت r برابر ۰/۲۵Ω است. آب اطراف مارماهی، مدار بین دو انتهای این آرایهٔ الکتروپلاکی را، یکی در سرِ ماهی و دیگری در دم آن، کامل می‌کند. اگر مقاومت R_W آب اطراف مارماهی برابر ۸۰۰Ω باشد، محاسبه نشان می‌دهد این مارماهی می‌تواند جریانی برابر ۰/۹۲۷A ایجاد کند. اگر سر یا دم این مارماهی نزدیک یک ماهی قرار گیرد، ممکن است بخشی از این جریان با عبور از مسیر باریکی در ماهی، موجب گیج کردن یا مرگ آن شود.



الف) مدلی از مدار الکتریکی یک مارماهی در آب. هر الکتروپلاک مارماهی دارای emfای برابر با $\mathscr{E}$ و مقاومت داخلی r است. در طول هریک از ۱۴۰ ردیفی که از سر تا دم ماهی امتداد یافته است، ۵۰۰۰ الکتروپلاک وجود دارد. مقاومت آب اطراف مارماهی R_w است.

ب) emf هر ردیف $\mathscr{E}_{\text{ردیف}}$ و مقاومت هر ردیف $R_{\text{ردیف}}$ است.

پ) emf بین نقطه‌های a و b برابر با $\mathscr{E}_{\text{ردیف}}$ است. بین نقطه‌های b و c، ۱۴۰ مقاومت موازی $R_{\text{ردیف}}$ وجود دارد.

ت) مدار ساده شده، با R_{eq}ای که جایگزین ترکیب موازی مقاومت‌ها شده است.

۱ــ South American eel

دانستنی برای معلم

شنت کردن وسیله‌های اندازه‌گیری

شنت کردن یکی از کاربردهای مهم اتصال مقاومت‌ها و تقسیم جریان‌ها است. فرض کنید آمپرسنجی داریم که برای جریان بیشینهٔ I_{max} طراحی شده است، ولی می‌خواهیم جریان بیشتری از این جریان بیشینه را اندازه‌گیری کنیم. به این منظور، مقاومت کوچک r را *به‌صورت موازی* با آمپرسنج می‌بندیم. در این صورت بخش بزرگی از جریان از این مقاومت می‌گذرد. این مقاومت را *شنت* می‌نامند. مقاومت آمپرسنج را با R_A نشان می‌دهیم و فرض می‌کنیم که R، n برابر بزرگ‌تر از r است. اگر جریان در مدار، در آمپرسنج، و در شنت را به ترتیب با I_c ، I_A، و I_{sh} در نظر بگیریم، آنگاه خواهیم داشت :

$$\frac{I_{sh}}{I_A}=\frac{R}{r}=n$$

پس جریان کلّ I_C در مدار برابر است با

$$I_C=I_A+I_{sh}=I_A+nI_A=(n+۱)I_A$$

یا

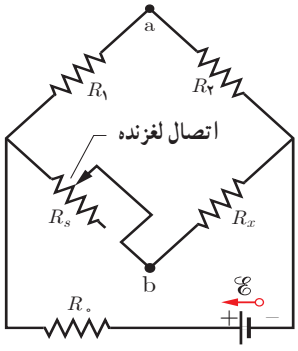
$$I_A=I_C\frac{۱}{n+۱}$$

پس، جریان I_A در آمپرسنج $\frac{۱}{n+۱}$ جریان در مدار است. در نتیجه به کمک شنت می‌توان از آمپرسنج برای اندازه‌گیری جریانی استفاده کرد که $n+۱$ بار بزرگ‌تر از جریانی است که آمپرسنج برای آن طراحی شده است.

دانستنی برای معلم

پل وتستون

در شکل زیر، مقدار R_s باید طوری تنظیم شود که با حرکت دادن اتصال لغزنده روی آن، سرانجام پتانسیل‌های a و b یکسان شود (یک روش برای تحقیق این شرط آن است که برای لحظه‌ای آمپرسنج حساسی را بین نقطه‌های a و b ببندیم؛ اگر این دو نقطه در پتانسیل یکسانی باشند، آمپرسنج منحرف نخواهد شد.) نشان می‌دهیم هرگاه این تنظیم ایجاد شود، رابطهٔ $R_x=R_sR_۲/R_۱$ برقرار است. یک مقاومت مجهول (R_x) را می‌توان با استفاده از این وسیله که ***پل وتستون*** خوانده می‌شود، برحسب یک مقاومت استاندارد (R_s) اندازه‌گیری کرد.



$I_۱$ را جریان در مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ ، و $I_۲$ را جریان در مقاومت‌های R_s و R_x در نظر بگیرید. اختلاف پتانسیل V_a-V_b را از دو مسیر محاسبه می‌کنیم. از مسیر $R_s\longrightarrow R_۱$ داریم :

$$V_a-V_b=I_۱R_۱-I_۲R_s$$

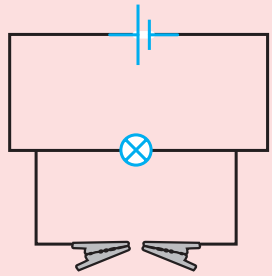
که با توجه به اینکه نقاط a و b هم‌پتانسیل‌اند، $I_۱R_۱=I_۲R_s$ می‌شود. از مسیر $R_۲\longrightarrow R_x$ نیز دوباره با توجه به اینکه $V_a=V_b$ است به $I_۱R_۲=I_۲R_x$ می‌رسیم. از تقسیم این دو رابطه $R_x=R_sR_۲/R_۱$ به‌دست می‌آید.

پرسش‌های پیشنهادی

۱ رشته‌ای شامل ۱۲ لامپ کاملاً مشابه به‌طور متوالی به یک منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی ۱۲۰ V بسته شده‌اند. هر لامپ ۱۵W توان مصرف می‌کند. مقاومت هر لامپ چقدر است؟

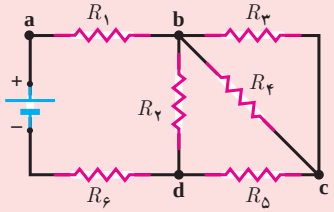
پاسخ : چون هر لامپ ۱۵ W تلف می‌کند، کلّ انرژی‌ای که منبع تحویل می‌دهد $P = ۱۲\,(۱۵\mathrm{W}) = ۱۸۰\mathrm{W}$ می‌شود. و از آنجا $I = P/\mathscr{E} = \frac{۱۸۰\mathrm{W}}{۱۲۰\mathrm{V}} = ۱/۵\mathrm{A}$ می‌گردد. کلّ افت پتانسیل در دو سر دوازده لامپ ۱۲۰V است. چون لامپ‌ها یکسان‌اند، افت پتانسیل دو سر هر یک باید ۱۰ V /۱۲ = ۱۰ V (۱۲۰ V) باشد. پس مقاومت هر لامپ برابر است با $R = \frac{۱۰\mathrm{V}}{۱/۵\mathrm{A}} \approx ۶/۷\Omega$.

۲ــ در شکل زیر یک مدار الکتریکی را می‌بینید که در آن باتری جریان را از لامپ می‌گذراند. اگر سیمی مسی بین دو گیره قرار گیرد چه رخ می‌دهد؟

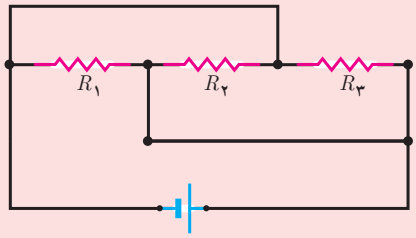


پاسخ : با اتصال قطعهٔ مسی، مقاومت در این شاجه نسبت به شاخهٔ لامپ که به‌طور موازی با آن بسته شده است مقدار کمتری می‌شود و بنابراین جریان عبوری از این شاخه نسبت به شاخهٔ لامپ بسیار بیشتر شده و لامپ خاموش می‌گردد.

۲ مقاومت معادل مدارهای زیر چقدر است؟ (مقاومت‌ها برابرند).



(ب)



(الف)

پاسخ : الف) $\frac{R}{۳}$ ب) $۹R/۴$

۳ ریسه‌ای که برای تزیین به کار رفته شامل چند لامپ کوچک است که به طور متوالی بسته شده‌اند و هر یک با ولتاژ ۶ یا ۸ ولت کار می‌کند. اگر ریسه با ولتاژ ۲۲۰V تغذیه شود چند لامپ ۶V یا ۸V باید اختیار کرد؟ اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد آیا ریسه روشن می‌ماند؟ برای ترمیم باید چه کار کرد؟ چرا می‌گویند در صورتی که ۳ یا ۴ لامپ ریسه بسوزد، ریسه دیگر قابل استفاده نیست؟

پاسخ : ۳۷ لامپ ۶V، ۲۸ لامپ ۸V. بدیهی است که با سوختن یک لامپ، بقیهٔ لامپ‌ها هم خاموش می‌شوند. با اتصال دو سر آزاد سیم‌های متصل به لامپ سوخته مشکل حل می‌شود. اگر چند لامپ بسوزد، مقاومت بقیهٔ لامپ‌ها چنان کم می‌شود که جریان زیادی از آنها می‌گذرد و بقیهٔ لامپ‌ها به‌زودی خاموش می‌شود.

۵ چرا پس از به کار انداختن بعضی از وسایل که جریان زیادی مصرف می‌کنند (مثل اتو) نور لامپ‌های روشن منزل ناگهان کاهش می‌یابد؟ البته کاهش روشنایی در لحظهٔ اول محسوس است و سپس روشنایی قدری افزایش می‌یابد، گرچه همچنان کمتر از قبل است.

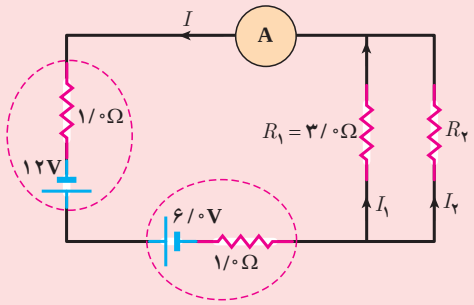
پاسخ : با به کار افتادن وسایل پرمصرف، جریان در مدار و سیم‌های رابط زیاد می‌شود و در نتیجه افت پتانسیل بالا می‌رود و این به کاهش متناظر در ولتاژ وسایل می‌انجامد که به طور موازی بسته شده‌اند. روشنایی لامپ‌ها به‌تدریج افزایش می‌یابد، زیرا مقاومت اتو با افزایش دمای آن زیاد می‌شود و در نتیجه افت پتانسیل ناشی از راه افتادن اتو کم می‌گردد.

۶ برای اینکه از رسانایی به مقاومت $R = ۱۰۰\Omega$، مقاومتی برابر $R = ۱\Omega$ به دست آید، چه تعداد بخش مساوی باید از آن بریده و به‌صورت موازی بسته شود؟

پاسخ : اگر رسانا به n بخش مساوی بریده شود، مقاومت r هر بخش برابر R/n می‌شود. مقاومت معادل n رسانای موازی به مقاومت r برابر $R_{eq} = r/n$ است. بنابراین $R_{eq} = R/n^۲$ می‌شود و از انجا برای این مسئله $n = \sqrt{۱۰۰} = ۱۰$ به‌دست می‌آید.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ جریانی که آمپرسنج مدار شکل زیر نشان می‌دهد برابر $۲/۰\ A$ است. الف) مقاومت $R_۲$ و ب) توان مصرفی هر یک از دو مقاومت را تعیین کنید.



الف) برای محاسبهٔ مقاومت $R_۲$، برای مدار معادل شکل، معادلهٔ اختلاف پتانسیل‌ها را می‌نویسیم. اگر مقاومت معادل مقاومت‌های $R_۱$ و $R_۲$ با $R_{۱۲}$ نمایش دهیم، با حرکت پادساعتگرد خواهیم داشت :

$$-I(۱/۰\Omega) + ۱۲V - ۶/۰V - I(۱/۰\Omega) - IR_{۱۲} = ۰$$

که در آن I همان جریانی است که آمپرسنج نشان می‌دهد ($I = ۲/۰\ A$). در نتیجه برای $R_{۱۲}$ خواهیم داشت :

$$R_{۱۲} = \frac{-(۲/۰A)(۱/۰\Omega) + ۱۲V - ۶/۰V - (۲/۰A)(۱/۰\Omega)}{۲/۰A} = ۱/۰\ \Omega$$

مقاومت $R_{۱۲}$، مقاومت معادل مقاومت‌های موازی $R_۱$ و $R_۲$ است. بنابراین

$$\frac{۱}{R_{۱۲}}=\frac{۱}{R_۱}+\frac{۱}{R_۲}$$

و در نتیجه :

$$\frac{۱}{R_۲}=\frac{۱}{R_{۱۲}}+\frac{۱}{R_۱}$$

$$\frac{۱}{R_۲}=\frac{۱}{۱/۰\Omega}=\frac{۱}{۳/۰\Omega}=\frac{۲}{۳}\Omega^{-۱}$$

در نتیجه $R_۲=\frac{۳}{۲}=۱/۵\Omega$.

ب) برای محاسبهٔ توان مصرفی از رابطهٔ $P_{\text{مصرفی}}=I^۲R$ استفاده می‌کنیم. به این منظور باید جریان عبوری از مقاومت‌ها $R_۱$ و $R_۲$ را بشناسیم. چون پتانسیل‌های دو سر این مقاومت‌ها یکسان است، داریم :

$$V_۱=V_۲\Rightarrow(۳/۰\Omega)I_۱=(۱/۵\Omega)I_۲$$

و از طرفی از قانون انشعاب جریان‌ها داریم :

$$I=I_۱+I_۲=۲/۰\text{A}$$

اکنون از حل هم‌زمان معادله‌های (۱) و (۲)، جریان $I_۱$ و $I_۲$ را به‌دست می‌آوریم :

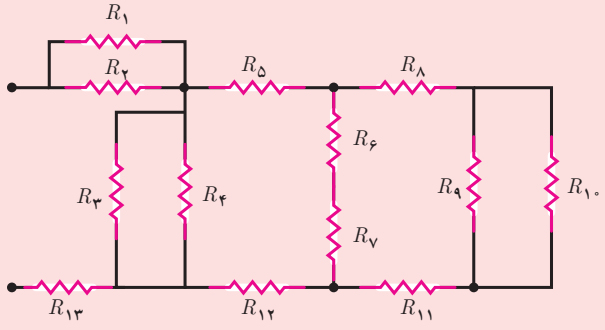
$$I_۱+۲I_۱=۲$$

و از آنجا $I_۱=\frac{۲}{۳}\text{A}$ ، $I_۲=\frac{۴}{۳}\text{A}$ می‌شود. حال توان مصرفی را محاسبه می‌کنیم :

$$P_۱=I_۱^۲R_۱=(\frac{۲}{۳})^۲(۳)=\frac{۴}{۳}\approx۱/۳\,\text{W}$$

$$P_۲=I_۲^۲R_۲=(\frac{۴}{۳})^۲(\frac{۳}{۲})=\frac{۸}{۳}\approx۲/۶\,\text{W}$$

۲ مقاومت معادل مدار شکل زیر را به‌دست آورید.



$R_۱=R_۲=۱/۸\,\Omega$, $R_۳=۱/۰\Omega$

$R_۴=۳/۰\Omega$, $R_۵=۱/۰\Omega$

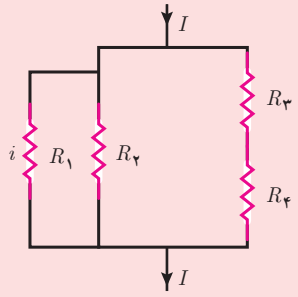
$R_۶=۱/۲\Omega$, $R_۷=۰/۸۰\Omega$

$R_۸=۱/۲\Omega$, $R_۹=R_{۱۰}=۳/۰\Omega$

$R_{۱۱}=R_{۱۲}=۰/۳۰\Omega$, $R_{۱۳}=۰/۷۰\Omega$

پاسخ : $۲/۱۸\,\Omega\approx۲/۲\,\Omega$.

۳ شکل زیر بخشی از مداری را نشان می‌دهد که جریان عبوری از آن $I = ۶/۰۰\ \text{A}$ است. مقاومت‌ها عبارت‌اند از : $R_۱ = R_۲ = ۲/۰۰\ \Omega$ $R_۳ = ۲/۰۰\ \Omega$ $R_۴ = ۴/۰۰\ \Omega$. جریان $i_۱$ عبوری از مقاومت $R_۱$ چقدر است؟



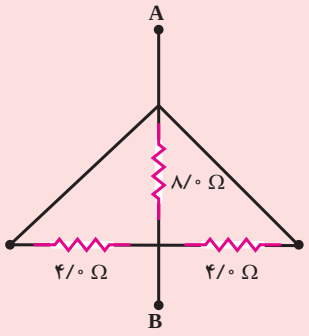
پاسخ : مقاومت معادل جفت مقاومت‌های متوالی $R_۳ = R_۴ = ۲/۰۰\ \Omega$ برابر $R_{۳۴} = ۴/۰۰\ \Omega$ است. مقاومت معادل جفت مقاومت‌های موازی $R_۱ = R_۲ = ۴/۰۰\ \Omega$ برابر $R_{۱۲} = ۲/۰۰\ \Omega$ است. چون ولتاژ دو سر $R_{۳۴}$ باید برابر ولتاژ دو سر $R_{۱۲}$ باشد داریم :

$$V_{۳۴} = V_{۱۲} \Rightarrow i_{۳۴}R_{۳۴} = i_{۱۲}R_{۱۲}$$

در نتیجه $i_{۳۴} = \frac{۱}{۲} i_{۱۲}$ می‌شود. از طرفی، طبق قاعدهٔ انشعاب $I = i_{۱۲} + i_{۳۴} = ۶/۰۰\ \text{A}$ است. این رابطه همراه رابطهٔ قبلی به $i_{۱۲}=۴/۰۰\ \Omega$ می‌انجامد. از روی تقارن بدیهی است :

$$i_۱ = i_{۱۲}/۲ = ۲/۰۰\ \text{A}$$

۴ مقاومت معادل بین پایانه‌های A و B را در شکل زیر به‌دست آورید.



پاسخ : همان‌طور که در شکل می‌بینیم دو سر مقاومت $۸/۰\ \Omega$ به دو سر مقاومت‌های ۴/۰ اُهمی بسته شده است. بنابراین مقاومت $۸/۰\ \Omega$ با مقاومت‌های $۴/۰\ \Omega$ موازی است.

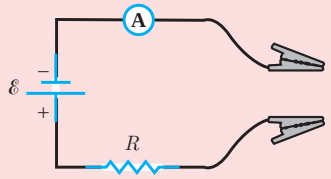
$$R_{\text{eq}} = \frac{۱}{R_۱} + \frac{۱}{R_۲} + \frac{۱}{R_۳} = \frac{۱}{۸/۰\ \Omega} + \frac{۱}{۴/۰\ \Omega} + \frac{۱}{۴/۰\ \Omega}$$

و از آنجا $R_{\text{eq}} = ۱/۶\ \Omega$ به‌دست می‌آید.

فعالیت‌های پیشنهادی

اهم‌سنج بسازیم

مطابق شکل می‌توانیم با یک باتری ۱/۵ ولت و آمپرسنجی که می‌تواند از صفر تا ۱/۰mA را بخواند، اهم‌سنج ساده‌ای بسازیم. مقاومت R طوری تنظیم می‌شود که هرگاه گیره‌ها به هم وصل شوند، آمپرسنج حداکثر انحراف خود را داشته باشد. اندازهٔ مقاومت خارجی بین گیره‌ها قرار می‌گیرد چقدر باشد تا انحراف عقربه الف) ۱۰٪ ب) ۵۰٪ پ) ۹۰٪ تمام مقیاس باشد؟ ت) اگر مقاومت آمپرسنج ۲۰Ω و مقاومت درونی باتری ناچیز باشد، مقدار R را تعیین کنید.



پاسخ :

الف) ابتدا با معلوم بودن جریان و نیروی محرکهٔ باتری، مقاومت کلّ مدار را حساب می‌کنیم :

$$I = ۱/۰ \times ۱۰^{-۲}\,A \quad , \quad \mathscr{E} = ۱/۵\,V \quad , \quad R_T = ?$$

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_T} \Rightarrow R_T = \frac{۱/۵V}{۱/۰\times۱۰^{-۳}\,A} = ۱/۵\,k\Omega$$

در قسمت‌های بعدی هر بار که مقاومتی بین گیره‌ها قرار گیرد با مقاومت کل مدار به‌طور متوالی خواهد شد و جریان‌های عبوری داده شده‌اند :

$$I_۱ = ٪۱۰ I = ۱/۰ \times ۱۰^{-۴}\,A \quad \text{و} \quad I = \frac{\mathscr{E}}{R_T + R_{ext}} \Rightarrow ۱/۰\times۱۰^{-۳} = \frac{۱/۵}{(۱۵۰۰ + R_{ext})}$$

$$\Rightarrow R_{ext} = ۱۳۵۰\Omega \approx ۱/۳\,k\Omega$$

$$I_۲ = ٪۵۰ I = ۵/۰ \times ۱۰^{-۴}\,A \qquad ۵/۰\times۱۰^{-۳} = \frac{۱/۵}{(۱۵۰۰ + R_{ext})}$$

$$\Rightarrow R_{ext} = ۱۵۰۰\Omega = ۱/۵\,k\Omega$$

$$I_۳ = ٪۹۰ I = ۹/۰ \times ۱۰^{-۴}\,A \qquad ۹/۰\times۱۰^{-۳} = \frac{۱/۵}{(۱۵۰۰ + R_{ext})}$$

$$\Rightarrow R_{ext} = ۱۶۷\,\Omega \approx ۱/۷ \times ۱۰^{۲}\Omega$$

ت) به این ترتیب مقاومت کل مدار در حالتی که بین گیره‌ها هیچ مقاومتی نباشد شامل مقاومت آمپرسنج و R است که متوالی بسته شده‌اند :

$$R_{eq} = R + R_A$$

$$۱۵۰۰\Omega = R + ۲۰\Omega \Rightarrow R = ۱۴۸۰\Omega$$

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۱ پاسخ درست، شکل (پ) است. فقط شکل (پ) است که مسیری را برای جریان ایجاد می‌کند. یک باتری، منبع انرژی‌ای نیست که مثلاً یک محل مورد نیاز انرژی را پرکند.

۲ با استفاده از رابطهٔ $R = V/I$، جریان عبوری از لامپ را به‌دست می‌آوریم :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{۴/۰\text{V}}{۵/۰\Omega} = ۰/۸۰\text{A}$$

در مدت ۵ دقیقه، باری که از مدار می‌گذرد برابر است با

$$\Delta q = I(\Delta t) = (۰/۸۰\text{A})(۵\times۶۰\text{s}) = ۲۴۰\text{C} = ۲/۴\times۱۰^{۲}\text{C}$$

از آنجایی که $q = ne$ و $e = ۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹}\text{C}$ است، تعداد الکترون عبوری از لامپ چنین می‌شود :

$$n = \frac{\Delta q}{e} = \frac{۲/۴\times۱۰^{۲}\text{C}}{۱/۶۰\times۱۰^{-۱۹}\text{C}} = ۱/۵\times۱۰^{۲۱} \text{ الکترون}$$

۳ همان‌طور که در شکل مشخص است، در وضعیت شکل (الف) جریان از طریق بدن عبور می‌کند و در صورتی که شخص به طریقی به زمین متصل باشد دچار شوک و احتمالاً برق‌گرفتگی می‌شود. درحالی که در وضعیت شکل (ب)، جریان از طریق سیم اتصال زمین (که معمولاً به لوله آب سرد متصل است)، به زمین می‌رود. به عبارتی، علاوه بر سیم‌های موسوم به فاز و نول، سیم متصل به زمینی نیز وجود دارد. بنابراین در وضعیت شکل (ب) برخلاف شکل (الف) دچار شوک و احتمالاً برق‌گرفتگی نمی شویم، زیرا سیم اتصال به زمین یک مسیر کم‌مقاومت بین سطح خارجی وسیله و زمین را ایجاد می‌کند.

۴ (الف) از رابطهٔ $\Delta U = q\,\Delta V$ داریم :

$$q = \frac{\Delta U}{\Delta V} = \frac{۱/۰\times۱۰^{۹}\text{J}}{۵/۰\times۱۰^{۷}\text{V}} = ۲۰\text{C}$$

ب) اکنون با استفاده از رابطهٔ $I = \Delta q/\Delta t$، جریان را می‌یابیم

$$I = \frac{۲۰\text{C}}{۰/۲۰\text{s}} = ۱۰۰\text{A} = ۱/۰\times۱۰^{۲}\text{A}$$

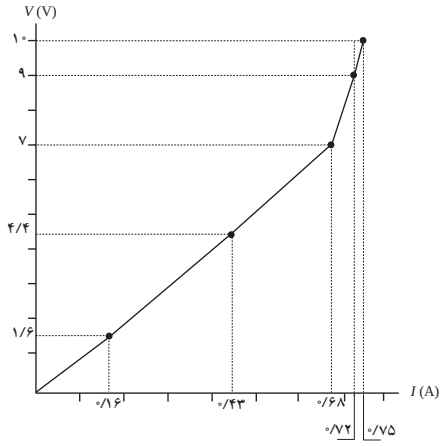
پ) با توجه به اینکه $P = U/t$ است، برای توان الکتریکی آزاده شده داریم :

$$P = \frac{۱/۰\times۱۰^{۹}\text{J}}{۰/۲۰\text{s}} = ۵/۰\times۱۰^{۹}\text{W} = ۵/۰\text{GW}$$

همچنین می‌توانستیم از رابطهٔ $P = I\Delta V$ استفاده کنیم :

$$P = I\Delta V = (۱۰۰\text{A})(۵/۰\times۱۰^{۷}\text{V}) = ۵/۰\text{GW}$$

۵ در رسم نمودارها، به دانش‌آموزان گوشزد کنید که نباید لزوماً محورهای افقی و قائم، به یک مقیاس باشند و بسته به داده‌های هر محور، بازه‌های موردنظر را برای آن محور رسم کنید. در هرحال، به نموداری مشابه نمودار زیر می‌رسیم :



همان‌طور که می‌بینیم تا انتهای بازهٔ سوم تقریباً از قانون اهم پیروی می‌کند و از آن به بعد خیر.

۶ به نسبت I/V، رسانندگی الکتریکی می‌گویند که وارون مقاومت الکتریکی است. اگر در ولتاژ یکسان (با رسم خطی عمودی) به جریان رساناهای A و B نگاه کنیم، درمی‌یابیم که جریان رسانای B بیشتر است. بنابراین نسبت I/V برای رسانای B بزرگ‌تر است. به‌عبارتی، رسانندگی B بیشتر از A و مقاومت الکتریکی آن کمتر از A است.

۷ مقاومت رسانا با استفاده از رابطه $R=\rho L/A$ به‌دست می‌آید. اگر شعاع مقطع را با r (و قطر را با d) مشخص کنیم، داریم :

$$R_A=\rho\frac{L}{\pi r_A^2}=\rho\frac{L}{\pi d_A^2/4}=\rho\frac{4\rho L}{\pi d_A^2}=\frac{4\rho L}{\pi(1/0\,\text{mm})^2}$$

و

$$R_B=\rho\frac{L}{\pi\Delta r_B^2}=\frac{\rho L}{\pi\left[(2/0\,\text{mm})^2-(1/0\,\text{mm})^2\right]}=\frac{\rho L}{\pi(3/0\,\text{mm}^2)}$$

و از آنجا

$$\frac{R_A}{R_B}=\frac{4\rho L}{\rho L/3}=12$$

۸ با استفاده از رابطهٔ $R=\rho L/A$ مسئله را حل می‌کنیم. همچنین برای مساحت مقطع A داریم $A=\pi d^2/4$ که d قطر سیم است.

الف) نخست مساحت مقطع A را محاسبه کنیم :

$$A=\pi d^{۲}/۴=\pi(۸\times۱۰^{-۴}\,\mathrm{m})^{۲}/۴=۵/۰۳\times۱۰^{-۷}\,\mathrm{m}^{۲}$$

و در نتیجه

$$R=\rho\frac{L}{A}=(۱/۷\times۱۰^{-۸}\,\Omega.\mathrm{m})\frac{۳۰\,\mathrm{m}}{۵/۰۳\times۱۰^{-۷}\,\mathrm{m}^{۲}}=۱/۰\,\Omega$$

که با توجه به اینکه قطر با یک رقم بامعنا داده شده است باید پاسخ به‌صورت $۱\,\Omega$ بیان شود.

ب) اکنون مساحت مقطع A چنین می‌شود :

$$A=\pi d^{۲}/۴=\pi(۱۳\times۱۰^{-۴}\,\mathrm{m})^{۲}/۴=۱/۳۲۷\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{m}^{۲}$$

و در نتیجه

$$R=\rho L/A=(۱/۶۹\times۱۰^{-۸}\,\Omega.\mathrm{m})\frac{(۷۰\,\mathrm{m})}{۱/۳۲۷\times۱۰^{-۶}\,\mathrm{m}^{۲}}=۰/۹۰\,\Omega$$

۹ نخست رابطهٔ $R=R_{۰}(۱+\alpha\Delta T)$ را اثبات می‌کنیم. این رابطه در متن درس بدون اثبات آمده است. از رابطه $R=\rho L/A$ داریم :

$$\frac{R}{R_{۰}}=\frac{\rho L/A}{\rho_{۰}L/A}=\frac{\rho}{\rho_{۰}}=۱+\alpha\Delta T$$

از آنجا برای $R_{۰}$ داریم :

$$R_{۰}=\frac{R}{۱+\alpha\Delta T}=\frac{۴۴\,\Omega}{۱+(۴/۰\times۱۰^{-۴}\,\mathrm{C}^{-۱})(۱۱۸۰^{\circ}\mathrm{C})}$$

$$=۲۹/۹۸\,\Omega\approx۳۰\,\Omega$$

که در آن برای ضریب دمایی مقاومت ویژه نیکروم از جدول ۲ــ۲ استفاده کردیم.

۱۰ گلوله‌ها از ارتفاع مثلاً h بالای کف شروع به حرکت می‌کنند و آنها تحت تأثیر نیروی گرانشی، در فاصلهٔ بین برخورد با میخ‌ها شتاب می‌گیرند. میخ‌ها مشابه یون‌های شبکهٔ اتمی هستند. در حین برخوردها، گلوله‌ها انرژی جنبشی به‌دست آمده در بین برخوردها را به میخ‌ها منتقل می‌کنند. چون برخوردها خیلی زیادند، گلوله‌ها یک سرعت سوق کوچک و نسبتاً ثابتی خواهند داشت. وقتی گلوله‌ها به پایین می‌رسند، یکی مانند شکل سمت راست، آنها را تا ارتفاع اولیه بالا می‌آورد. بالا آوردن هر گلوله، مشابه همان کاری است که یک منبع emf در مداری الکتریکی انجام می‌دهد.

۱۱ آنچه برای روشن شدن خودرو و استارت خوردن آن لازم است، جریان است که البته باید مقدار زیادی هم باشد. باتری‌های قلمی، مقاومت داخلی زیادی دارند و بنابراین این مانع از برقراری جریان لازم می‌شود. به عبارت دیگر، با اینکه نیروی محرکهٔ مجموعهٔ باتری‌ها همان ۱۲V است، ولی به دلیل افزایش مقاومت داخلی، جریان عبوری کاهش می‌یابد و نمی‌تواند جریان بزرگ لازم برای استارت خوردن خودرو را تأمین کند.

۱۲ در هنگام اتصال مقاومت به باتری داریم :

$$\mathscr{E} - Ir - IR = ۰$$

بنابه فرض $\mathscr{E} - Ir = ۱۰/۹\,V$ است. از اینجا، با توجه به اینکه R را داریم، جریان عبوری I را به‌دست می‌آوریم :

$$۱۰/۹\text{V} - I(۱۰/۰\Omega) = ۰$$

و در نتیجه :

$$I = ۱/۰۹\text{A}$$

حال با توجه به اینکه $\mathscr{E} = ۱۲/۰\text{V}$ است، داریم

$$(۱۲/۰\text{V})(۱/۹\text{A}) - (۱/۰۹\text{A})(۱۰/۰\Omega) = ۰$$

از اینجا r چنین می‌شود :

$$r = \frac{۱۲/۰\text{V}}{۱/۰۹\text{V}} - ۱۰/۰\Omega = ۱/۰\Omega$$

۱۳ حلقه را به طور پادساعتگرد از نقطهٔ A می‌پیماییم و جریان را نیز به‌طور پادساعتگرد درنظر می‌گیریم (اگر این فرض نادرست باشد، علامت I منفی به‌دست می‌آید) :

$$V_A - IR_۱ + \mathscr{E}_۱ - Ir_۱ - IR_۴ - IR_۳ - Ir_۳ - \mathscr{E}_۳ - IR_۲ - \mathscr{E}_۲ = V_A$$

$$\Rightarrow -I(R_۱ + r_۱ + R_۴ + R_۳ + r_۳ + R_۲) + \mathscr{E}_۱ - \mathscr{E}_۲ - \mathscr{E}_۳ = ۰$$

و در نتیجه :

$$I = \frac{\mathscr{E}_۱ - \mathscr{E}_۲ - \mathscr{E}_۳}{R_۱ + r_۱ + R_۴ + R_۳ + r_۳ + R_۲}$$

$$= \frac{۱۴\text{V} - ۲/۰\text{V} - ۴/۰\text{V}}{۴/۰\Omega + ۱/۰\Omega + ۲/۰\Omega + ۱/۵\Omega + ۰/۵۰\Omega + ۳/۰\Omega} \approx ۰/۶۷\text{A}$$

اکنون برای محاسبهٔ اختلاف پتانسیل $V_B - V_A$، از A به سمت B حرکت می‌کنیم. اگر از شاخهٔ بالایی حرکت کنیم، داریم :

$$V_A + \mathscr{E}_۲ + IR_۲ + \mathscr{E}_۳ + Ir_۲ = V_B$$

و از آنجا

$$V_B - V_A = \mathscr{E}_۲ + \mathscr{E}_۳ + I(R_۲ + r_۳)$$
$$= ۲/۰\,\mathrm{V} + ۴/۰\,\mathrm{V} + (۰/۶۷\,\mathrm{A})(۳/۰\,\Omega + ۰/۵\,\Omega) \approx ۸/۳\,\mathrm{V}$$

خوب است همین نتیجه را با پیمودن مسیر شاخهٔ پایینی نیز وارسی کنیم :

$$V_A - IR_۱ + \mathscr{E}_۱ - Ir_۱ - IR_۴ - IR_۳ = V_B$$

و از آنجا

$$V_B - V_A = -I(R_۱ + r_۱ + R_۴ + R_۳) + \mathscr{E}_۱$$
$$= -(۰/۶۷\,\mathrm{A})\,(۴/۰\,\Omega + ۱/۰\,\Omega + ۲/۰\,\Omega + ۱/۵\,\Omega) + ۱۴\,\mathrm{V} = ۸/۳\,\mathrm{V}$$

۱۴ به این منظور، نخست جریان را در مدار به‌دست می‌آوریم. با حرکت ساعتگرد از نقطهٔ A و بازگشت به آن (بادرنظر گرفتن جریان به‌طور ساعتگرد) خواهیم داشت :

$$V_A + \mathscr{E}_۱ - Ir_۱ - IR - Ir_۲ - \mathscr{E}_۲ = V_A$$

در نتیجه جریان I چنین می‌شود :

$$I = \frac{\mathscr{E}_۱ + \mathscr{E}_۲}{r_۱ + r_۲ + R} = \frac{۶/۰\,\mathrm{V} - ۳/۰\,\mathrm{V}}{۰/۵\,\Omega + ۱/۰\,\Omega + ۱/۵\,\Omega} = ۱/۰\,\mathrm{A}$$

بنابراین، جهت جریان، واقعاً ساعتگرد است.

اکنون اگر سرِ سمت راست منبع ۱ را B و سر سمت راست منبع ۲ را E (نقطهٔ زمین) بنامیم، برای منبع ۱ داریم :

$$V_A + \mathscr{E}_۱ - Ir_۱ = V_B \Rightarrow V_B - A_A = \mathscr{E}_۱ - Ir_۱$$

و در نتیجه

$$V_B - V_A = ۶/۰\,\mathrm{V} - (۱/۰\,\mathrm{A})\,(۰/۵\,\Omega) = ۵/۵\,\mathrm{V}$$

و برای منبع ۲

$$V_A + \mathscr{E}_۲ + r_۲I = V_E \Rightarrow V_E - V_A = \mathscr{E}_۲ + Ir_۲$$

و در نتیجه

$$V_E + V_A = ۳/۰\,\mathrm{V} + (۱/۰\,\mathrm{A})\,(۱/۰\,\Omega) = ۴/۰\,\mathrm{V}$$

ب) برای محاسبهٔ V_A ، معادلهٔ اختلاف پتانسیل‌ها را بین نقطه‌های A و E (زمین) می‌نویسیم :

$$V_A + \mathscr{E}_۱ - Ir_۱ - IR = V_E = ۰$$

در نتیجه

$$V_A = -I\,(r_۱ - R) - \mathscr{E}_۱ = (۱/۰\,\mathrm{A})(۰/۵\,\Omega + ۱/۵\,\Omega) = -۴/۰\,\mathrm{V}$$

خوب است از مسیر شاخه پایین هم، همین موضوع را بررسی کنیم :

$$V_A + \mathscr{E}_۲ + Ir_۲ = V_E = ۰$$

و در نتیجه

$$V_A = -\mathscr{E}_۲ - Ir_۲ = -۳/۰\,\mathrm{V} - (۱/۰\,\mathrm{A})(۱/۰\,\Omega) = -۴/۰\,\mathrm{V}$$

۱۵ لامپ B پرنورتر خواهد بود. با توجه به اینکه ولتاژ هر دو لامپ یکسان است. توان مصرفی در هر لامپ با توجه به رابطهٔ $P_{\text{مصرفی}} = |VI|$ فقط به جریان عبوری از آن بستگی دارد. رشته (فیلامان) ضخیم‌تر، با توجه به رابطهٔ $R = \rho\frac{L}{A}$ ، مقاومت کمتری در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهد. بنابراین، لامپ B که رشتهٔ آن ضخیم‌تر است، دارای رشته‌ای با مقاومت کمتر است و جریان بیشتری از آن می‌گذرد و در نتیجه انرژی مصرفی آن در واحد زمان بیشتر و روشن‌تر خواهد بود.

۱۶ الف) از رابطهٔ $P_{\text{مصرفی}} = |VI|$ برای توان مصرفی استفاده می‌کنیم.

برای اتو داریم $P = ۸۵۰\,\text{W}$ و $V = ۲۲۰\,\text{V}$ ، و در نتیجه

$$|I| = \frac{P}{|V|} = \frac{۸۵۰\,\text{W}}{۲۲۰\,\text{V}} = ۳/۸۶\,\text{A}$$

و برای کتری $P = ۲۴۰۰\,\text{W}$ و $V = ۲۲۰\,\text{V}$ داده شده است و در نتیجه

$$|I| = \frac{P}{|V|} = \frac{۲۴۰۰\,\text{W}}{۲۲۰\,\text{V}} = ۱۰/۹\,\text{A}$$

ب) می‌توانیم از رابطه‌های $P = I^۲R$ و $P = V^۲/R$ استفاده کنیم. چون مقادیر جریان را گرد کرده‌ایم، بهتر است از رابطهٔ $P = V^۲/R$ استفاده کنیم. به ترتیب برای اتو و کتری داریم :

$$R_{\text{اتو}} = \frac{V^۲}{P} = \frac{(۲۲۰\,\text{V})^۲}{۸۵۰\,\text{W}} = ۵۶/۹\,\Omega$$

$$R_{\text{کتری}} = \frac{V^۲}{P} = \frac{(۲۲۰\,\text{V})^۲}{۲۴۰۰\,\text{V}} = ۲۰/۲\,\Omega$$

۱۷ با استفاده از رابطهٔ $R = R_۰[۱+\alpha(T-T_۰)]$ ، دمای T را محاسبه می‌کنیم :

$$T = T_۰ + \frac{R - R_۰}{\alpha R_۰}$$

در این رابطه به‌جای R از رابطهٔ $R = V/I$ ، قرار می‌دهیم :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{۲/۹\,\text{V}}{۰/۳۰\,\text{A}} = ۹/۶۷\,\Omega \approx ۹/۷\,\Omega$$

حال با توجه به اینکه $R_۰ = ۱/۱\,\Omega$ و $T_۰ = ۲۰\,^\circ\text{C}$ و ضریب دمایی مقاومت ویژهٔ تنگستن برابر $۴/۵ \times ۱۰^{-۳}\,^\circ\text{C}^{-۱}$ است، برای دمای رشتهٔ لامپ خواهیم داشت :

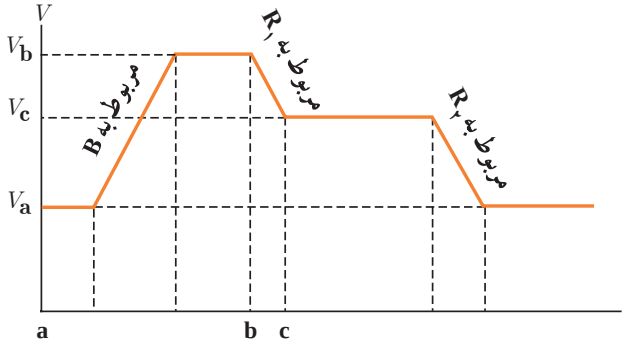
$$T = ۲۰\,^\circ\text{C} + \frac{۹/۶۷\,\Omega - ۱/۱\,\Omega}{(۴/۵\times۱۰^{-۳}\,^\circ\text{C}^{-۱})(۱/۱\,\Omega)} = ۱/۷۵\times۱۰^{۳}\,^\circ\text{C} \approx ۱/۸\times۱۰^{۳}\,^\circ\text{C}$$

که معادل مقدار قابل توجه $۱۸۰۰\,^\circ\text{C}$ است.

۱۸ الف) چون جریان به‌طور پادساعتگرد حرکت می‌کند، قطب منفی، پایانهٔ سمت چپ و قطب مثبت، پایانهٔ سمت راست جعبهٔ B است. به‌عبارتی، نیروی محرکهٔ الکتریکی که آن را در بسیاری از کتاب‌ها با پیکانه‌ای مشخص می‌کنند، از سمت چپ به سمت راست خواهد بود.

ب) بدیهی است جریان در نقطه‌های a ، b و c یکسان است.

پ) می‌دانیم اگر از مقاومت R هم‌سو با جریان I عبور کنیم، پتانسیل به اندازهٔ IR کم می‌شود. در عبور از مقاومت R_1 درمی‌یابیم $V_c < V_b$ و در عبور از مقاومت R_2 درمی‌یابیم $V_a < V_c$ است و بنابراین $V_a < V_b < V_c$. به عبارتی اگر این مدار را باز کنیم و آن را برروی خط راستی نشان دهیم، نمودار شکل خواهد شد :



ت) با توجه به رابطهٔ $U = qV$ و مثبت بودن بار q، انرژی پتانسیل الکتریکی متناسب با پتانسیل الکتریکی است. بنابراین داریم :

$$U_b > U_c > U_a$$

۱۹ الف) از رابطهٔ $U = Pt$ استفاده می‌کنیم. توان‌های مصرفی، بستگی به نوع لامپ یا تلویزیون دارد. لامپ‌های رشته‌ای قدیمی معمولاً ۱۰۰W هستند، درحالی که لامپ‌های کم‌مصرف توان مصرفی کمتری دارند. همچنین تلویزیون‌های لامپی قدیمی توان مصرفی بیشتری از تلویزیون‌های جدید دارند. برای همین، در این‌جا صرفاً برای یک لامپ ۱۰۰W مسئله را حل می‌کنیم تا روش حل چنین مسائلی را دریابید. (در این حل فرض کرده‌ایم ۸ ساعت که در صورت مسئله آمده، دقیق و بدون خطاست.)

$$U = Pt = (۱۰۰\text{W})\,(۳۰\ \text{روز})\left(۸\ \frac{\text{ساعت}}{\text{روز}}\right)$$

$$= ۲۴۰۰۰\text{Wh} = ۲۴\text{kWh}$$

ب) بهای برق مصرفی چنین می‌شود :

$$\text{بها} = (۲۴\text{kWh})\left(۵۰\ \frac{\text{تومان}}{\text{kWh}}\right) = ۱۲۰۰\ \text{تومان}$$

پ) در اینجا باید تعداد خانه‌های شهر خود را تخمین بزنید. مثلاً در سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت تهران حدود ۱۲ میلیون و پانصدهزار نفر به‌دست آمد. حال اگر فرض کنیم هر خانوار تهرانی به‌طور متوسط جمعیتی برابر ۵ نفر داشته باشد، می‌توانیم تعداد خانه‌های شهر تهران را حدود ۲ میلیون و پانصد هزار به‌دست آوریم. بنابراین خواهیم داشت :

$$U=(۱۰۰\text{W})(۳۰\text{ روز})\left(۳\frac{\text{ساعت}}{\text{روز}}\right)(۲/۵\times۱۰^{۶})$$

$$=۲/۲۵\times۱۰^{۱۰}\text{Wh}=۲/۲۵\times۱۰^{۷}\text{kWh}$$

۲۰ الف) ولتاژ دو سر منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی از رابطهٔ $\Delta V=\mathscr{E}-Ir$ به‌دست می‌آید و از طرفی $\Delta V=P/I$ است. با برابر قرار دادن طرف‌های راست این دو معادله خواهیم داشت :

$$\mathscr{E}-Ir=P/I$$

در نتیجه می‌توانیم دستگاه معادلات زیر را تشکیل دهیم :

$$\begin{cases}\mathscr{E}-I_۱r=P_۱/I_۱\\ \mathscr{E}-I_۲r=P_۲/I_۲\end{cases}$$

از آنجا مقاومت داخلی r را به‌دست می‌آوریم :

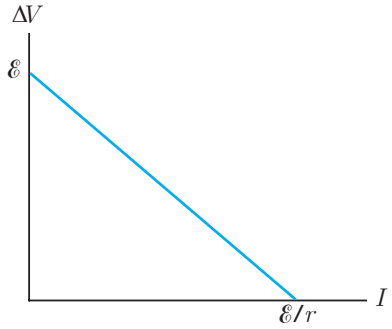
$$r=\frac{P_۱/I_۱-P_۲/I_۲}{I_۲-I_۱}=\frac{\frac{۹/۵۰\text{W}}{۵/۰۰\text{A}}-\frac{۱۲/۶\text{W}}{۷/۰۰\text{A}}}{۷/۰۰\text{A}-۵/۰۰\text{A}}=۵/۰۰\times۱۰^{-۲}\Omega$$

و اکنون با دانستن r، نیروی محرکهٔ الکتریکی منبع، چنین می‌شود :

$$\mathscr{E}=I_۱r+\frac{P_۱}{I_۱}$$

$$=(۵/۰۰\text{A})(۵/۰۰\times۱۰^{-۲}\Omega)+\frac{۹/۵۰\text{W}}{۵/۰۰\text{A}}=۲/۱۵\text{V}$$

ب) به این پرسش، بیشتر در فعالیت ۲ـ۶ نیز پرداختیم. اختلاف پتانسیل دوسر منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی از رابطهٔ $\Delta V=\mathscr{E}-Ir$ به‌دست می‌آید. تا وقتی که جریانی از مدار عبور نکند، ولتاژ دوسر منبع برابر با نیروی محرکه است و هرچه جریان عبوری بیشتر شود، افق پتانسیل Ir نیز بیشتر و اختلاف پتانسیل دوسر منبع کوچک‌تر می‌شود. درهر حال، شکلی شبیه شکل زیر برای نمودار ΔV برحسب I خواهیم داشت. همان‌طور که در فعالیت ۲ـ۶ اشاره کردیم مقاومت داخلی منبع نیروی محرکه برابر با نسبت نیروی محرکه به جریان بیشینه می‌شود.

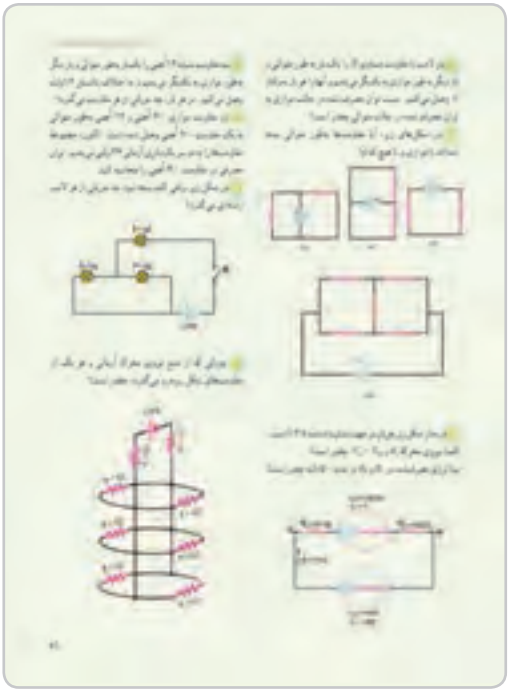


۲۱ وقتی لامپی می‌سوزد، به معنی آن است که اتصال در آن قسمت از مدار قطع می‌شود. اگر لامپ‌ها به‌طور متوالی بسته شده باشند، قطع مدار در هر قسمت از مدار موجب قطع جریان در کلّ مدار و خاموش شدن همهٔ لامپ‌ها می‌شود. به همین دلیل است که چراغ‌های خودرو به‌طور موازی بسته می شود تا با سوختن یک لامپ، همهٔ لامپ‌ها خاموش نشوند. البته این تنها دلیل نیست. اتصال موازی باعث می‌شود که بیشترین روشنایی حاصل شود. زیرا در اتصال موازی، اختلاف پتانسیل دوسر همهٔ لامپ‌ها یکسان است، درحالی که در اتصال متوالی، این اختلاف پتانسیل به نسبت مقاومت هر لامپ تقسیم می‌شود.

۲۲ آمپرسنج، جریان عبوری از خود را اندازه می‌گیرد. به همین دلیل، آن را با بخشی از مدار که می‌خواهیم جریان عبوری از آن را اندازه بگیریم به‌طور متوالی می‌بندیم. بنابراین، برای آن که با اضافه شدن آمپرسنج به مدار، مقاومت مدار تغییر قابل ملاحظه‌ای پیدا نکند تا بر جریان عبوری تأثیر بگذارد، مقاومت آمپرسنج باید کوچک باشد.

۲۳ مجموع جریان‌های ورودی برابر $۲A + ۲A+۳A+۴A = ۱۱A$ و مجموع جریان‌های خروجی برابر $۲A+۱A = ۳A$ است. بنابراین، بزرگی جریان I در سیم پایین برابر با $۱۱A - ۳A = ۸A$ و جهت آن به سمت راست است.

۲۴ هرچه کلیدهای بیشتری بسته شود، مقاومت‌های موازی بیشتر وارد مدار می‌شود. با افزایش تعداد شاخه‌های موازی، مقاومت مدار کم و در نتیجه جریان عبوری طبق رابطهٔ $I = \mathscr{E}/(R + r)$ زیاد می‌شود. از طرفی، طبق رابطهٔ $V = \mathscr{E} - Ir$ این امر موجب کاهش اختلاف پتانسیل می‌شود. پس نتیجه می‌گیریم با بسته شدن کلیدهای بیشتر، آمپرسنج عددی بزرگ‌تر و ولت‌سنج عددی کوچک‌تر را نشان می‌دهد.



۲۵ توان مصرفی را با استفاده از رابطهٔ $P_{\text{مصرفی}} = V^2/R$ به‌دست می‌آوریم. اکنون کافی است مقاومت معادل را در دو حالت متوالی و موازی مقایسه کنیم. در حالت متوالی $R'_{eq} = 2R$ و در حالت موازی $R_{eq} = R/2$ می‌شود. بنابراین داریم :

$$\frac{P_{\text{موازی}}}{P_{\text{متوالی}}} = \frac{V^2/R_{eq}}{V^2/R'_{eq}} = \frac{R'_{eq}}{R_{eq}} = \frac{3R}{R/2} = 4$$

۲۶ همان‌طور که در متن درس اشاره شده است، بستن متوالی به معنای بسته شدن مقاومت‌ها یکی پس از دیگری است، به طوری که هیچ انشعابی بین آنها وجود نداشته باشد، و بستن موازی به معنای آن است که یک سر مقاومت‌ها مستقیماً به یکدیگر و سر دیگر آنها نیز مستقیماً به هم وصل شده باشد و اختلاف پتانسیل یکسانی به دو سر این مقاومت‌ها اعمال شده است. با این تعاریف واضح است که در شکل الف مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند، درحالی که در شکل‌های ب و پ مقاومت‌ها به‌طور موازی بسته شده‌اند. همچنین اگر بررسی کنید هیچ کدام از این تعاریف برای شکل (ت) برقرار نیست و در این مدار، مقاومت‌ها نه متوالی هستند و نه موازی.

۲۷ الف) اگر حلقه را از نقطهٔ A به‌طور ساعتگرد دور بزنیم، خواهیم داشت :

$$V_A - IR_1 + \mathscr{E}_2 - Ir_2 - IR_2 - Ir_1 - \mathscr{E}_1 = V_A$$

از این‌جا $\mathscr{E}_2$ را محاسبه می‌کنیم :

$$\begin{aligned}\mathscr{E}_2 &= IR_1 + Ir_2 + IR_2 + Ir_1 + \mathscr{E}_1 \\ &= I(R_2 + r_2 + R_2 + r_1) + \mathscr{E}_1 \\ &= (1/2\text{A})\,(2/0\,\Omega + 0/5\,0\,\Omega + 1/5\Omega + 1/0\,\Omega) + 12\text{V} = 18\text{V}\end{aligned}$$

برای محاسبهٔ $V_A - V_B$ ، مسیر $A \to B$ را در شاخهٔ بالا در جهت جریان طی می‌کنیم :

$$V_A - IR_1 + \mathscr{E}_2 - Ir_2 - IR_2 = V_B$$

$$V_A - V_B = I(R_1 + r_2 + R_2) - \mathscr{E}_2$$

$$= (1/2\text{A})\,(2/0\,\Omega + 0/5\,0\,\Omega + 1/5\Omega) - 18\text{V} = -13/2\text{V}$$

خوب است همین نتیجه را با پیمودن شاخهٔ پایین نیز وارسی کنیم. در این‌صورت خواهیم داشت :

$$V_A + \mathscr{E}_1 + Ir_1 = V_B$$

و در نتیجه

$$V_A - V_B - \mathscr{E}_1 - Ir_1 = -12\text{V} - (1/2\text{A})\,(1/0\,\Omega) = -13/2\text{V}$$

ب) انرژی مصرف شده در هریک از مقاومت‌های R_2 و R_1 را می‌توانیم با استفاده از معادلهٔ ۲ــ۹ به‌دست آوریم. با توجه به اینکه $U = Pt$ است، داریم :

$$U = Pt = (RI^2)t$$

بنابراین

$$U_۱ = (R_۱)(I)^۲(t) = (۲/۰\Omega)(۱/۲\mathrm{A})^۲(۵/۰\mathrm{s}) = ۱۴/۴\mathrm{J} \approx ۱۴\mathrm{J}$$

$$U_۲ = (R_۲)(I)^۲(t) = (۱/۵\Omega)(۱/۲\mathrm{A})^۲(۵/۰\mathrm{s}) = ۱۰/۸\mathrm{J} \approx ۱۱\mathrm{J}$$

و مجموع این دو انرژی $U = U_۱ + U_۲ = ۲۵/۲\mathrm{J} \approx ۲۵\mathrm{J}$ می‌شود.

۲۸ در حالت متوالی جریان عبوری از همهٔ مقاومت‌ها یکسان است. از طرفی مقاومت معادل برابر است با

$$R_{eq} = ۳R_۱ = ۳(۱۲\Omega) = ۳۶\Omega$$

و در نتیجه جریان عبوری از همهٔ مقاومت‌ها چنین می‌شود :

$$I = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{۱۲V}{۳۶\Omega} = ۰/۳۳\mathrm{A}$$

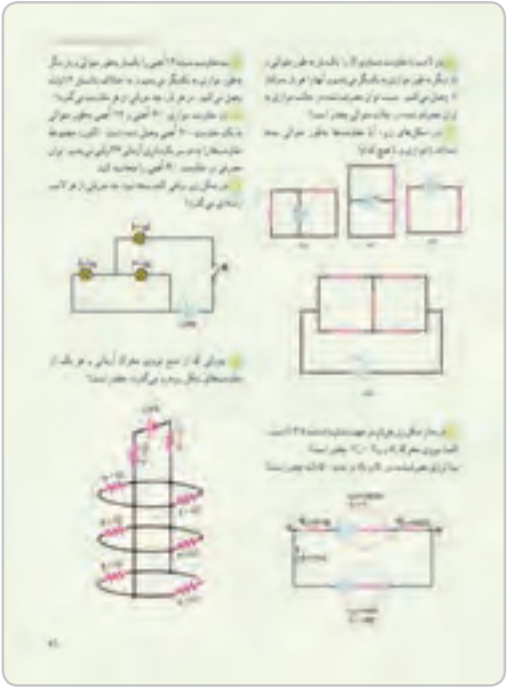
در حالت موازی، چون مقاومت‌ها یکسان‌اند، مقاومت معادل برابر است با

$$R_{eq} = \frac{R_۱}{۳} = \frac{۱۲\Omega}{۳} = ۴/۰\Omega$$

اکنون می‌توانیم جریان کل را به‌دست آوریم :

$$I_t = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{۱۲\mathrm{V}}{۴/۰\Omega} = ۳/۰\mathrm{A}$$

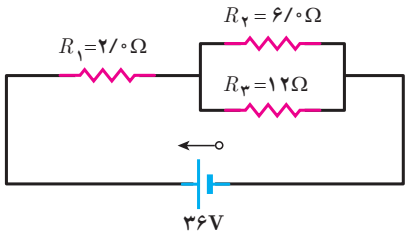
این جریان در هر سه شاخهٔ موازی به‌طور مساوی تقسیم می‌شود. بنابراین جریان عبوری از هر مقاومت ۱/۰ A می‌شود.

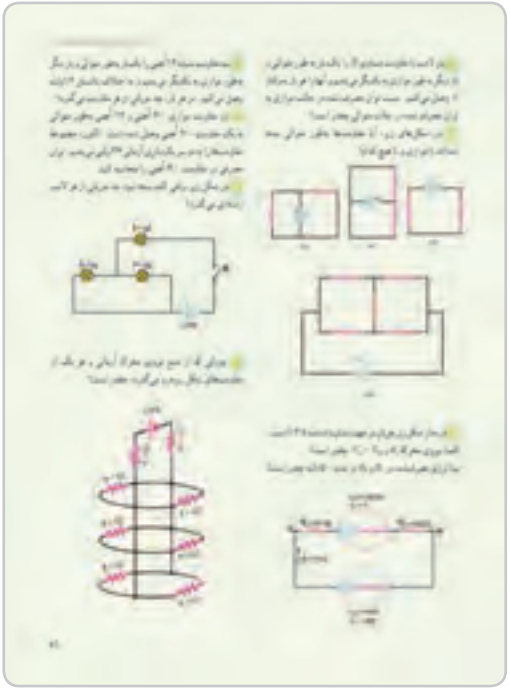


تبصره : راه دیگر آن بود که جریان را برای هر مقاومت از رابطهٔ $I = V/R$ به‌دست آوریم و توجه کنیم که با توجه به موازی بودن مقاومت‌ها، ولتاژ آنها برابر است :

$$I_t = I_۲ = I_۳ = \frac{V}{R} = \frac{۱۲\mathrm{V}}{۱۲\Omega} = ۱/۰\mathrm{A}$$

۲۹ توان مصرفی را از رابطهٔ $P_{\text{مصرفی}} = V^۲/R$ به‌دست می‌آوریم که در آن V اختلاف پتانسیل است. پس کافی است اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت ۶/۰Ω را محاسبه کنیم. به این منظور، شکل مسئله را چنین رسم می‌کنیم :





برای محاسبهٔ اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت $۶/۰\Omega$ باید نخست جریان کل را محاسبه کنیم. برای محاسبهٔ جریان کل، به مقاومت معادل نیاز داریم :

$$R_{eq} = R_۱ + R_{۲۳} = R_۱ + \frac{R_۲R_۳}{R_۲ + R_۳}$$

$$= ۲/۰\Omega + \frac{(۶/۰\Omega)(۱۲\Omega)}{(۶/۰\Omega)(۱۲\Omega)} = ۲/۰\Omega + ۴/۰\Omega = ۶/۰\Omega$$

و در نتیجه

$$I = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{۳۶V}{۶/۰\Omega} = ۶/۰A$$

اکنون می‌توانیم اختلاف پتانسیل دوسر $R_{۲۳}$ را، که همان اختلاف پتانسیل دوسر $R_۲$ است، به‌دست آوریم :

$$V_۲ = V_{۲۳} = I_t R_{۲۳} = (۶/۰A)(۴/۰\Omega) = ۲۴V$$

حال می‌توانیم توان مصرفی در مقاومت $۶/۰\Omega$ را به‌دست آوریم :

$$P_{\text{مصرفی}} = \frac{V_{۲۳}^۲}{R_۲} = \frac{(۲۴V)^۲}{۶/۰\Omega} = ۹۶W$$

۳۰ مقاومت $۴/۰\Omega$ را با $R_۱$، مقاومت $۳/۰\Omega$ را با $R_۲$ و مقاومت $۶/۰\Omega$ را با $R_۳$ نمایش می‌دهیم. نخست، مقاومت معادل این مجموعه را به‌دست می‌آوریم. توجه کنید که مقاومت‌های $R_۲$ و $R_۳$ باهم موازی و مقاومت معادل آنها با مقاومت $R_۱$ متوالی است. بنابراین داریم :

$$R_{eq} = \frac{R_۲R_۳}{R_۲ + R_۳} + R_۱$$

$$= \frac{(۳/۰\Omega)(۶/۰\Omega)}{۳/۰\Omega + ۶/۰\Omega} + ۴/۰\Omega = ۲/۰\Omega + ۴/۰\Omega = ۶/۰\Omega$$

از اینجا می‌توان جریان کل را به‌دست آورد که همان جریان $I_۱$ نیز هست :

$$I_۱ = \frac{۱۸V}{۶/۰\Omega} = ۳/۰A$$

و از طرفی، از قاعدهٔ انشعاب جریان‌ها داریم :

$$I_۱ = I_۲ + I_۳ = ۳/۰A \qquad (۱)$$

همچنین دیدیم که مقاومت‌های $R_۲$ و $R_۳$ موازی‌اند و بنابراین اختلاف پتانسیل دوسر آنها باهم برابر است :

$$I_۲R_۲ = I_۳R_۳$$

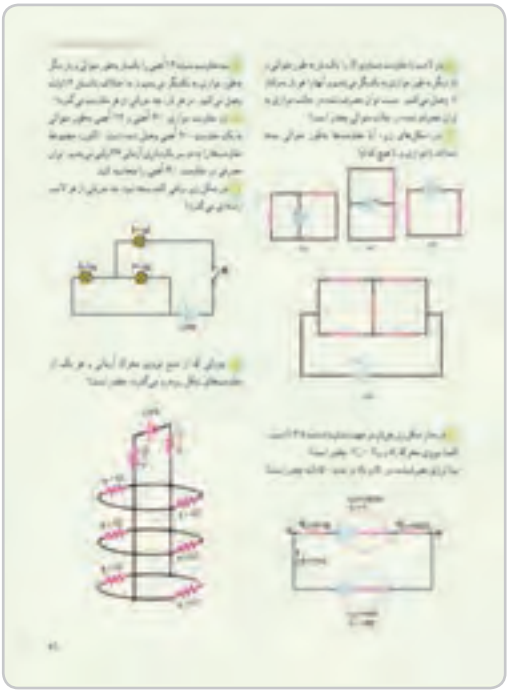
و یا

$$I_۲ = I_۳(\frac{R_۳}{R_۲}) = ۲I_۳ \qquad (۲)$$

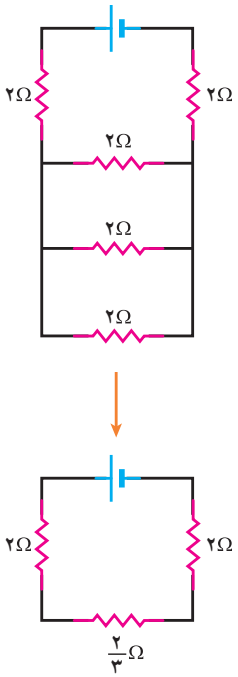
از حل هم‌زمان معادله‌های (۱) و (۲) خواهیم داشت :

$$۲I_۳ + I_۳ = ۳I_۲ = ۳/۰A$$

بنابراین $I_۳ = ۱/۰A$ و در نتیجه $I_۲ = ۲/۰A$ است.



۳۱ اگر توجه کنید درمی‌یابید تمام مقاومت‌های $۴/۰\,\Omega$ باهم موازی‌اند. بنابراین عملاً چنین مداری داریم :



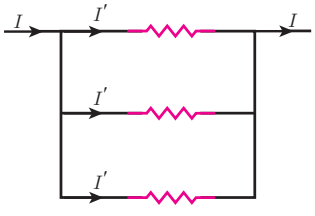
پس مقاومت معادل مدار چنین می‌شود :

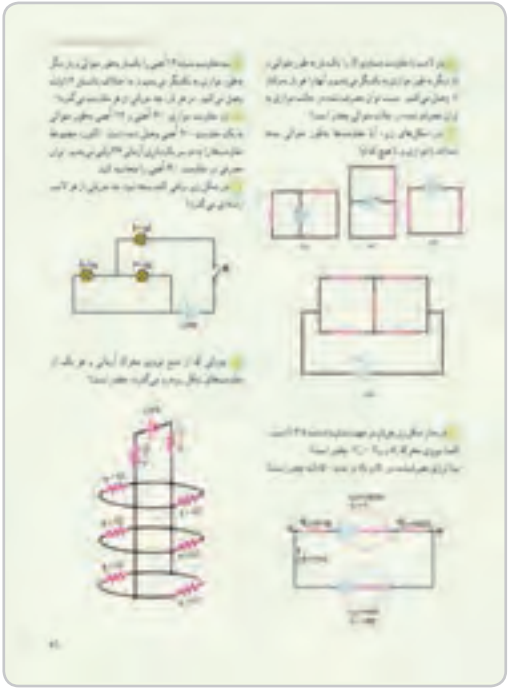
$$R_{eq} = \frac{۲}{۳}\Omega + ۲\Omega + ۲\Omega = \frac{۱۴}{۳}\Omega$$

و در نتیجه جریان عبوری از مدار معادل (و در نتیجه منبع نیروی محرکه) برابر است با

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_{eq}} = \frac{۱۴\text{V}}{\frac{۱۴}{۳}\Omega} = ۳/۰\text{A}$$

اکنون برای محاسبهٔ جریان مقاومت‌های $۴/۰\,\Omega$، گام به گام عقب می‌رویم. توجه کنید که این جریان $۳/۰\,\text{A}$ از سه مقاومت موازی $۲/۰\,\Omega$ می‌گذرد و مثلاً شکلی مانند شکل زیر داریم :

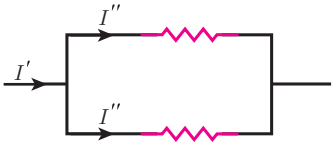




توجه کنید چون مقاومت‌ها یکسان است، جریان عبوری از آنها نیز یکسان شده است (I') و بنابراین داریم :

$$I = ۳I' \Rightarrow I' = \frac{I}{۳}$$

جریان $I'' = \frac{I'}{۲}$ از مقاومت‌های موازی $۴/۰\,\Omega$ می‌گذرد و شکلی مثل شکل زیر داریم :



توجه کنید چون مقاومت‌ها یکسان است، جریان عبوری از آنها نیز یکسان شده است (I'') و بنابراین داریم :

$$I'' = \frac{I'}{۲} = \frac{I}{۶} = \frac{۳/۰\,\text{A}}{۶} = ۰/۵۰\,\text{A}$$

۳۲ چون همهٔ لامپ‌ها از هر لحاظ یکسان هستند، پیش از بستن کلید، اختلاف پتانسیل دوسر همه یکسان و برابر با $\mathscr{E}/۳$ است، که $\mathscr{E}$ نیروی محرکهٔ باتری است :

$$V_{۱A} = V_{۱B} = V_{۱C} = \frac{\mathscr{E}}{۳}$$

پس از بستن کلید، اختلاف پتانسیل دوسر لامپ C برابر صفر می‌شود و بنابراین لامپ C از مدار خارج می‌شود و بدین ترتیب خواهیم داشت :

$$V_{۲A} = V_{۲B} = \frac{\mathscr{E}}{۲}$$

بنابراین، نسبت اختلاف پتانسیل‌های لامپ‌های A و B چنین می‌شود :

$$\frac{V_{۲A}}{V_{۱A}} = \frac{V_{۲B}}{V_{۱B}} = \frac{\mathscr{E}/۲}{\mathscr{E}/۳} = ۱/۵$$

اکنون اگر به گزینه‌های مسئله نگاه کنیم درمی‌یابیم گزینه‌های پ و ت درست هستند. گزینهٔ پ از آن‌رو درست است که در بالا نشان دادیم $V_{۲A} = ۱/۵\,V_{۱A}$ و $V_{۲B} = ۱/۵\,V_B$ می‌شود که این به معنی افزایش ۵۰٪ اختلاف پتانسیل دوسرشان است، گزینهٔ ت نیز درست است و ما بیشتر از آن استفاده کردیم.

تبصره : در وضعیت شکل مسئله، وقتی کلید را می‌بندیم، اصطلاحاً می‌گویند دوسر لامپ اتصال کوتاه (Short circuit) شده است.

۳۳ با توجه به اینکه اختلاف پتانسیل دوسر مجموعه و توان هریک از مصرف‌کننده‌ها را داریم، مقاومت هر مصرف‌کننده را می‌توان به راحتی با استفاده از رابطهٔ $P = V^۲/R$ به‌دست آورد.

$$R_{\text{اتو}} = \frac{V^۲}{P_{\text{اتو}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۱۱۰۰\text{W}} = ۴۴/۰\Omega$$

$$R_{\text{توستر}} = \frac{V^۲}{P_{\text{توستر}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۱۸۰۰\text{W}} = ۲۶/۹\Omega$$

$$R_{\text{لامپ‌ها}} = \frac{V^۲}{P_{\text{لامپ‌ها}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۵(۱۰۰)\text{W}} = ۹۶/۸\Omega$$

$$R_{\text{بخاری}} = \frac{V^۲}{P_{\text{بخاری}}} = \frac{(۲۲۰\text{V})^۲}{۱۱۰۰\text{W}} = ۴۴/۰\Omega$$

از طرفی داریم $I = V/R_{\text{eq}}$ که $۱/R_{\text{eq}}$ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\frac{۱}{R_{\text{eq}}} = \frac{۱}{R_{\text{اتو}}} + \frac{۱}{R_{\text{توستر}}} + \frac{۱}{R_{\text{لامپ}}} + \frac{۱}{R_{\text{بخاری}}}$$

$$= \frac{۱}{۴۴/۰\Omega} + \frac{۱}{۲۶/۹\Omega} + \frac{۱}{۹۶/۸\Omega} + \frac{۱}{۴۴/۰\Omega}$$

$$= ۹/۳۰ \times ۱۰^{-۲}\,\Omega^{-۱}$$

بنابراین جریان عبوری از مقاومت چنین می‌شود :

$$I = \frac{V}{R_{\text{eq}}} = V(\frac{۱}{R_{\text{eq}}})$$

$$= (۲۲۰\text{V})\,(۹/۳۰ \times ۱۰^{-۲}\,\Omega^{-۱})$$

$$= ۲۰/۴۶\text{A} = ۲۰/۵\text{A}$$

که این بیشتر از جریان ۱۵ A است که فیوز می‌تواند تحمل کند و بنابراین فیوز می‌پرد.

فصل سوم

مغناطیس

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- با مفهوم خاصیت مغناطیسی و میدان مغناطیسی، رسم و تعیین جهت خطوط میدان مغناطیسی آشنا می شوند.
- با مفهوم میدان مغناطیسی در اطراف کرهٔ زمین و پدیده‌های مربوط به آن آشنا می شوند.
- با تعریف میدان مغناطیسی با استفاده از نیروی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک در میدان مغناطیسی و حل مسئله‌های مربوط به آن آشنا می شوند.
- با نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی و حل مسئله‌های مربوط به آن آشنا می شوند.
- با آثار مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی در خط راست، پیچه و سیم‌لوله و حل مسئله‌های مربوط به پیچه و سیم‌لوله آشنا می شوند.
- با نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان و تعیین جهت آن آشنا می شوند.
- با خاصیت مغناطیسی مواد و طبقه‌بندی و شناخت کاربردهای آن آشنا می شوند.

چه شناختی مطلوب است؟

- در تجربه‌های زندگی روزمره با آهنربا و خواص مغناطیس ناشی از آن سروکار داریم.
- قطب‌های همنام آهنربا یکدیگر را دفع و قطب‌های ناهمنام یکدیگر را جذب می‌کنند.
- به یک ذرهٔ باردار متحرک در میدان مغناطیسی، نیرو وارد می‌شود. اگر ذره در امتداد میدان $\vec{B}$ حرکت کند، این نیرو صفر است.
- بر سیم حامل جریان درون میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود. اگر سیم در امتداد میدان باشد، این نیرو صفر است.
- سیم‌لوله وسیله‌ای است برای تولید میدان مغناطیسی قوی، به طوری که درون آن، این میدان تقریباً یکنواخت است.
- نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان‌های همسو، ربایشی است و برای جریان‌های ناهمسو، رانشی است.
- مواد از نظر مغناطیسی به مواد پارامغناطیس، مواد دیامغناطیس و فرومغناطیس تقسیم‌بندی می‌شوند. اتم‌های مواد پارامغناطیس و فرومغناطیس به طور ذاتی دو قطبی مغناطیسی‌اند.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شوند؟

- برهم‌کنش قطب‌های آهنربا چگونه است؟
- ویژگی‌های میدان مغناطیسی زمین و شیب مغناطیسی چیست؟
- نیروی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک درون میدان مغناطیسی به چه عواملی بستگی دارد؟
- نیروی وارد بر سیم حامل جریان درون میدان مغناطیسی به چه عواملی بستگی دارد؟
- میدان ناشی از سیم راست حامل جریان، پیچه و سیم‌لوله چگونه است؟
- هستهٔ آهنی چه نقشی در سیم‌لوله ایفا می‌کند؟
- مواد از نظر مغناطیسی به چند دسته تقسیم می‌شوند و ویژگی هر کدام به چه صورت است؟

در پایان این واحد یادگیری دانش‌آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می‌کنند؟

دانش‌آموزان خواهند دانست که :

- در فضای اطراف هر آهنربا یا سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود.
- میدان مغناطیسی زمین اندازهٔ کوچکی دارد و در نقاط مختلف زمین مقدار آن متفاوت است.
- به ذرهٔ بارداری که در راستای میدان مغناطیسی حرکت می‌کند نیرویی مغناطیسی وارد نمی‌شود.
- اندازهٔ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در یک سیم حامل جریان، با فاصله گرفتن از سیم، کاهش می‌یابد.
- سیم‌های موازی حامل جریان در یک جهت، نیروی ربایشی به یکدیگر وارد می‌کنند.
- سیم‌های موازی حامل جریان در خلاف جهت، نیروی رانشی به یکدیگر وارد می‌کنند.
- مواد از نظر مغناطیسی به مواد پارا مغناطیس ،دیامغناطیس و فرو مغناطیس تقسیم می‌شوند.
- اتم‌های مواد پارا مغناطیسی به طور ذاتی دارای گشتاور دو قطبی مغناطیسی هستند.
- مواد فرو مغناطیسی به دو دستهٔ فرو مغناطیسی نرم و فرو مغناطیسی سخت تقسیم می‌شوند.

دانش آموزان قادر خواهند بود :

- چند نمونه از کاربردهای مغناطیس را در زندگی روزمره و فناوری شرح دهند.
- میل مغناطیسی را در شهر خود یا هر مکان دیگر اندازه‌گیری کنند(به روش تجربی).
- جهت و اندازهٔ میدان مغناطیسی وارد به یک ذرهٔ باردار را محاسبه کنند.
- تغییرات میدان مغناطیسی در فضای اطراف یک سیم حامل جریان را با رسم شکل مناسب نشان دهند.
- نیروی وارد بر سیم حامل جریان را اندازه‌گیری کنند(به روش تجربی).
- یک آهنربای الکتریکی بسازند و اثر تعداد دور،شعاع و جریان عبوری از سیم‌لوله‌را بر اندازهٔ $\vec{B}$ بررسی کنند.
- مواد را از لحاظ مغناطیسی تقسیم بندی کنند و نقش دو قطبی مغناطیسی را در آنها توضیح دهند و به کمک آزمایش آنها را از یکدیگر تشخیص دهند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

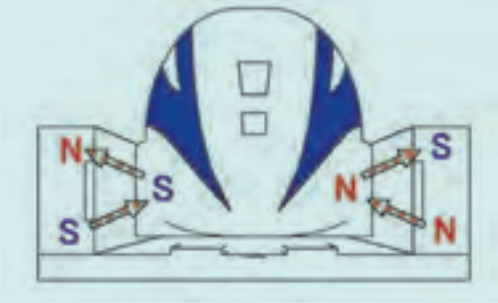
جلسهٔ اول : بررسی تصویر شروع فصل + مقدمهٔ فصل + بخش ۳ــ۱
جلسهٔ دوم : بخش ۳ــ۲
جلسهٔ سوم : بخش ۳ــ۳
جلسهٔ چهارم : بخش ۳ــ۴
جلسهٔ پنجم و ششم : بخش ۳ــ۵
جلسهٔ هفتم : بخش ۳ــ۶
جلسهٔ هشتم : ارزشیابی فصل ۳
بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ را در هر جلسه توزیع کنید و برای پرسش‌ها و مسئله‌های باقیمانده، قبل از ارزشیابی فصل، یک جلسه اختصاص دهید.
توجه : برای آزمایش‌های پیشنهادی در راهنمای معلم (که در نسخهٔ ویدیویی این فصل نیز انجام شده است) ترجیحاً مدت زمان یک جلسه را در طول تدریس این فصل منظور کنید.

توجه دانش‌آموزان را به تصویر ورودی فصل و متن زیر آن جلب کنید تا به اهمیت دانشی که در این فصل می‌آموزند آگاه شوند. این تصویر به کاربردهای مفاهیم این فصل اشاره دارد. افزون بر این تصویر می‌توانید با مثال‌های کاربردی دیگر، زمینهٔ مناسبی را برای ورود به فصل آماده سازید.

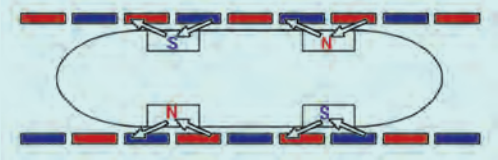
دانستنی برای معلم

قطارهای مغناطیسی

قطارهای مغناطیسی که به اختصار به آنها Maglev می‌گویند (megnetic levitation) وسایل حمل‌ونقل سریع‌تر، آرام‌تر، نرم‌تر و با بازدهی بهتر انرژی نسبت به قطارهای معمولی هستند. دو نوع از این قطارها که در ژاپن و آلمان استفاده می‌شوند برای از بین بردن اصطکاک لغزشی، واگن‌ها در اثر نیروی رانش مغناطیسی روی بالشتکی از هوا قرار می‌گیرند. در نوع ژاپنی برای ایجاد نیروی رانشی بر آهنرباهای قرار گرفته در زیر پایه‌های قطار از آهنرباهای الکتریکی ابررسانا استفاده می‌شود که در امتداد ریل موجود در کف دالان هدایت‌کنندهٔ قطار قرار گرفته‌اند. این نیرو قطار را بین ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از ریل نگه می‌دارد.
واگن‌هایی که به این طریق از سطح زمین فاصله گرفته‌اند، با نیروی الکترومغناطیسی به جلو رانده می‌شوند. برای اعمال این نیروی جلوبر آهنرباهای الکتریکی دیگری در امتداد دیواره‌های واگن‌ها و دیواره‌های جانبی دالان تعبیه شده‌اند. این آهنرباها هم باعث



الف



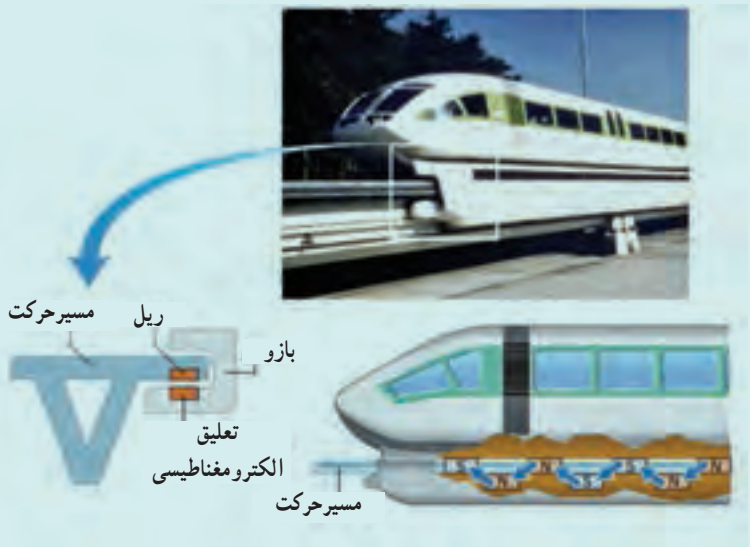
ب

ثبات و هم هدایت قطار در طول سفر می‌شوند. جریان برقراری در سیم‌لوله‌های تعبیه شده در دیوارهٔ دالان راهبر قابل تغییر است. وقتی اندازه و جهت میدان آهنرباهای الکتریکی قابل تغییر باشد می‌تواند هم به عنوان جلوبر عمل کنند و هم به عنوان ترمز. برای جلو راندن قطار جهت میدان‌های مغناطیسی در دیواره‌های راهبر متناوباً تغییر می‌کند تا بتواند آهنرباهای روی دیوارهٔ قطار را به جلو براند. در شکل الف واگن نسبت به دیواره‌ها در وضعیتی است که نیروهای ربایشی و رانشی برآیندی رو به جلو دارند. وقتی واگن کمی جلوتر بیاید تا هر دو جفت N و S مقابل هم باشند نیروها مؤلفهٔ افقی نخواهند داشت ولی واگن به خاطر سرعتی که داشته از این وضعیت رد می‌شود و در همین لحظه قطب‌های آهنرباهای دیواره تغییر می‌کند

در غیر این صورت نیروها مؤلفهٔ افقی به سوی عقب پیدا می‌کرد اما با تغییر قطب‌ها باز هم نیروها مؤلفهٔ افقی رو به جلو خواهند داشت.

در این قطارها اصطکاک لغزشی سطوح تماس حذف شده و با طراحی شکل واگن‌ها اصطکاک هوا نیز به کمترین حد ممکن رسیده است. بنابراین قطارها می‌توانند با سرعتی حدود ۵۰۰ km/h حرکت کنند.

در نوع آلمانی که سرعتی در حدود ۴۰۰ km/h دارد مطابق شکل ب نیازی به دالان نیست و کابین قطار توسط بازوهای جانبی روی یک ریل راهبر به شکل $\forall$ سوار می‌شود و با برقراری جریان در آهنرباهای الکتریکی موجود روی ریل و بازو و رانش بین آنها نیروی وزن کابین را خنثی می‌کند و قطار حدود ۱cm بالاتر از ریل قرار می‌گیرد. در این مدل نیز برای به جلو راندن قطار به مجموعهٔ آهنرباهای الکتریکی دیگری نیاز است که ربایش و رانش‌های دو به دوی آنها می‌تواند هم تأمین‌کنندهٔ نیروی جلوبر و هم نیروی ترمز در صورت لزوم باشد.



راهنمای تدریس : افزون بر کاربردی که در شروع فصل به آن پرداختیم کاربردهای دیگری از آهنربا و مغناطیس در زندگی و فناوری وجود دارد که می‌توانید به برخی از آنها اشاره کنید و برخی را نیز می‌توانید به‌صورت فعالیت‌های فردی یا گروهی به دانش‌آموزان واگذار کنید. کاربرد آهنربا و مغناطیس در خودروها و در تصفیه آب از جمله فعالیت‌های پیشنهادی به دانش‌آموزان می‌تواند باشد.

پرسش ۳ــ۱

این پرسش به‌صورت فعالیت ساده‌ای در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ انجام شده است که می‌توانید آن را در سایت گروه فیزیک مشاهده کنید.

از آنجا که خاصیت مغناطیسی در وسط یک میلهٔ آهنربایی به حداقل ممکن می‌رسد می‌توان به سادگی میلهٔ آهنربایی و میلهٔ معمولی را از آن تشخیص داد. یکی از میله‌ها را به‌طور افقی در دست خود نگه می‌داریم و میلهٔ دیگری را به دو سر و وسط آن نزدیک می‌کنیم. اگر میله فقط از دو سر آن آویزان شود، و از وسط آن رها شود، نشان می دهد که میلهٔ افقی آهنرباست.

توجه

در شکل ۳ــ۴ باید توجه کنید که قسمتی از سوزن که پس از کشیده شدن آهنربا، از آن جدا می‌شود، قطب مخالف آهنربا در آن القا می‌شود.

پرسش ۳ــ۲

از آنجا که پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی در علوم سال هشتم به دانش‌آموزان آموزش داده شده است، لذا در این پرسش صرفاً جهت یادآوری مروری بر این پدیده شده است.

در پرسش ۱، دانش‌آموزان باید به پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی اشاره کنند و دلیل وصل شدن میخ و واشرهای آهنی را ناشی از این پدیده بدانند.

۳ــ۲ میدان مغناطیسی

راهنمای تدریس : از آنجا که دانش‌آموزان در فصل اوّل به اندازهٔ کافی با مفهوم میدان الکتریکی و خطوط وابسته به آنها آشنا شده‌اند این بخش را با مشابهت‌سازی می‌توانید دنبال کنید.

پرسش پیشنهادی

نیروی مغناطیسی وارد بر عقربه مغناطیسی از طرف زمین، بزرگ‌تر، کوچک‌تر یا مساوی با نیروی مغناطیسی‌ای است که از طرف عقربهٔ مغناطیسی بر زمین وارد می‌شود؟

جواب : مساوی است.

پرسش پیشنهادی : الف) بگویید که چرا دو سوزن که به دو سر یک آهنربا آویزان باشند به یکدیگر متمایل می‌شوند؟

الف

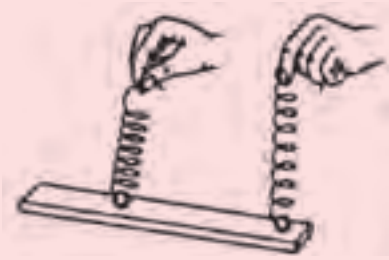
ب) چرا انتهای دو سوزن که به یک قطب یک آهنربا آویزان باشند، یکدیگر را دفع می‌کنند؟

ب

پاسخ : الف) در اثر خاصیت القای مغناطیسی دو سر سوزن‌ها، قطب‌های مخالف می‌شوند و به طرف یکدیگر می‌آیند.

ب) دو انتهای سوزن‌ها قطب‌های همنام شده و یکدیگر را دفع می‌کنند.

فعالیت پیشنهادی

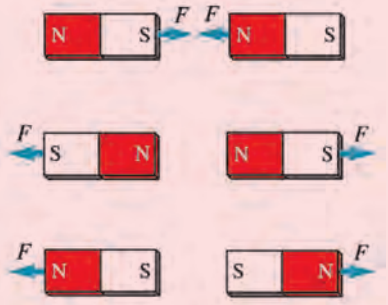


یک گوی آهنی را به یک طرف فنر مارپیچی وصل کنید. این گوی را به نقطه‌ای از سطح یک آهنربا تماس دهید و سپس با کشیدن فنر آن را جدا کنید. افزایش طول فنر به هنگام جدا کردن نشانهٔ نیروی لازم برای غلبه بر نیروی جاذبهٔ وارد بر گوی در نقطهٔ تماس با آهنربا است. گوی را در نقطه‌های دیگر (مثلاً در وسط آهنربا) قرار دهید مشاهده‌های خود را بیان کنید.

پاسخ : نیروی جاذبه در وسط آهنربا ضعیف و در دو سر آن قوی است زیرا افزایش طول فنر به هنگام جدا کردن گوی آهنی از آهنربا بیشتر است.

پرسش پیشنهادی

به شکل زیر به دقت نگاه کنید و آنچه را درک می‌کنید به‌صورت یک نقشهٔ مفهومی بنویسید.



فعالیت پیشنهادی

چند آهنربای حلقه‌ای را مطابق شکل به گونه‌ای قرار داده‌ایم که شناور بمانند و به یکدیگر نچسبند :

۱ اگر قطب شمال آهنربای بالایی قسمت بالای آن باشد، قطب‌های مغناطیسی بقیه آهنرباها را مشخص کنید.

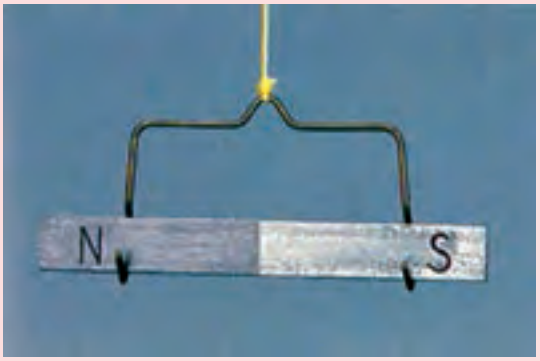
۲ با قرار دادن آهنرباهای حلقه‌ای، در داخل یک نی پلاستیکی فعالیت را انجام دهید.

۳ نی و آهنرباهای داخل آن را در دستان خود به‌صورت افقی بگیرید چرا با حرکت دادن یکی از آهنرباها خواهید دید که بقیه آنها هم جابه‌جا می‌شوند؟

فعالیت پیشنهادی

هدف : برقراری رابطه بین مفاهیم نیروی مغناطیسی و قانون سوم نیوتون

دو آهنربای میله‌ای را از وسط با دو تکه نخ آویزان می‌کنیم. بسته به قرار گرفتن قطب‌های ناهمنام و همنام در مجاور یکدیگر در دو حالتِ جذب و دفع، شکل آزمایش را بر روی کاغذ بکشید و جهت نیروهای مغناطیسی را با توجه به قانون سوم نیوتون رسم کنید.



فعالیت پیشنهادی

هدف : تشخیص نیروی گرانش و نیروی مغناطیسی و مقایسهٔ آنها

الف) مطابق شکل فنری را از یک طرف آویزان کنید. طول آن را اندازه بگیرید.

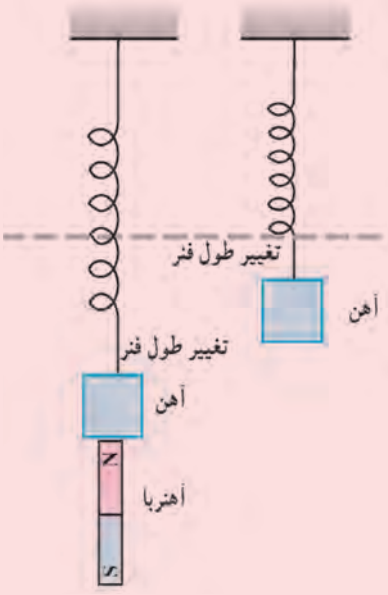
ب) قطعه‌ای آهنی را به انتهای آن بیاویزید و تغییر طول فنر را اندازه بگیرید.

پ) چه عاملی باعث تغییر طول فنر می‌شود؟

ت) یک آهنربای میله‌ای را از زیر، به تدریج به قطعهٔ آهنِ آویخته به فنر، نزدیک کنید. مشاهدات خود را بیان کنید.

ث) آهنربا را در دورترین فاصله‌ای قرار دهید که منجر به جذب قطعهٔ آهنی می‌شود و تغییر طول فنر را اندازه بگیرید.

ج) چه عاملی باعث افزایش تغییر طول فنر نسبت به حالت قبل شده است؟



پاسخ : پ) نیروی گرانش که از طرف زمین بر قطعهٔ آهنی وارد می‌شود.

ت) آهن به تدریج پایین کشیده می‌شود و جذب آهنربا می‌گردد، افزایش طول فنر را مشاهده می‌کنیم.

ج) نیروی مغناطیسی که علاوه‌بر نیروی گرانشی بر قطعهٔ آهنی وارد می‌شود.

فعالیت پیشنهادی

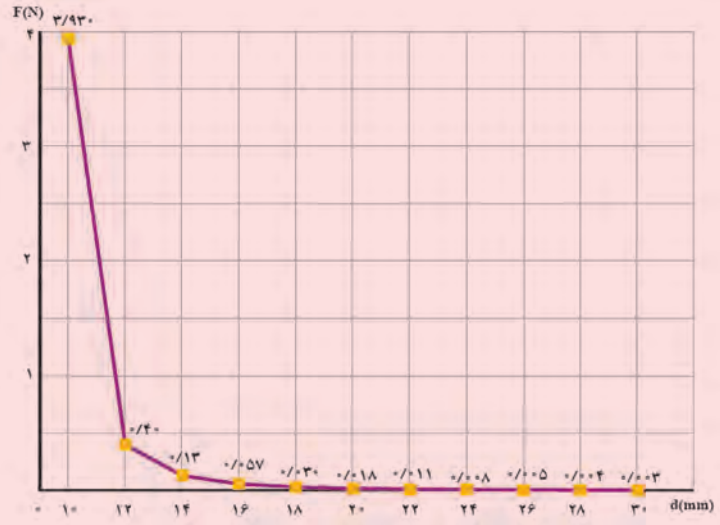
فعالیت پیشنهادی

نیروی دافعه بین دو قطب همنام دو آهنربا بر اساس فاصلهٔ آنها از یکدیگر اندازه‌گیری شده و در جدول زیر ثبت شده است.

نمودار نیروی مغناطیسی بر حسب فاصلهٔ دو قطب همنام دو آهنربا را رسم کنید (برای رسم نمودار می‌توانید از نرم‌افزار Excel استفاده کنیم)

جدول (۱)

فاصله d(mm)	نیرو F(N)
۱۰	۳/۹۳۰
۱۲	۰/۴۰
۱۴	۰/۱۳
۱۶	۰/۰۵۷
۱۸	۰/۰۳۰
۲۰	۰/۰۱۸
۲۲	۰/۰۱۱
۲۴	۰/۰۰۸
۲۶	۰/۰۰۵
۲۸	۰/۰۰۴
۳۰	۰/۰۰۳



پاسخ :

سپس از دانش‌آموزان می‌خواهیم تا نمودار نیروی مغناطیسی برحسب عکس مجذور فاصلهٔ دو قطب همنام دو آهنربا را رسم کنند و با توجه به شکل، نمودار F برحسب $\frac{۱}{d^۲}$ بیان کنند که آیا نمودار خط راست است؟ نتیجه را با نیروی بین دو بار الکتریکی برحسب وارون مربع فاصله از یکدیگر (قانون کولن) مقایسه کنند.

برای مشاهدهٔ نحوهٔ انجام فعالیت ۳ـ۱ و همچنین فعالیت پیشنهادی مرتبط با شکل ۳ـ۶ می‌توانید به فیلم مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ مراجعه کنید (سایت گروه فیزیک).

پرسش ۳ــ۳

۱ــ با توجه به شکل ۳ــ۶ الف،دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند جهت عقربه‌های مغناطیسی را در پرسش ۱ تعیین کنند.

۲ــ همان‌طور که اشاره کردیم چون دانش‌آموزان در فصل ۱ به اندازهٔ کافی با مفهوم میدان، خطوط میدان و ویژگی‌های آن آشنا شدند به سادگی می‌توانند به این پرسش پاسخ دهند. در این پرسش تنها سه خط از خطوط میدان رسم شده است و خط عبوری از نقطه c رسم نشده است (نکته‌ای که باید دوباره به دانش‌آموزان گوشزد شود). با توجه به فاصلهٔ خطوط از یکدیگر، اندازهٔ میدان به ترتیب بزرگی در نقطه‌های a، b و c است. به همین دلیل هنگام رسم بردار میدان $\vec{B}$، که باید بر خطوط مماس باشد، باید به اندازهٔ بردار $\vec{B}$ هم توجه کنند.

فعالیت ۳ــ۲

این فعالیت نیز به‌صورت فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ در سایت گروه فیزیک موجود است که می‌توانید مشاهده کنید. در ضمن این فعالیت در کلاس درس نیز باید توسط دانش‌آموزان انجام شود و پس از انجام آن نتیجه را گزارش کنند. (پاسخ نهایی فعالیت : ۷۲۰ درجه).

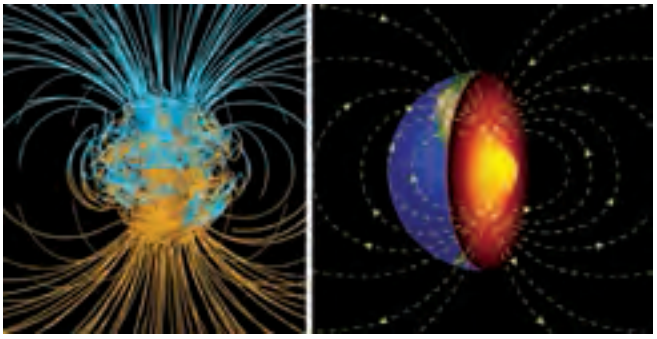
آزمایش ۳ــ۱

علاوه بر روشی که در آزمایش آمده است به روش دیگری که در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ در سایت گروه فیزیک موجود است می‌توانید این آزمایش را به کمک دانش‌آموزان دنبال کنید.

میدان مغناطیسی زمین

در شکل ۳ـ۷ تنها مدل بسیار ساده از طرح خطوط میدان مغناطیسی در اطراف کرهٔ زمین نشان داده شده است. لازم است در این قسمت به این نکتهٔ مهم اشاره شود که در مشابهت‌سازی و ومدل‌سازی میدان مغناطیسی زمین با یک آهنربای میله‌ای، بسیار ساده ساده‌سازی شده است.

شکل‌های زیر مدل‌سازی کامل‌تری از خطوط میدان مغناطیسی در اطراف کرهٔ زمین را نشان می‌دهد.



توضیح در خصوص چند زاویهٔ مغناطیسی

زاویهٔ میل مغناطیس (**magnetic declination angle**) همان‌طور که در کتاب درسی نیز اشاره شده است چون محور مغناطیسی زمین با محور جغرافیایی آن (محور چرخش زمین) به‌طور کامل موازی نیست، در نتیجه خواندهٔ یک قطب‌نما تا حدودی از شمال جغرافیایی انحراف دارد. این انحراف که با مکان تغییر می‌کند **زاویه میل** مغناطیسی نامیده می‌شود. در برخی منابع برای این زاویه از عبارت **وردش مغناطیسی** (**magnetic variation**) نیز استفاده شده است.

همچنین میدان مغناطیسی در بیشتر نقاط روی سطح زمین افقی نیست، زاویه آن به سمت بالا یا پایین را **شیب مغناطیسی** (**magnetic inclination angle**) می‌نامند.

در خصوص عبارت **زاویهٔ انحراف مغناطیسی** (**magnetic deviation angle**) نیز لازم به ذکر است که این عبارت تنها برای شرایطی به کار می‌رود که قطب‌نما در محلی استفاده شود که مقداری فلز در آنجا وجود داشته باشد (مانند کشتی). به دلیل برهمکنش میدان مغناطیسی زمین با فلز به کار رفته در کشتی، اندکی خطا یا انحراف در جهت‌گیری عقربه مغناطیسی و در نتیجه عددی که برای میل مغناطیسی گزارش می‌شود به وجود می‌آید.

آزمایش پیشنهادی

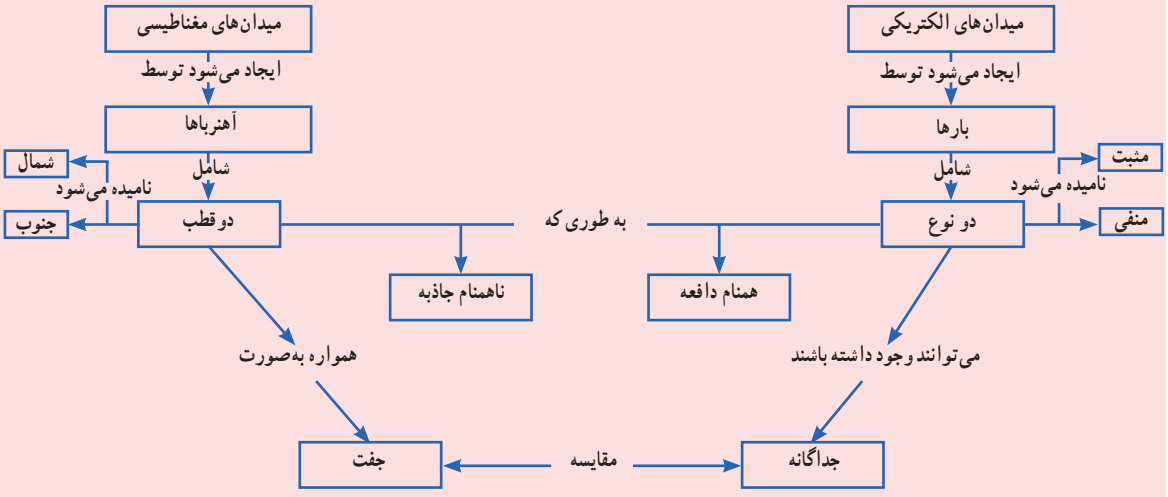
روشی برای ثبت کردن طرح خط‌های میدان مغناطیسی روی کاغذ

وسایل لازم : آهنربای میله‌ای ــ کاغذ یا مقوا ــ سینی پلاستیکی ــ موم یا شمع ــ نمک‌پاش و برادهٔ آهن

روش کار : کاغذ را موم‌اندود می‌کنیم، آهنربا را روی سینی و کاغذ را روی آن می‌گذاریم و روی آن براده می‌پاشیم تا شکل میدان مغناطیسی مشخص شود. به آرامی آهنربا را از زیر کاغذ خارج می‌کنیم و سینی را در محل گرم قرار می‌دهیم تا موم نرم شود و براده‌ها به آن بچسبد. بعد از سرد شدن طرح میدان روی کاغذ ثابت می‌ماند.

فعالیت پیشنهادی

نقشهٔ مفهومی زیر را به‌صورت یک متن سادهٔ فیزیکی بنویسید به طوری که این متن برای دانش‌آموزی که با این موضوع آشنایی ندارد، قابل فهم باشد.



فعالیت ۳ــ۳

این فعالیت با روش ساده و هوشمندانه‌ای در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ انجام شده است و در سایت گروه فیزیک موجود است.

شکل‌های زیر چند نمونه شیب‌سنج را نشان می‌دهد که ممکن است در آزمایشگاه مدرسه شما نیز یک نمونه از آنها موجود باشد.

دانستنی برای معلم

میدان مغناطیسی زمین

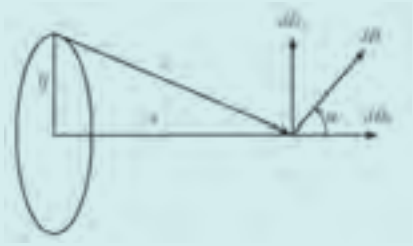
نخستین‌بار سر ویلیام گیلبرت عنوان کرد که زمین آهنربای بزرگی است که قطب و استوای مغناطیسی دارد. در آن زمان تصور می شد که میدان مغناطیسی زمین ناشی از آهنربای بزرگ درون آن است. می‌دانیم، بخش درونی زمین به‌طور عمده از نیکل و آهن مذاب تشکیل شده که دمای آن دست کم حدود ۲۲۰۰ درجهٔ سلسیوس است و می‌تواند آزادانه از طریق هم‌رفت حرکت کند. در نتیجه ، این فرضیه که بخش درونی زمین به‌طور دائم مغناطیسی شده باشد، بعید است. از سوی دیگر، میدان مغناطیسی زمین کاملاً مانا نیست. قطب شمال مغناطیسی اکنون در شمال کانادا قرار دارد، ولی در طول سال‌ها دیده شده که این قطب به آهستگی حرکت می‌کند. علاوه‌بر این، خاصیت مغناطیسی مشاهده شده در صخره‌های آهن‌دار در پوستهٔ زمین نشان می‌دهد که گاهی جهت میدان مغناطیسی زمین به‌طور کامل وارون شده است. زمین و حداقل سه سیاره از چهار سیارهٔ بزرگ منظومهٔ شمسی، دارای میدان مغناطیسی هستند.

همهٔ شواهد این باور را تأیید می‌کنند که میداان مغناطیسی زمین به جای اینکه از آهنربای دائمی سرچشمه گرفته باشد، می‌تواند از جریان‌های الکتریکی که به دور هستهٔ نیکل ــ آهنی این سیاره می‌چرخند، به وجود آمده باشد. جریان الکتریکی در داخل زمین می‌تواند درست به‌گونهٔ جریانی که در یک پیچه برقرار است، میدان مغناطیسی ایجاد کند. اگر به دلیلی جهت این جریان الکتریکی تغییر کند، جهت میدان مغناطیسی نیز وارون خواهد شد.

دانستنی برای معلم

اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین

یکی از روش‌های اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین، اندازه‌گیری برایند میدان زمین با میدان حاصل از یک سیم‌پیچ حامل جریان است. با کمک یک روش سادهٔ تجربی و استفاده از یک قطب‌نما و یک سیم‌پیچ، اندازهٔ میدان مغناطیسی زمین را می‌توان حساب کرد. هرگاه از حلقه‌ای شامل N دور سیم، جریان I عبور کند، میدان مغناطیسی در فاصلهٔ y از مرکز حلقه شکل زیر با کمک قانون بیوساوار به‌دست می‌آید به طوری‌که اندازهٔ میدان مغناطیسی حلقه برابر است با :



$$H = \frac{B}{\mu_{\circ}} = \frac{IR^{2}}{2(R^{2}+y^{2})^{3/2}} \qquad (۱)$$

اگر N حلقه داشته باشیم، رابطهٔ ۱ به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$H = \frac{NIR^{2}}{2(R^{2}+y^{2})^{3/2}} \qquad (۲)$$

در دستگاه گاوسی، رابطهٔ ۲ به‌صورت زیر در می‌آید :

$$H = \frac{2\mu IR^{2}N}{(R^{2}+y^{2})^{3/2}} \qquad (۳)$$

در این سیستم R و y برحسب سانتی‌متر، I برحسب آمپر و H برحسب گاوس است. جهت H با کمک قانون دست راست به‌دست می‌آید. یعنی اگر جریان در جهت انگشت شست دست راست باشد، جهت میدان در امتداد بسته شدن چهار انگشت دست راست خواهد بود. از آنجا که میدان مغناطیسی زمین در هر نقطه، به دو مؤلفهٔ افقی و قائم قابل تجزیه است، عقربهٔ مغناطیسی تحت‌تأثیر مؤلفهٔ افقی منحرف می‌شود. حال اگر از سیم پیچ جریان عبور کند، عقربهٔ مغناطیسی تحت تأثیر دو میدان که هر دو افقی هستند، قرار می‌گیرد. بدیهی است که در این حالت، عقربه در امتداد برایند این دو میدان قرار می‌گیرد.

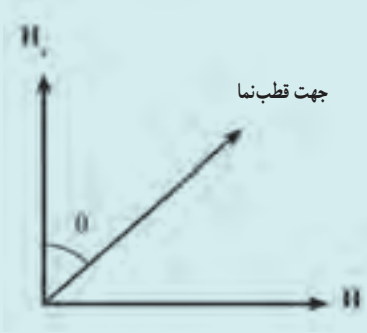
اگر عقربهٔ مغناطیسی را طوری قرار دهیم که جهت میدان مغناطیسی زمین عمود بر میدان حاصل از سیم‌پیچ آن باشد، آن‌گاه طبق شکل صفحهٔ بعد می‌توان نوشت :

$$tg\theta = \frac{H}{H_{\circ}} \qquad (۴)$$

با اندازه‌گیری θ و معلوم بودن مقدار H می‌توان $H_{\circ}$ را از رابطهٔ ۴ به‌دست آورد. چون میدان H را با عبور جریان از سیم‌پیچ تولید می‌کنیم، از رابطه‌های ۳ و ۴ داریم :

$$H = H_{\circ} tg\,\theta \Rightarrow \frac{2\mu_{\circ} N I R^{2}}{(R^{2}+y^{2})^{3/2}} = H_{\circ}\, tg\,\theta \qquad (۵)$$

$$\Rightarrow I = \frac{(R^{2}+y^{2})^{3/2}}{2\pi N I R^{2}} H_{\circ} tg\,\theta$$



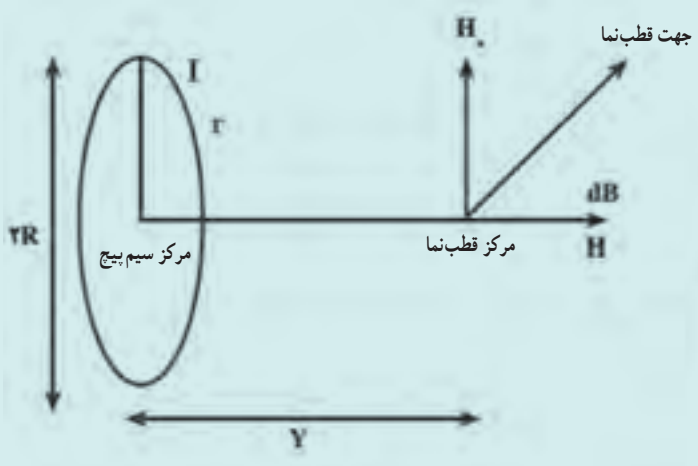
که می‌توان رابطهٔ ۵ را به‌صورت زیر نوشت :

$$I = m tg\theta \qquad (۶)$$

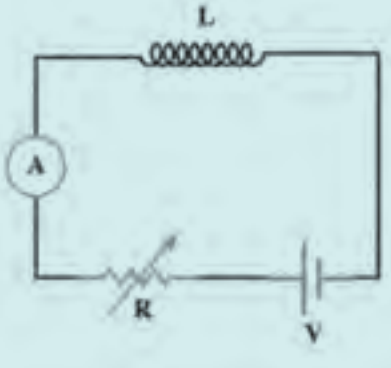
حال می‌توان نمودار I را برحسب $tg\theta$ رسم کرد. شیب‌خط حاصل یعنی m را اندازه گرفت و $H_{\circ}$ (شدت میدان مغناطیسی زمین) را به‌دست آورد :

$$H_{\circ} = \frac{2\mu_{\circ} N R^{2} m}{(R^{2}+y^{2})^{3/2}} \qquad (۷)$$

نحوهٔ انجام آزمایش : ابتدا قطب‌نما را روی میز آن‌قدر جابه‌جا کنید که قطب شمال آن تقریباً در راستای شمال ــ جنوب جغرافیایی قرار گیرد (برای این کار می‌توان آزمایش را روی زمین انجام داد تا از اثرات احتمالی میدان‌های میز آهنی بر قطب نما جلوگیری شود). سپس سیم‌پیچ را آن‌قدر حرکت دهید تا محور عمود بر سیم‌پیچ، بر قطب‌نما عمود باشد. شکل‌های (۱) و (۲) مدار آزمایش و نحوهٔ قرار گرفتن میدان‌ها را نشان می‌دهند.



شکل (۲)



شکل (۱)

در حالتی که جریان صفر است، باید جهت قطب‌نما در همان راستای شمال و جنوب باقی بماند. حال دامنهٔ آمپرمتر را روی ۱۰ آمپر قرار دهید و با تغییر درجهٔ منبع تغذیه و رئوستا، جریان‌های متفاوت را برقرار سازید و میزان انحراف عقربه را بخوانید و در جدول (۱) یادداشت کنید. برای اندازه‌گیری دقیق‌تر می‌توانید در هر مرحله، مقدار ۰/۱ میلی‌آمپر به جریان‌های قبلی اضافه کنید. پس از اینکه برای هشت جریان اندازه‌گیری شده زاویهٔ θ را خواندید، برای کاهش خطای آزمایش، دوباره همان جریان‌ها را به وجود آورید و میزان انحراف را اندازه بگیرید (این کار را دو بار انجام دهید). سپس از θها میانگین بگیرید و نمودار I را برحسب $tg\theta$ رسم کنید و شیب آن را اندازه بگیرید.

نتیجه‌های تجربی به‌دست آمده در آزمایشگاه : قطر داخلی سیم‌پیچ برابر ۴/۵ سانتی‌متر و قطر خارجی آن ۶/۵ سانتی‌متر است. بنابراین برای به‌دست آوردن قطر سیم‌پیچ، میانگین دو عدد را به‌دست می‌آوریم :

$$\text{قطر} = \frac{۶/۵+۴/۵}{۲} = \frac{۱۱}{۲} = ۵/۵ \Rightarrow R = ۲/۷۵\,\text{cm}$$

با توجه به شکل ۲ در صفحه قبل، فاصلهٔ مرکز حلقه تا قطب‌نما را در آزمایشی که برقرار شد، ۱۰/۴ سانتی‌متر گرفتیم و N هم برابر ۱۰۰۰ دور است. مقادیر به‌دست آمده را در جدول (۱) ثبت کرده‌ایم که در آن I برحسب میلی‌آمپر است. حال اگر نمودار I برحسب θ را رسم کنیم، شیب آن معرف m است. از طرف دیگر، برای به دست آوردن $H_\circ$ باید شیب‌خط یعنی همین m را داشته باشیم :

$$m = \frac{۱/۱۹-۰/۸۴}{۵۰-۳۵} = \frac{۰/۳۵}{۱۵} = ۰/۰۲۳$$

و به این ترتیب میدان مغناطیسی محل مورد آزمایش در دستگاه گاوسی به دست می‌آید :

$$H_\circ = \frac{۲\mu_\circ NR^۲ m}{(R^۲+y^۲)^{۳/۲}} = \frac{۲(۱۰۰۰)(۲/۷۵)^۲(۰/۰۲۳)}{\left((۲/۷۵)^۲+(۱۰/۴)^۲\right)^{۳/۲}} = ۰/۸۷G$$

جدول ۱

$I(mA)$	۱۰/۳	۱۶/۵	۱۲	۲۷/۲	۳۵	۳۷	۵۰	۹۳	۱۰۴
θ	۱۰	۲۰	۱۵	۳۰	۴۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
$tg\theta$	۰/۱۸	۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۵۸	۰/۸۴	۰/۸۴	۱/۱۹	۱/۷۳	۲/۷۵

اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در هر نقطه

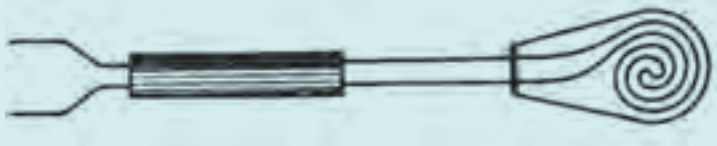
یکی از وسایل اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی، سوزن مغناطیسی است که از رشتهٔ کشسانی آویزان است و اساس کار آن شبیه ترازوی پیچشی کولن است. برای اندازه‌گیری زاویه‌های پیچش رشته صفحهٔ مدرجی در بالا به آن نصب شده است و محل نوک‌های سوزن با کمک درجه‌ها روی استوانهٔ بیرونی معین می‌شود. در این دستگاه سوزن فقط وقتی در تعادل است که گشتاور نیروی حاصل از میدان برابر و مخالف گشتاور نیروی رشتهٔ پیچیده باشد. اگر سوزن در امتداد میدان مغناطیسی قرار گرفته باشد ($\alpha = ۰$) یعنی گشتاور صفر و رشته نباید پیچیده باشد.

با پیچش رشته به اندازهٔ زاویهٔ معین، می‌توان برای هر سمت‌گیری سوزن به تعادل رسید. گشتاور نیروی وارد بر رشته با محاسبات یا درجه‌بندی اولیهٔ وسیله از روی زاویهٔ پیچش معین می‌شود. پس می‌توانیم بیشترین نیرو که به ازای $\alpha = ۹۰^\circ$ است را به‌دست آوریم. یعنی مکانی را تعیین کنیم که در آن راستای سوزن بر راستای میدان مغناطیسی عمود باشد.

ساخت این نوع مغناطیس‌سنج ایستا مشکل نیست ولی به اندازهٔ کافی حساس و دقیق نیستند. پس در بسیاری موارد بهتر این است که گشتاور نیروی وارد بر سوزن مغناطیسی با مشاهدهٔ نوسان‌های سوزن اندازه‌گیری شود.

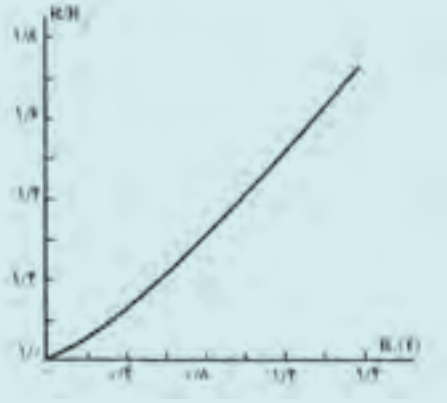
یک سوزن مغناطیسی که در میدان مغناطیسی از موضع تعادل خود تغییر مکان داده باشد، حول آن نقطه نوسان می‌کند. اگر جرم سوزن زیاد و در معرض اصطکاک ناچیز باشد قبل از توقف چندین نوسان می‌کند. بنابراین دورهٔ نوسان‌ها را می‌توان با دقت اندازه‌گیری کرد. محاسبات نشان می‌دهد که هرچه گشتاور نیروی وارد بر سوزن بزرگ‌تر، یعنی هرچه میدان قوی‌تر باشد دورهٔ نوسان‌ها کمتر است. پس با مقایسهٔ دوره‌های نوسان برای سوزنی در میدان‌های مختلف می‌توان به‌طور قابل اطمینانی مقادیر میدان‌های متفاوت را مقایسه کرد. این مغناطیس‌سنج‌های دینامیکی برای اندازه‌گیری میدان‌های ضعیفی نظیر میدان مغناطیسی زمین با موفقیت به‌کار رفته‌اند.

اندازهٔ میدان مغناطیسی را به کمک پدیده‌های دیگری هم می‌توان اندازه گرفت. مثلاً با توجه به اینکه مقاومت الکتریکی بیسموت در حضور میدان مغناطیسی تغییر می‌کند می‌توان مغناطیس‌سنج ساخت. مارپیچ مسطحی که از سیم بیسموت ساخته شده است در میدان مغناطیسی قرار می‌دهند و مقاومت آن را در درون و خارج میدان اندازه‌گیری می‌شود. می‌توان از تغییر مقاومت سیم دربارهٔ اندازهٔ میدان مغناطیسی داوری کرد. طبیعی است باید مارپیچ بیسموت را با قرار دادن در میدان‌هایی با اندازهٔ معلوم ابتدا مدرج کنیم. مارپیچ‌های بیسموت را برای اندازه‌گیری میدان‌های قوی که بزرگی آنها هزاران برابر میدان مغناطیسی زمین است به‌کار می‌برند.



مارپیچ بیسموت

مثال : در نمودار شکل زیر R مقاومت بیسموت در میدانی به بزرگی B و $R_{\circ}$ مقاومت آن در خارج میدان انتخاب شده است.



شکل (۹۷)

با استفاده از نمودار بزرگی میدانی را تعیین کنید که مقاومت مارپیچ بیسموت در آن ۲۶Ω و در خارج آن ۲۰Ω است.

پاسخ :

$$R / R_{\circ} = \frac{۲۶}{۲۰} = ۱/۳$$

$$R = ۲۶\Omega$$

$$R_{\circ} = ۲۰\Omega$$

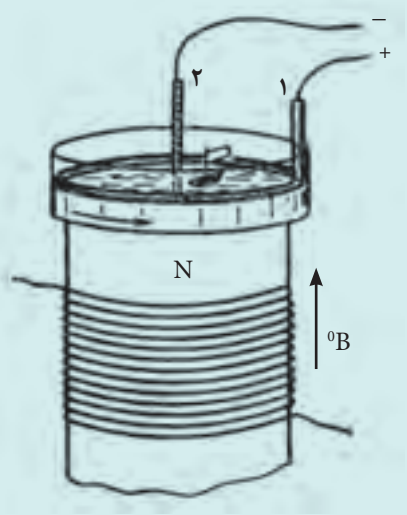
با توجه به نمودار $B = ۰/۸\mathrm{T}$ است.

۳ـ۳ نیرویی وارد بر ذرهٔ باردار در میدان مغناطیسی

راهنمای تدریس : در این قسمت دانش‌آموزان باید افزون بر آشنایی با تعیین جهت نیرویی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک در حضور میدان مغناطیسی $\vec{B}$ ، با محاسبهٔ اندازهٔ این نیرو که در رابطهٔ ۳ـ۱ آمده است با حل تمرین‌های مختلف آشنا شوند.

آزمایش اثر میدان مغناطیسی بر بار الکتریکی متحرک

شکل زیر ظرف پر از محلول الکترولیتی را نشان می‌دهد. دو الکترود، یعنی حلقهٔ ۱ و میلهٔ ۲ به قطب‌های باتری (منبع تغذیه) متصل شده‌اند. در الکترولیت جریان از الکترود ۱ به سوی ۲ برقرار می‌شود، یعنی یون‌ها در امتداد شعاع‌های ظرف حرکت می‌کنند. ظرف را بالای یکی از قطب‌های آهنربا قرار می‌دهیم، به‌گونه‌ای که میدان مغناطیسی در راستای قائم و به طرف بالا باشد و با راستای حرکت یون‌ها زاویهٔ ۹۰° بسازد. نیروهای وارد بر بار الکتریکی متحرک می‌خواهند، یون‌ها را در امتداد پیکان در صفحهٔ افقی در دایره‌هایی، عمود بر شعاع‌های ظرف جابه‌جا کنند به‌طوری که از حرکت قایق کوچک شناور روی محلول می‌توان دید همه الکترون‌ها در آن جهت حرکت می‌کنند. بر این اساس طرح آزمایشی به شرح زیر تنظیم شده است.



الف) وسایل آزمایش :

۱ منبع تغذیه، صفر تا ۲۴ ولتی dc و سیم‌های رابط

۲ سیم‌پیچ، حداقل ۸۰۰ الی ۱۲۰۰ دور همراه با هستهٔ آهنی مناسب

۳ یک ظرف شیشه‌ای استوانه‌ای شکل به ارتفاع تقریبی ۵cm و قطر ۱۰cm

۴ میله‌های فلزی رسانا که به انتهای یکی از آن دو یک حلقهٔ رسانا به قطر تقریبی ۸cm لحیم شده باشد.

۵ پایه، گیره، میله رابط

۶ کات کبود یا سولفات مس ($CuSO_4$) محلول در آب با غلظت مناسب

ب) دستور کار

۱ ابتدا محلول $CuSO_4$ (کات کبود) با غلظت مناسب تهیه و در ظرف شیشه‌ای می‌ریزیم.

۲ هستهٔ آهنی را درون سیم‌پیچ قرار می‌دهیم و سیم‌پیچ را به منبع تغذیه dc متصل می‌کنیم (با تماس یک قطعهٔ فلزی به هستهٔ آهنی، میدان مغناطیسی را آزمایش می‌کنیم و در صورت نیاز آن را تقویت می‌کنیم).

۳ ظرف شیشه‌ای محتوی محلول را مطابق شکل روی سطح هستهٔ آهنی و سیم‌پیچ قرار داده و دو میلهٔ فلزی را با گیره درون ظرف قرار می‌دهیم و آن را به دو قطب مثبت و منفی منبع تغذیهٔ dc وصل می‌کنیم (کاتد و آند)

۴ پس از اطمینان از کامل شدن طرح و صحت مدار منبع تغذیه متصل و آزمایش را شروع می‌کنیم (اتصال دو میلهٔ فلزی درون محلول بایستی به‌طور موازی با اتصال دو سر سیم‌پیچ به منبع تغذیه متصل و در صورت لزوم در مسیر هر کدام یک مقاومت متغیر (رئوستا) قرار گیرد تا جریان ورودی برای هر قسمت کنترل و قابل تغییر باشد).

پ) موارد بررسی

۱ مشاهدهٔ چرخش محلول الکترولیت در ظرف شیشه‌ای و توجیه علت چرخش. مطابق شکل بالا به دلیل حلقوی بودن کاتد ــ حرکت بارها در راستای شعاع این حلقه خواهد بود و چون جهت میدان عمود بر سطح دایرهٔ این حلقه است، جهت اعمال

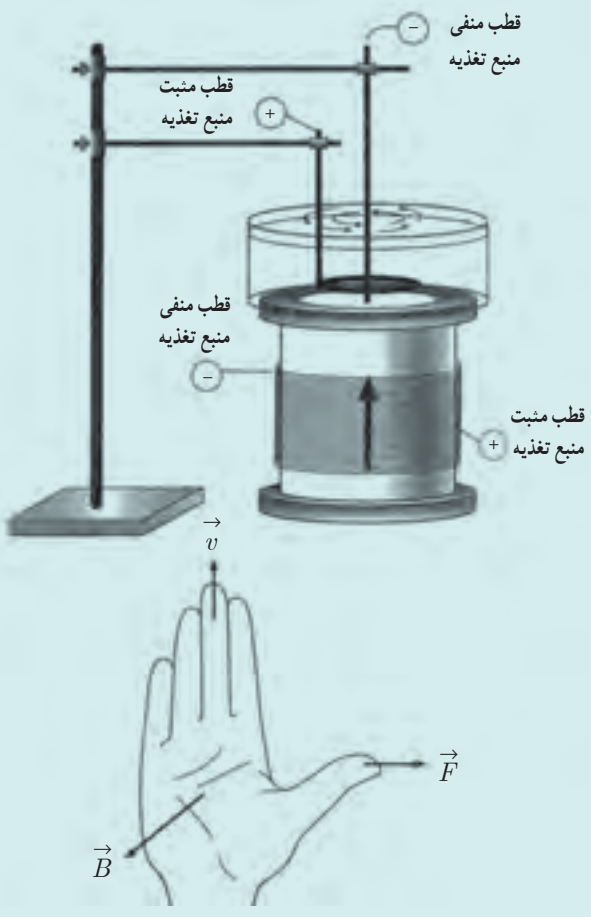
نیرو به‌صورت مماس بر دایره است و مجموعهٔ این نیروها باعث چرخش می‌شود. (برای مشاهده بهتر چرخش، تعدادی قایق کاغذی کوچک بر سطح محلول شناور کنید)

۲ با تغییر ورودی میله‌ها یعنی عوض کردن مثبت و منفی (تغییر جهت $\vec{v}$) و یا تغییر ورودی سیم‌لوله (تغییر جهت $\vec{B}$) تغییرات جهت چرخش را مشاهده و در هر مورد قانون دست راست و رابطهٔ $F = qvB\sin\theta$ را بررسی کنید.

۳ با تغییر در شدت جریان ورودی به سیملوله (تغییر اندازهٔ B) و با تغییر در شدت جریان ورودی به میله‌ها، تغییرات سرعت چرخش را مشاهده و تغییر در بزرگی F را بررسی کنید.

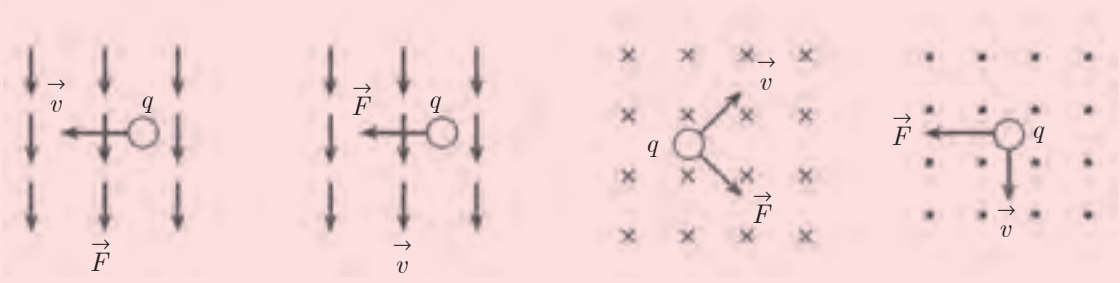
۴ با استفاده از حلقه‌های ورودی جریان، با شعاع‌های مختلف می‌توان فاصله‌های کاتد و آند را کم و زیاد کنیم و در نتیجه سرعت واکنش را تغییر دهیم و نقش آن را در بزرگی F بررسی می‌کنیم.

۵ می‌توان به جای $CuSO_4$ از محلول‌های الکترولیت دیگری نیز استفاده کرد که بزرگی یون‌ها q با Cu^{+4} و SO_4^{-2} تفاوت داشته و نقش بزرگی بار، در بزرگی F را بررسی نمود.



پرسش پیشنهادی

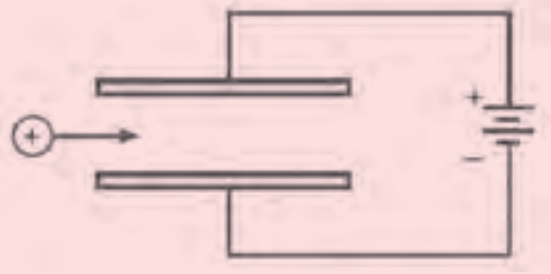
۱ در هر یک از حالت‌های شکل زیر جهت حرکت $\vec{V}$، جهت میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ و جهت نیروی وارد بر بار q (مثبت یا منفی) نشان داده شده است. نوع بار q را در هر حالت با علامت + یا − مشخص کنید.



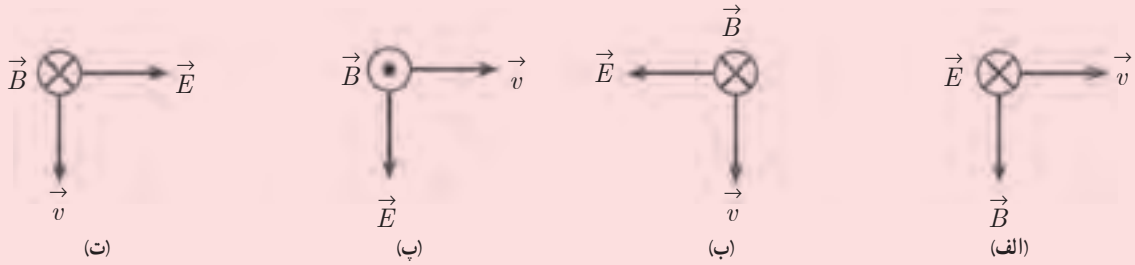
۲ **یون مثبتی مطابق شکل روبه‌رو به فضای بین صفحه‌های خازن مسطحی پرتاب می‌شود.**

الف) جهت نیروی الکتریکی وارد بر این یون را رسم کنید.

ب) میدان مغناطیسی یکنواخت $\vec{B}$ باید در چه جهتی اثر کند تا نیروی مغناطیسی وارد بر یون برخلاف جهت نیروی الکتریکی باشد؟ روی شکل جهت $\vec{B}$ را رسم کنید.



۳ یک دسته الکترون در فضایی که در آن میدان‌های یکنواخت $\vec{E}$ و $\vec{B}$ برقرارند با سرعت $\vec{v}$ حرکت می‌کند. اگر الکترون‌ها در مسیر مستقیم حرکت خود را حفظ کنند، کدام گزینه وضعیت $\vec{v}$، $\vec{E}$ و $\vec{B}$ را درست نشان می‌دهد؟



تمرین ۳ــ۱

۱ $\theta = ۳۰^\circ$, $B = ۳۲۰\,G = ۳/۲۰ \times ۱۰^{-۲}\,T$

$F = ۵/۱۲ \times ۱۰^{-۱۴}\,N$, $v = ?$

$F = qvB\sin\theta$

$۵/۱۲ \times ۱۰^{-۱۴}\,N = (۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}\,C)\,v\,(۳/۲۰ \times ۱۰^{-۲}\,T)\sin ۳۰^\circ$

$\Rightarrow v = ۲/۰ \times ۱۰^{۷}\,m/s$

پرسش ۳ــ۴

با توجه به قاعدهٔ درست و این که بار الکترون منفی است، جهت میدان $\vec{B}$ به‌صورت درون‌سو است.

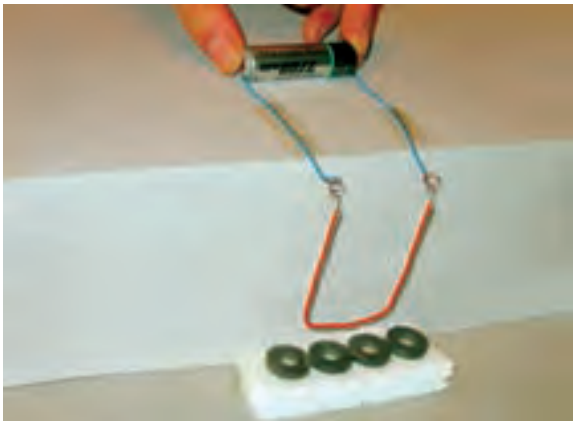
۳ــ۴ نیروی مغناطیسی وارد بر سیم حاوی جریان

راهنمای تدریس

از آنجا که دانش‌آموزان در علوم هشتم با موتورهای الکتریکی و همچنین در بخش قبل با نیروی مغناطیسی وارد بر ذرهٔ باردار متحرک درون میدان مغناطیسی آشنا شده‌اند، لذا توجه دانش‌آموزان به طرح سادهٔ موتور الکتریکی در شکل ۳ــ۱۱ می‌تواند شروع مناسبی برای این بخش باشد. دانش‌آموزان باید به جهت حرکت حامل بار درون سیم رسانا، قطب‌های باتری و جهت میدان $\vec{B}$ که حلقهٔ رسانا درون آن قرار دارد توجه کنند. این شکل به کمک آزمایش، در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ نیز انجام شده است که در سایت گروه فیزیک می‌توانید مشاهده کنید.

آزمایش ۳ــ۲

این آزمایش را هم به کمک روشی که در کتاب درسی آمده است می‌توانید انجام دهید (در صورت داشتن وسایل مشابه) همچنین می‌توانید با وسایل ساده‌تری مطابق آزمایشی که در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ انجام شده است دنبال کنید. (شکل زیر).



برای بررسی رابطهٔ ۳ــ۳، آزمایشی پیشنهاد می‌شود (شکل زیر) که شرح کامل آن را به همراه اجرا می‌توانید در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ در سایت گروه فیزیک مشاهده کنید.

پرسش ۳ــ۵

با توجه به فرض پرسش، سیم حامل جریان در جهت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، در این صورت $\theta = ۰$ و در نتیجه $\sin\theta = ۰$ و نیرویی بر سیم حامل جریان از طرف میدان $\vec{B}$ وارد نمی‌شود. اگر راستای سیم حامل جریان عمود بر میدان $\vec{B}$ قرار گیرد، در این صورت $\theta = ۹۰^\circ$ و $\sin ۹۰^\circ = ۱$ خواهد بود و در نتیجه نیروی وارد بر سیم حامل جریان از طرف میدان $\vec{B}$ بیشینه است.

تمرین ۳ــ۲

$l = ۲/۴\,\text{m}, I = ۲/۵\,\text{A}, B = ۰/۴۵\,\text{G}, \theta = ۹۰^\circ$

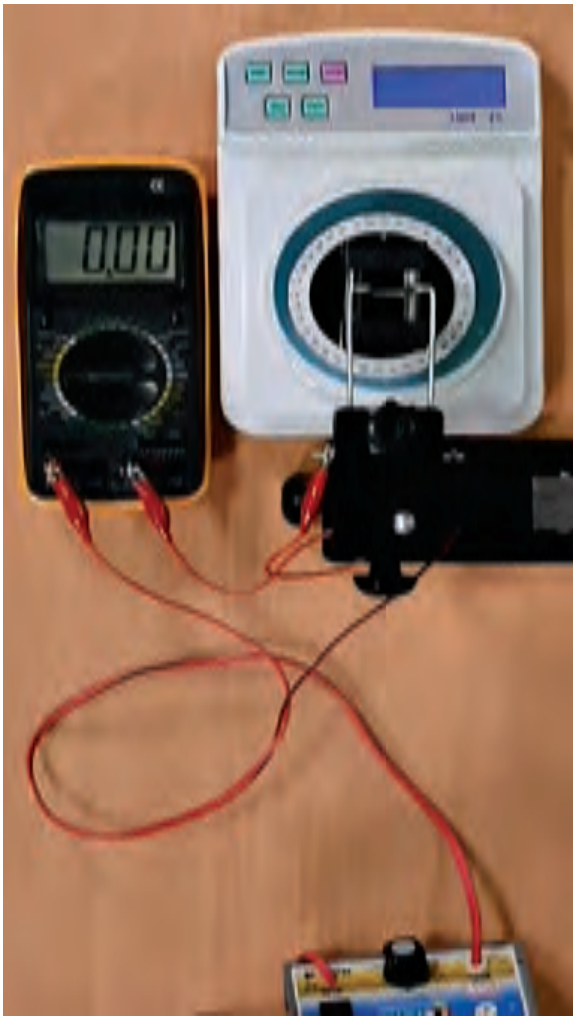
$$F = IlB\sin\theta = (۲/۵\,\text{A})\,(۲/۴\,\text{m})\,(۰/۴۵ \times ۱۰^{-۴}\,\text{T})\sin ۹۰^\circ$$

$$F = ۲/۷ \times ۱۰^{۴}\,\text{N}$$

با توجه به شکل داده شده در تمرین، جهت نیروی مغناطیسی درون صفحه و روبه پایین صفحه خواهد بود.

فعالیت ۳ــ۴

طرح آزمایش مرتبط با این فعالیت را می‌توانید در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ مشاهده کنید. شکل زیر نمای روبه بالایی از وسایل به‌کار رفته در این آزمایش را نشان می‌دهد.

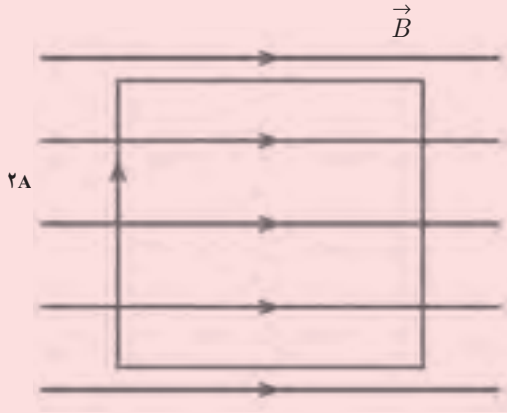


پرسش پیشنهادی

جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان را در هر یک از نمودارهای شکل زیر تعیین کنید.

(الف) (ب) (پ) (ت)

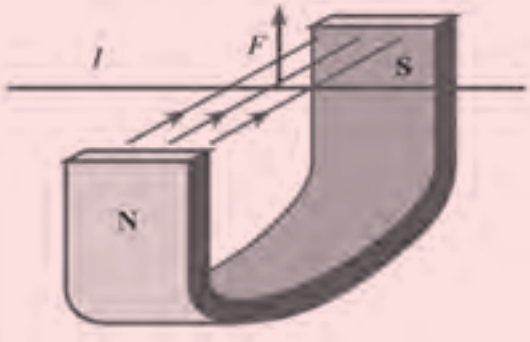
حلقه‌ای مربع شکل از سیم رسانا حامل جریان $2A$ است. این حلقه مطابق شکل روبه‌رو در میدان مغناطیسی یکنواختی به بزرگی $10mT$ واقع است به‌طوری که دو ضلع حلقه در امتداد میدان قرار دارند. طول هر ضلع مربع را $20cm$ در نظر بگیرید.



الف) جهت نیروی الکترومغناطیسی وارد بر هر ضلع حلقه در کدام جهت است؟

ب) بزرگی برایند نیروی وارد بر حلقه چه‌قدر است؟

با توجه به جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی شکل زیر، جهت جریان را در سیم تعیین کنید.

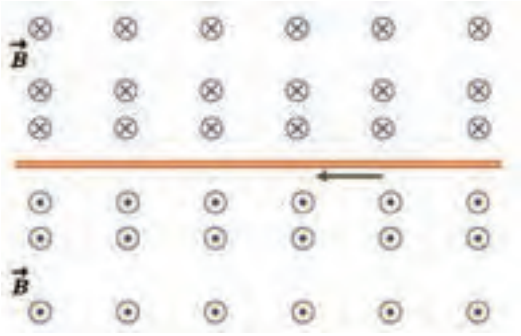


۳ــ۵ میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی

راهنمای تدریس : تا اینجا مقدمات لازم برای بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در بخش‌های قبل بررسی شده است. لذا ضرورت دارد که دانش‌آموزان آشنایی و تسلط کافی به محتوای بخش‌های قبلی داشته باشند. انجام آزمایش اورستد را که به نوعی آثار مغناطیسی جریان الکتریکی را نشان می‌دهد، می‌توان به شکل‌های مختلفی انجام داد که در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ موجود است و از طریق سایت گروه فیزیک می‌توانید آنها را مشاهده کنید. بنابراین پس از اشاره مختصری در خصوص این آزمایش و زمینه‌های تاریخی آن، شرایط را برای فعالیت گروهی دانش‌آموزان و انجام این آزمایش فراهم کنید.

پرسش ۳ــ۶

با توجه به قاعدهٔ دست راست، جهت جریان مشخص می‌شود (شکل زیر).



پرسش ۳ــ۷

انتظار می‌رود با توجه به مفهوم میدان و خطوط میدان، دانش‌آموزان در پاسخ به این پرسش به موارد زیر اشاره کنند :

شکل الف) خطوط میدان مماس بر مسیر میدان هستند و در فاصلهٔ مساوی از سیم حامل جریان، اندازهٔ میدان $\vec{B}$ ثابت است ولی جهت آن تغییر می‌کند. با افزایش فاصله از سیم حامل جریان، اندازهٔ میدان $\vec{B}$ نیز کاهش می‌یابد.

شکل ب) در این شکل به نوعی دیگر، کاهش اندازهٔ میدان $\vec{B}$ با افزایش فاصله از سیم حامل جریان نشان داده شده است و افزایش فاصله بین خطوط میدان دایروی، نیز به همین نکته اشاره دارد.

تمرین ۳ــ۳

در نقطهٔ a، میدان‌های ناشی از هر دو سیم حامل جریان برون سو است و برآیند آن نیز برون سو است.

در نقطهٔ b، میدان ناشی از سیم بالایی درون سو و میدان ناشی از سیم پایینی، برون سو است، لذا با توجه به اینکه فاصله b از دو سیم یکسان و جریان مساوی از دو سیم می‌گذرد، برآیند میدان در نقطهٔ b صفر است.

در نقطهٔ c، میدان ناشی از دو سیم و همچنین میدان برآیند درون سو است.

در شکل ۳ــ۱۶، خطوط میدان $\vec{B}$ اطراف دو سیم حامل جریان با توجه به الگوی دو ذرهٔ باردار رسم شده است. لازم است دانش‌آموزان توجه کنند که خطوط رسم شده حاصل میدان برآیند دو سیم حامل جریان است.

پرسش ۳ــ۸

با استفاده از قاعدهٔ دست راست و با توجه به جهت خطوط میدان $\vec{B}$ درون و بیرون حلقه، جهت جریان عبوری از حلقه، ساعت‌گرد است.

توجه

در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲، آزمایش پیشنهادی در خصوص نحوهٔ کار بلندگوها آمده است که می‌توانید آن را در سایت گروه فیزیک مشاهده کنید. چنانچه فرصت کافی داشته باشید، اجرای این آزمایش در کلاس می‌تواند ارتباط خوبی را بین مفاهیمی که در این فصل مطرح شده است، فراهم کند. همچنین دانش‌آموزان را با کاربرد این مفاهیم آشنا می‌سازد.

تمرین ۳ــ۴

$B = ۳ \times ۱۰^{-۸}\,G = ۳ \times ۱۰^{-۱۲}\,T$

$R = ۸cm = ۸ \times ۱۰^{-۲}\,m$

$I = ?$

$$B = \frac{\mu_۰ I}{۲R}$$

$$۳\times۱۰^{-۱۲}T = \frac{(۴\pi\times۱۰^{-۷}\,T.m/A)}{(۲\times۸\times۱۰^{-۲}\,m)}I$$

$$\Rightarrow I \approx ۳/۸ \times ۱۰^{-۳}A = ۳/۸mA$$

تمرین ۳ــ۵

$l = ۴۰/۰cm\ ,\ I = ۱/۲A$

$B = ۲۷۰G = ۲/۷ \times ۱۰^{-۲}\,T$

$N = ?$

$$B = \frac{\mu_۰ NI}{l}$$

$$۲/۷\times۱۰^{-۲}T = \frac{۴\pi\times۱۰^{-۷}\,T.m/A)N(۱/۲A)}{۰/۴۰m}$$

$$\Rightarrow N \approx ۷۰۰۰ \quad \text{دور}$$

فعالیت ۳ــ۶

آزمایشی مشابه این فعالیت در مجموعهٔ فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ انجام شده است که می‌توانید از نتایج و شیوهٔ آن نیز استفاده کنید.

۳ــ۶ ویژگی‌های مغناطیسی مواد

راهنمای تدریس: به‌طور کلی اتم‌های مواد یا به‌طور ذاتی دارای دوقطبی مغناطیسی‌اند یا فاقد آن هستند. توجه به این نگاه که اساس تقسیم مواد از لحاظ مغناطیسی است و در تمرین پایانی فصل نیز به‌صورت نقشهٔ مفهومی به آن پرداخته شده است، اهمیت زیادی دارد.

توجه

تقسیم‌بندی از لحاظ مغناطیسی، با توجه به چگونگی وجود آنها در طبیعت انجام می‌شود. برای مثال هیدروژن به‌صورت اتمی، دارای دوقطبی مغناطیسی ذاتی است ولی نکتهٔ قابل توجه این است که هیدروژن به‌صورت تک اتمی در طبیعت وجود ندارد و به‌صورت مولکولی H_2 در طبیعت یافت می شود. به همین دلیل هیدروژن جزو مواد دیامغناطیس رده‌بندی می‌شود.

عامل گشتاور دوقطبی ذاتی اتم‌ها به چرخش الکترون‌ها دور خودشان (حرکت اسپینی) و چرخش الکترون‌ها دور هسته (حرکت مدار) مربوط می شود. به عبارت دیگر گشتاور دوقطبی ذاتی اتم‌ها دارای دو مماس گشتاور اسپینی و گشتاور مداری است که سهم گشتاور اسپینی در این میان، خیلی بیشتر از سهم گشتاور مداری است.

فعالیت ۳ــ۷

در انجام این فعالیت باید به‌گونه‌ای لولهٔ آزمایش محتوی الکل طبی را روی سطح افقی میز قرار دهید تا حباب هوا درست در وسط آن قرار گیرد. سپس به کمک یک آهنربای قوی آزمایش را دنبال کنید. وقتی آهنربا را بالای حباب به یک طرف می‌کشید، به دلیل دیامغناطیس بودن الکل، الکل در جهت مخالف حرکت آهنربا، حرکت می‌کند و به نظر می‌رسد که حباب هوا در جهت حرکت آهنربا حرکت می‌کند. این فعالیت را به‌طور عمودی، مطابق آنچه در فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ انجام داده‌ایم، دنبال کنید. در این فیلم افزون بر مواد دیامغناطیس، آزمایش برای مواد پارامغناطیس نیز انجام شده است.

آلومینیم به عنوان یک ماده پارامغناطیس، به آرامی به طرف آهنربای قوی حرکت می‌کند.

شیشه به عنوان یک مادهٔ دیامغناطیس، به آرامی از آهنربای قوی دور می‌شود.

پرسش ۳ــ۹

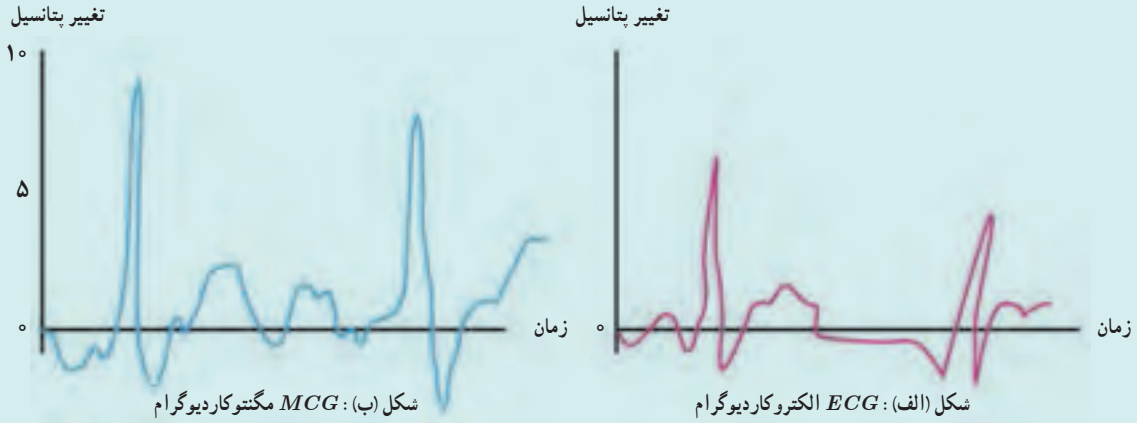
این پرسش به‌صورت آزمایش ساده‌ای در فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک انجام شده است و روی دلایل آنچه مشاهده می‌شود بحث شده است.

الف) چون میله‌ها از جنس ماده فرومغناطیس هستند، آهنربا می‌شوند و از یکدیگر دور می شوند.
ب) از آنجا که وقتی کلید باز می‌شود، میله‌ها به محل اولیه باز می‌گردند، نتیجه این می‌شود که میله‌ها از جنس فرومغناطیس نرم هستند.

دانستنی برای معلم

میدان‌های مغناطیسی بدن انسان

فعالیت الکتریکی عصب‌ها و عضله‌ها باعث تولید جریان‌های الکتریکی در بدن انسان می‌شود. در هر جایی که این جریان‌ها به سطح بدن می‌رسند، اختلاف پتانسیلی به وجود می‌آورند که با قرار دادن الکترودها در پوست قابل اندازه‌گیری است. الکتروکاردیوگرام ECG منحنی تغییرات اختلاف پتانسیل تولید شده در قلب برحسب زمان، و الکتروآنسفالوگرام EEG منحنی تغییرات اختلاف پتانسیل تولید شده در مغز برحسب زمان را نشان می‌دهد. ECG یک وسیلهٔ ضروری برای تشخیص بیماری‌های قلبی و EEG وسیلهٔ بسیار با ارزشی برای تشخیص بعضی اختلالات مغزی است.



شکل (الف) : ECG الکتروکاردیوگرام
شکل (ب) : MCG مگنتوکاردیوگرام

اشکال چنین اندازه‌گیری‌هایی در این است که پتانسیل‌های سطحی به‌طور غیرمستقیم به فعالیت اندام‌های داخلی بستگی دارند. پوست رسانای الکتریکی ضعیفی است و کسر بسیار کوچکی از جریان تولید شده در یک عضو به آن می‌رسد. برای نشان دادن جریان یک عضو به‌طور مستقیم، اخیراً دستگاه‌هایی ساخته شده است که می‌توانند میدان تولید شده به‌وسیلهٔ این جریان‌ها را اندازه‌گیری کنند.

جریان نسبتاً زیاد قلب، میدان مغناطیسی تقریبی ۱×۱۰^{-۶} گاوس را در اطراف قفسهٔ سینه به‌وجود می‌آورد و جریان‌های ضعیف در مغز، میدان مغناطیسی تقریبی ۳×۱۰^{-۸} گاوس را در اطراف سر تولید می‌کنند. این میدان‌ها از میدان مغناطیسی زمین (۰/۵ گاوس) یا حتی از میدان‌های مربوط به جریان‌های سیم‌های برق در منازل (۵×۱۰^{-۲} گاوس) ضعیف‌ترند و برای اندازه‌گیری آنها از روش‌های ویژه‌ای استفاده می‌شود.

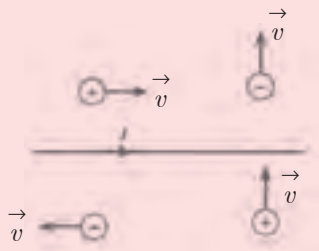
در یکی از این روش‌ها بدن انسان را در داخل اتاقی قرار می‌دهند که به وسیلهٔ دیوارهای آهنی از تأثیر میدان‌های مغناطیسی خارجی محفوظ است. روش دیگر، اندازه‌گیری اختلاف شدت میدان مغناطیسی در دو نقطهٔ نزدیک بدن است. اثر میدان‌های مغناطیسی دور در این نقطه یکسان‌اند و حذف می‌شوند، در حالی که میدان بدن انسان در نزدیکی انسان به‌طور قابل ملاحظه‌ای از یک نقطه به نقطه دیگر تغییر می‌کند و یکدیگر را حذف نمی‌کنند. در روش سوم، از این واقعیت استفاده می‌شود که قسمت اعظم میدان زمینه نسبت به زمان ثابت است و به راحتی از سیگنال متغیر قابل تشخیص است.

اندازه‌گیری به وسیله الکتروکاردیوگرام یا مگنتوکاردیوگرام MCG از اندازه‌گیری با الکتروآنسفالوگرام یا مگنتوآنسفالوگرام MEG بسیار راحت‌تر است. زیرا میدان مغناطیسی مغز بسیار ضعیف‌تر از میدان مغناطیسی قلب است.

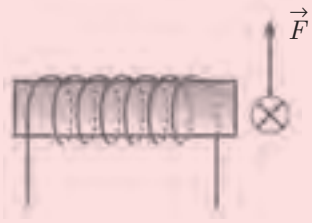
انتظار می‌رود که روش‌های آشکارسازی میدان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف، به‌تدریج کامل شوند و دریچهٔ کاملاً جدیدی را به روی اعمال انسان بگشایند.

پرسش های پیشنهادی

۱ در شکل زیر جهت نیروی وارد بر هر یک از ذره‌های باردار، ناشی از میدان مغناطیسی سیم حامل جریان، به کدام طرف است؟



۲ جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریانی که در نزدیکی سیملوله‌ای قرار دارد مطابق شکل زیر است. جهت جریان را در سیملوله تعیین کنید.



۳ سیم بلند و مستقیمی عمودبر صفحهٔ کتاب مطابق شکل روبه‌رو درون میدان مغناطیسی یکنواختی قرار دارد. برآیند میدان مغناطیسی در نقطهٔ ۳ صفر است.

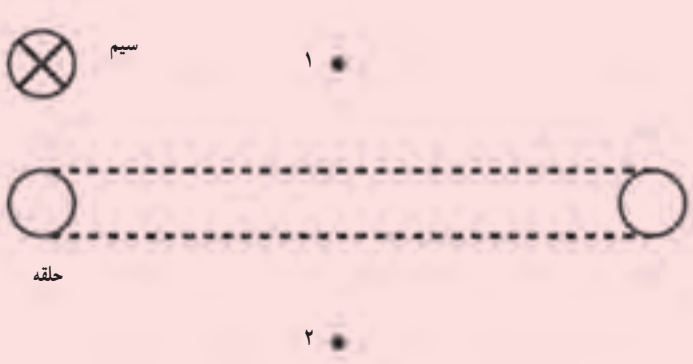
الف) جهت جریان الکتریکی را در سیم (روی شکل) مشخص کنید.

ب) فاصلهٔ نقطه‌های ۱ و ۲ از سیم همانند نقطهٔ ۳ و فاصلهٔ نقطه ۴ از سیم بیشتر از فاصلهٔ نقطهٔ ۳ از سیم است. در هر یک از نقطه‌های ۱، ۲ و ۴ میدان مغناطیسی ناشی از سیم و همچنین میدان برآیند را تعیین کنید.

۴ سیم بلند و مستقیمی که حامل جریان است درست بالای یکی از لبه‌های حلقهٔ حامل جریانی قرار دارد (شکل زیر). سیم و حلقه عمود بر صفحه کتاب‌اند و میدان مغناطیسی برآیند در نقطهٔ ۱ برابر صفر است.

الف) روی شکل جهت جریان را در حلقه مشخص کنید.

ب) به کمک یک نمودار برداری، میدان مغناطیسی ناشی از سیم، حلقه و برآیند آنها را در نقطهٔ ۲ تعیین کنید.



دانستنی برای معلم

مواد مغناطیسی

مواد با توجه به رفتارشان در یک میدان مغناطیسی خارجی به پنج دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از :
دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فری‌مغناطیس.
به‌طور کلی سه عامل در منشأ مغناطیسی مواد مؤثر است.

الف) گشتاور اسپینی

ب) گشتاور مداری الکترون‌ها

ج) گشتاور القایی ناشی از میدان مغناطیسی خارجی

دو مورد اوّل در خاصیت پارا، فرو، پادفرو و فری‌مغناطیسی مواد نقش اساسی دارد و مورد سوم در خاصیت دیامغناطیسی مواد.

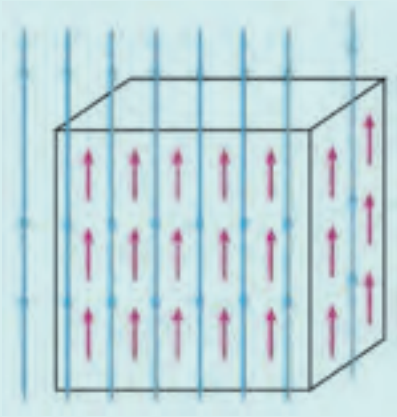
۱ **دیامغناطیسی** : هرگاه یک ماده در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرد برهم‌کنش بین الکترون‌های هر اتم و میدان مغناطیسی خارجی باعث القای یک گشتاور مغناطیسی در اتم می‌شود، این پدیده را دیامغناطیس می‌نامند. از آنجایی که همهٔ مواد از اتم تشکیل شده‌اند، این پدیده در تمام مواد رخ می‌دهد. اما این ساختار الکترونی اتم است که در وجود یا عدم وجود یک گشتاور مغناطیسی دائم یا غیردائم در اتم نقش دارد. پدیدهٔ دیامغناطیس در اتم‌های با پوستهٔ بسته که در آنها جمع‌برداری گشتاورهای مداری و اسپینی صفر است بیشتر نمایان می‌شود. جهت گشتاورهای مغناطیسی القایی در ماده، مطابق قانون لنز، در جهتی است که با حضور میدان مغناطیسی خارجی مخالفت می‌کند. بیسموت، بریلیم، متان، دی‌اکسید کربن، شیشه و... چند مادهٔ دیامغناطیس هستند.

۲ **پارامغناطیس** : مواد پارامغناطیس موادی با ویژگی‌های زیر می‌باشند :

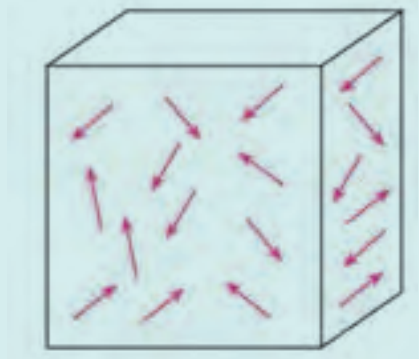
الف) پوستهٔ الکترونی اتم‌های آنها بسته نیست، بنابراین اتم‌های آنها دارای یک گشتاور مغناطیسی دائم‌اند که منشأ آن همان‌طور که گفته شد گشتاور اسپینی و مداری الکترون‌هاست.

ب) در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، جهت گشتاورهای دائمی اتم‌های آنها به‌طور کاتوره‌ای در داخل ماده توزیع شده‌اند. زیرا نیرویی که باعث جفت‌شدگی بین این گشتاورها در داخل ماده می‌شود ضعیف است. این نیرو به نیروی تبادلی موسوم است منشأ آن کوانتومی است.

ج) اگر این مواد در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرند، علاوه‌بر القای یک گشتاور مغناطیسی در اتم‌های آنها (پدیدهٔ دیامغناطیس)، تعدادی از گشتاورهای مغناطیسی دائم اتم‌ها در جهت میدان قرار می‌گیرند به طوری که با افزایش شدت میدان تعداد بیشتری از آنها با میدان هم‌راستا می‌شوند.



یک ماده پارامغناطیس در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی قوی.



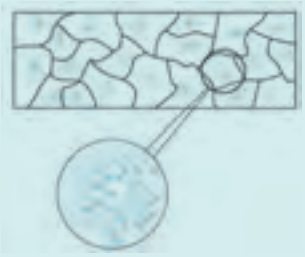
یک ماده پارامغناطیس در غیاب میدان مغناطیسی خارجی.

اگر میدان مغناطیسی خارجی خیلی قوی باشد همهٔ گشتاورهای مغناطیسی ماده در جهت میدان قرار می‌گیرند. با حذف میدان مغناطیسی خارجی دوباره جهت گشتاور مغناطیسی اتم‌های جسم به حالت کاتوره‌ای بازمی‌گردند.

منگنز، پلاتین، آلومینیوم، هوا و... جزء مواد پارامغناطیس محسوب می‌شوند.

۳ **فرو، پادفرو و فری‌مغناطیس** : اگر برهم‌کنش و نیروی تبادلی بین گشتاورهای مغناطیسی (ناشی از حرکت مداری و اسپینی الکترون‌ها در اتم‌های با پوستهٔ باز) قوی باشد جفت‌شدگی بین گشتاورهای مغناطیسی افزایش می‌یابد. مواد با توجه به نوع جهت‌گیری این گشتاورها به سه نوع فرو، پادفرو و فری‌مغناطیس تقسیم می‌شوند.

در مواد فرومغناطیس گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های ماده به‌صورت موازی و در یک جهت قرار می‌گیرند. این مواد در حالت عادی (در غیاب میدان مغناطیسی خارجی) دارای خاصیت مغناطیسی نیستند. زیرا هر ماده فرومغناطیس از حوزه‌های مغناطیسی زیادی تشکیل شده است که توسط دیواره‌هایی به نام دیوار بلوخ از یکدیگر جدا شده‌اند. به‌طوری که جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی در هر حوزهٔ مغناطیسی یکسان است ولی در مجموع گشتاور مغناطیسی برآیند کل نمونه (مغناطش نمونه) برابر صفر است.

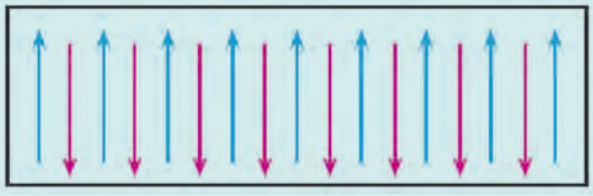


یک ماده فرومغناطیسی در غیاب میدان مغناطیسی

یک ماده فرومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی

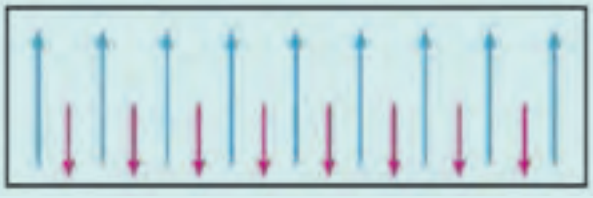
حال اگر یک مادهٔ فرومغناطیس را در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌دهیم، گشتاور مغناطیسی حوزه‌هایی که در جهت (یا تقریباً در جهت) میدان هستند هم‌جهت با آن قرار می‌گیرند، به‌طوری که با افزایش شدت میدان به تدریج گشتاورهای مغناطیسی حوزه‌های دیگر نیز در جهت میدان ردیف می‌شوند و در نهایت ماده به یک تک حوزهٔ مغناطیسی تبدیل می‌شود. با حذف میدان، پس از گذشت زمان کوتاهی ماده دوباره به حالت اولیه خود بازمی‌گردد و خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد. آهن، کبالت، نیکل، گادودیینم و دیسپرسیم جزء مواد فرومغناطیس محسوب می‌شوند.

مواد پادفرومغناطیس نیز از حوزه‌هایی تشکیل شده‌اند که هر حوزه نیز از شبکه‌هایی شامل دو زیر شبکهٔ A و B تشکیل شده است به‌طوری که جهت گشتاورهای مغناطیسی در زیر شبکه‌های A و B به‌صورت پاد موازی یکدیگرند (شکل زیر). موادی مانند MnO، MnS، FeO و... جزءِ مواد پادفرومغناطیس هستند.



یک حوزهٔ مربوط به ماده پادفرومغناطیس، در مواد پادفرومغناطیس برایند گشتاورهای مغناطیسی در هر شبکه صفر است.

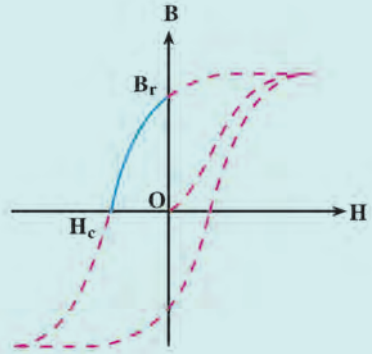
مواد فری‌مغناطیس نیز مانند مواد پادفرومغناطیس می‌باشند با این تفاوت که اندازهٔ گشتاورهای مغناطیسی در زیر شبکه‌های A و B با هم برابر نیستند و در نتیجه برایند گشتاورهای مغناطیسی در هر شبکه و حوزه مخالف صفر است (شکل ۴).



یک حوزهٔ مغناطیسی مربوط به مادهٔ فری‌مغناطیس، در مواد فری‌مغناطیس برایند گشتاورهای مغناطیسی در هر شبکه مخالف صفر است.

هرگاه یک مادهٔ فری‌مغناطیس در یک میدان مغناطیسی خارجی نسبتاً قوی قرار بگیرد برایند همهٔ گشتاورهای مغناطیسی اتم‌ها در راستای میدان قرار می‌گیرند. ویژگی مهم این مواد این است که با حذف میدان مغناطیسی خارجی دیگر گشتاورهای مغناطیسی (حوزه‌ها) به حالت اولیه بازنمی‌گردند و جسم خاصیت مغناطیسی را به‌صورت دائم در خود حفظ می‌کند (برخلاف مواد فرومغناطیس نرم که با حذف میدان، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند). این مواد در صنعت و فناوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند به‌طوری که به اختصار آنها را فریت می‌نامند. رابطهٔ شیمیایی این مواد به‌صورت MFe_2O_4 است، که در آن M یک کاتیون دو ظرفیتی است غالباً Zn، Fe، Ni، Cd، Cu و یا Mg است. معمولاً این مواد را فرومغناطیس سخت می‌نامند.

ویژگی مهم مواد فرو و فری‌مغناطیس : یکی از بارزترین مشخصات این مواد، منحنی مغناطیدگی یا چرخهٔ پسماند است که در آن تغییرات مغناطیدگی جسم $\vec{M}$ (گشتاور مغناطیسی ماده در واحد حجم یا جرم) را برحسب شدت میدان مغناطیسی خارجی $\vec{H}$ رسم می‌کنند. دلیل وجود این چرخه ناشی از وجود حوزه‌های مغناطیسی در این مواد است. برایند گشتاورهای مغناطیسی در هر حوزه مخالف صفر است ولی با توجه به اینکه گشتاورهای حوزه‌های مختلف در جهت‌های متفاوتی هستند، گشتاور برایند نمونه صفر است. (نقطه O در شکل زیر). حال اگر این مواد را در یک میدان مغناطیسی قرار دهیم و میدان را به تدریج افزایش دهیم، ابتدا حجم حوزه‌هایی که گشتاور مغناطیسی آنها با میدان هم‌جهت (یا تقریباً هم‌جهت) است زیاد می‌شود و با افزایش شدت میدان، گشتاورهای حوزه‌های دیگر نیز به تدریج می‌چرخند و در جهت میدان قرار می‌گیرند و سرانجام در یک میدان مغناطیسی نسبتاً قوی گشتاور مغناطیسی تمام حوزه‌ها با میدان مغناطیسی هم‌جهت می‌شوند و کل نمونه به‌صورت یک تک حوزهٔ مغناطیسی درمی‌آید. اکنون اگر میدان مغناطیسی خارجی را به تدریج کاهش دهیم گشتاورهای حوزه‌های مغناطیسی به حالت اولیه خود بازنمی‌گردند، یعنی در غیاب میدان مغناطیسی، مغناطیدگی، ماده صفر نمی‌شود و به عبارتی ماده از خود پسماند مغناطیسی نشان می‌دهد. در عمل به جای رسم منحنی $M-H$، منحنی $B-H$ را (که در آن B القای مغناطیسی درون ماده است) را رسم می‌کنند.



منحنی مغناطیدگی (یا چرخهٔ پسماند) یک مادهٔ فرو یا فری‌مغناطیس

در این نمودار B_r پسماند مغناطیسی در ماده است و H_e میدان وادارندهٔ جسم است که خاصیت مغناطیسی را در جسم حفظ می‌کند که معمولاً به آن نیروی وادارندگی می‌گویند. در مواد فرومغناطیس نیروی وادارندهٔ H_e کوچک است به همین دلیل با حذف میدان مغناطیسی خارجی جسم پس از مدت زمانی کوتاه به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. در حالی که در مواد فری‌مغناطیس نیروی وادارندهٔ H_e بزرگ است و مانع آن می‌شود که در غیاب میدان خارجی جسم خاصیت (باقی‌ماندگی) مغناطیسی خود را از دست بدهد. آن بخش از منحنی پسماند را که در ناحیهٔ دوم قرار دارد (خط پیوسته در شکل بالا) منحنی وامغناطیدگی جسم می‌نامند.

چرا مواد فری‌مغناطیس برای ذخیرهٔ اطلاعات مناسب‌اند؟ با توجه به آنچه گفته شد یک محیط مناسب برای ذخیره اطلاعات باید دارای شرایط زیر باشد :

الف) ذخیرهٔ مقدار زیادی اطلاعات در یک فضای کوچک (B_r بزرگ)

ب) حفظ این اطلاعات برای یک مدت زمان طولانی (H_c بزرگ)

ج) ذخیره و بازیابی اطلاعات با توان مصرفی کم

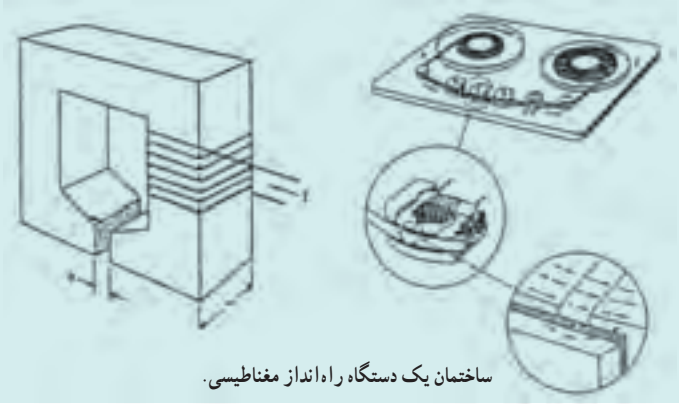
سه ویژگی بالا در مواد فری‌مغناطیس وجود دارد و از این جهت این مواد برای ذخیره اطلاعات مناسب‌اند.

تاریخچهٔ ضبط (ذخیره) مغناطیسی : ضبط مغناطیسی با استفاده از تبدیل نوسان‌های صوتی به نوسانات الکتریکی (توسط میکروفون و تقویت‌کننده) و تبدیل این جریان الکتریکی به یک میدان مغناطیسی توسط یک هد (که باید از جنس یک مادهٔ فرومغناطیس باشد) و اعمال این میدان مغناطیسی بر روی یک محیط مغناطیسی مناسب (از جنس یک مادهٔ فری‌مغناطیس) امکان‌پذیر است. ضبط صدای انسان نخستین‌بار در سال ۱۸۹۸ میلادی توسط پولسن (Poulsen) ابداع گردید. او نوسان‌های صوتی را توسط یک آهنربای الکتریکی که به یک میکروفون وصل شده بود بر روی یک میلهٔ فولادی (آهن با ۱ درصد کربن) ذخیره نمود. مجموعهٔ دستگاهی که ایشان فراهم نمود، به تلگرافون موسوم بود. عیب عمدهٔ این دستگاه نوفهٔ (Noise) زیاد در هنگام بازیافت اطلاعات ذخیره شده بود.

در سال ۱۹۲۰ با بهبود کیفیت تقویت‌کننده‌ها، بازیافت اطلاعات با نوفهٔ کمتری همراه شد. در سال ۱۹۲۱ با اختراع روش ضبط با پیش‌ولت ac این نوفه‌ها به میزان قابل توجهی کاهش یافت.

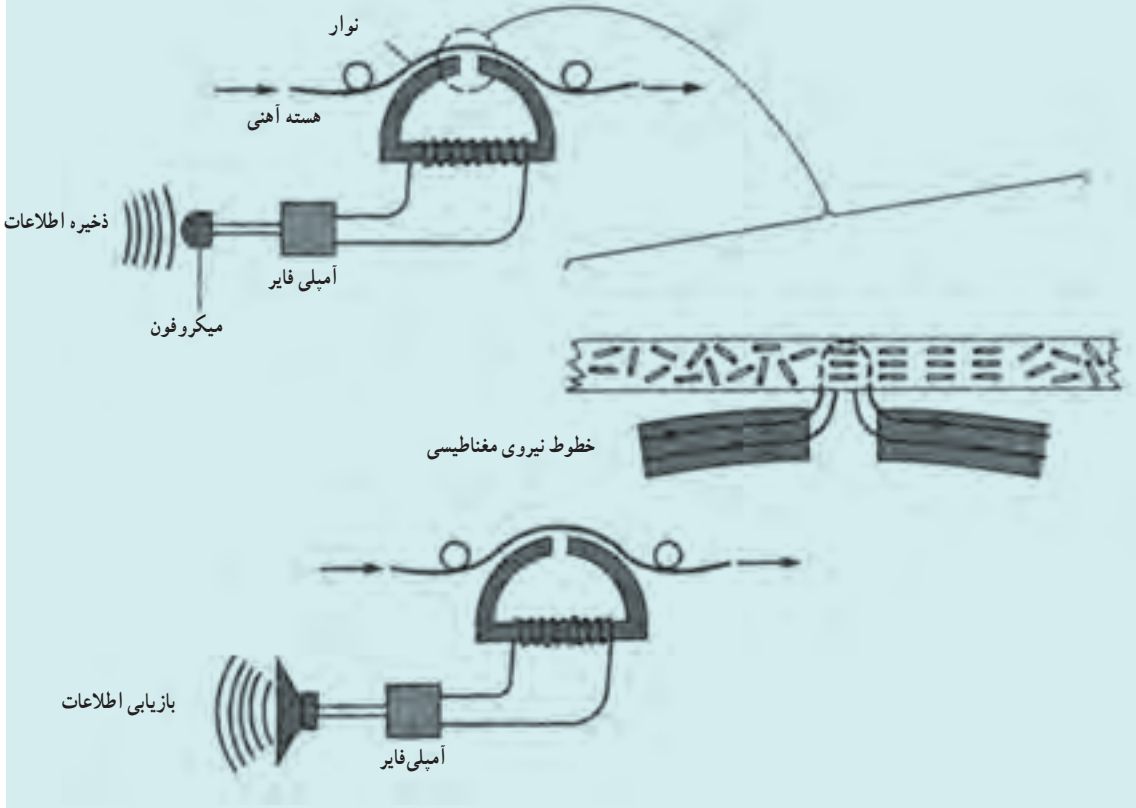
نوارهای ضبط شنیداری ATR نخستین‌بار با آغشته کردن یک نوار کاغذی مخصوص با یک مایع فری‌مغناطیس در سال ۱۹۲۷ توسط یک شرکت آمریکایی ابداع گردید و هم‌زمان در آلمان این نوارها با استفاده از نوار کاغذی آغشته به پودر آهن ساخته شدند. در سال ۱۹۴۷ با همکاری سه شرکت آمریکایی نوارهای اکسید آهن ابداع شدند و در سال ۱۹۵۰ نوارهای ضبط دیداری VTR و همچنین درایوهای دیسک مغناطیسی MDD ساخته شدند. در اواخر دههٔ ۱۹۶۰ میلادی نوارهایی از جنس دیوکسیدکروم و در اوایل دههٔ ۱۹۷۰ نیز نوارهایی از جنس اکسید آهن اصلاح شده با کبالت ساخته شدند. در اوایل دهه ۱۹۸۰ نیز نوارهای فلزی از جنس ذرات بسیار ریز فلزی (پودر آهن) به بازار عرضه شدند.

فرایند ذخیره و بازیابی اطلاعات از محیط‌های مغناطیسی : همان‌طور که گفته‌شد عمل ذخیره‌سازی مغناطیسی (اعم از صوتی و تصویری) با تبدیل نوسانات صوتی (تصویری) به نوسانات الکتریکی و تبدیل این جریان الکتریکی به یک میدان مغناطیسی توسط دستگاه راه‌انداز و اعمال این میدان بر روی یک محیط مغناطیسی مناسب امکان‌پذیر است (شکل زیر).



ساختمان یک دستگاه راه‌انداز مغناطیسی.

برای بازیافت اطلاعات فرایند بالا برعکس می‌شود. یعنی نوار را از مقابل یک راه‌انداز مغناطیسی عبور می‌دهند، در نتیجه بر اثر خاصیت مغناطیسی نوار، یک میدان مغناطیسی در دستگاه راه‌انداز القا می‌شود و این میدان مغناطیسی باعث ایجاد یک جریان الکتریکی می‌شود که توسط یک مبدل به نوسان‌های صوتی تبدیل می‌شود (شکل صفحهٔ بعد).



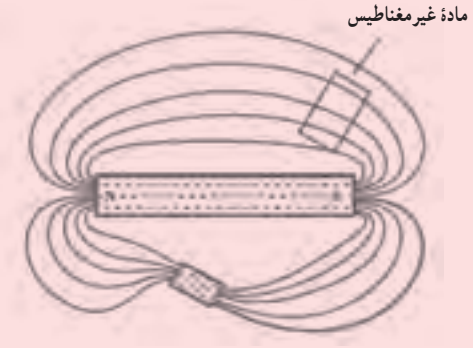
فرایند ذخیره و بازخوانی اطلاعات

پرسش‌های پیشنهادی

۱ در شکل روبه‌رو تأثیر وجود یک مادهٔ غیرمغناطیسی (مانند شیشه) و یک مادهٔ مغناطیسی (مانند آهن) در اطراف یک آهنربای میله‌ای نشان داده شده است.

الف) سمت‌گیری تقریبی دوقطبی‌های مغناطیسی را در هر یک از این دو ماده با رسم شکل نشان دهید.

ب) قطب‌های القا شده در قطعهٔ آهن را تعیین کنید.



۲ الف) در شکل‌های زیر (الف و ب) سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی در دو مادهٔ مختلف را در مقیاس خیلی ریز نشان داده است. تفاوت‌های هر ماده را از لحاظ مغناطیسی بنویسید.

(الف)

(ب)

ب) در صورتی که مادهٔ (الف) درون یک میدان مغناطیسی ضعیف قرار گیرد، چه تغییری در سمت‌گیری دوقطبی‌های آن رخ می‌دهد؟ در صورتی که میدان مغناطیسی قوی باشد، چطور؟

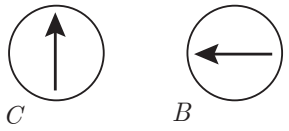
پ) اگر مادهٔ (ب) یک آهنربای میله‌ای باشد، قطب‌های آن را در دو طرف آهنربا تعیین کنید.

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

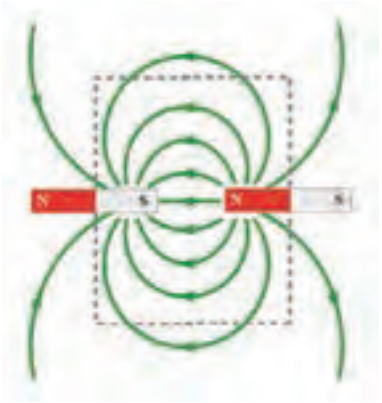
۱ دانش‌آموزان با توجه به شکل ۳ــ۶ می‌توانند، جهت قطب‌های آهنربا را به سادگی تعیین کنند.

۲ الف) اندازهٔ میدان در نقطه A حداقل ممکن و نزدیک به صفر است.

ب)



پ)



۳ الف) ۱ــ استفاده از یک آهنربا با قطب‌های مشخص

۲ــ استفاده از قطب نما

ب) با توجه به تراکم خطوط میدان در مجاورت قطب‌ها آهنربای ۲، اندازه میدان $\vec{B}$ این آهنربا از آهنرباهای (۱) بیشتر است.

۴ الف) نوک ثابت آهنی بر اثر پدیدهٔ القای مغناطیسی، به آهنربا تبدیل می‌شود.

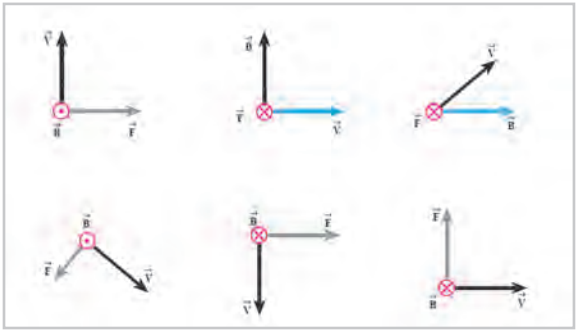
ب) به علت آنکه آهن مادهٔ فرومغناطیس نرم است به راحتی به آهنربا تبدیل می‌شود و قادر خواهد بود قطعهٔ بلعیده شده را جذب و به بیرون بکشد.

پ) به علت اینکه مجرای گلو دارای فرورفتگی و برآمدگی است.

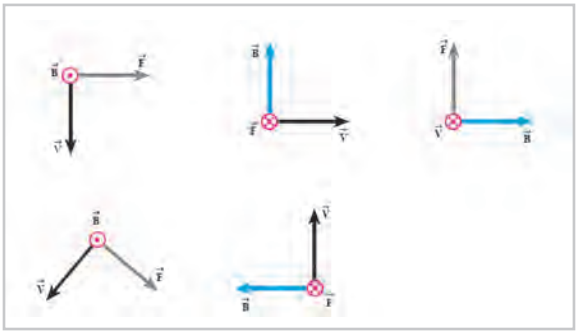
ت) گیرهٔ آهنی کاغذ را می‌توان بیرون آورد زیرا مادهٔ فرومغناطیس نرم است و جذب آهنربا می‌شود.

۵ با استفاده از قاعدهٔ دست راست، نوع بار هر ذره را تعیین می‌کنیم زیرا ذرهٔ ۱ بار مثبت، ذره‌های ۲ و ۴ بار منفی و ذرهٔ ۳ چون از مسیر خود منحرف نشده است، خنثی است.

۶



۷



۸ پاد ساعتگرد

۹ $V = ۴/۴ \times ۱۰^{۶}\ \text{m/s}\ ,\ B = ۱۸\text{mT}\ ,\ \theta = ۶۰^{\circ}$

الف) $F = qvB\sin\theta = (۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}\ c) \times (۴/۴ \times ۱۰^{۶}\ \text{m/s}) \times (۱۸ \times ۱۰^{-۳}\ T)\ \sin ۶۰^{\circ} \approx ۲/۵ \times ۱۰^{-۱۵}\ \text{N}$

ب)

$$F = ma \Rightarrow a = \frac{۲/۵ \times ۱۰^{-۱۵}\ \text{N}}{۱/۷ \times ۱۰^{-۲۷}\ \text{kg}} = ۱/۴ \times ۱۰^{۱۲}\ \text{m/s}^{۲}$$

۱۰ $v = ۲/۴ \times ۱۰^{۵}\ \text{m/s}\ ,\ F_{max} = ۶/۸۷۱ \times ۱۰^{-۱۴}\ N\ ,\ B = ?$

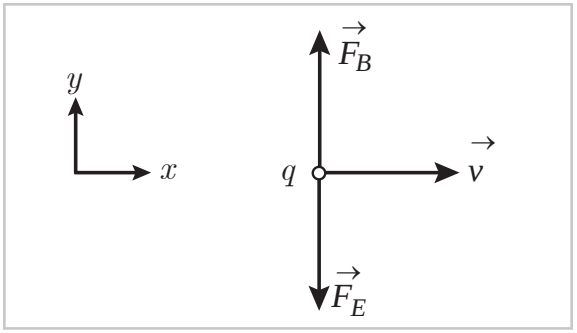
$F = qvB\sin\theta \Rightarrow ۶/۸ \times ۱۰^{-۱۴}\ \text{N} = (۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}\ C)\ (۲/۴ \times ۱۰^{۵}\ \text{m/s})\ B$

$\Rightarrow \text{B} \simeq ۱/۷\ \text{T}$

چون اندازهٔ نیروی وارد بر الکترون بیشینه فرض شده است $\sin\theta = ۱$ گرفته‌ایم. جهت میدان به سمت غرب است (به بار منفی الکترون توجه شود).

۱۱ برای اینکه ذرهٔ باردار در همان امتداد محور x به حرکت خود ادامه دهد، مطابق شکل باید $F_E = F_B$. در این صورت داریم

$$qE = qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B} = \frac{۴۵۰\text{N}}{۰/۱۸\text{T}} = ۲۵۰۰\ \text{m/s}$$



۱۲ با استفاده از قاعده دست راست، جهت نیرو

الف) به سمت داخل صفحه (درون سو) است.

ب) به سمت بالا.

پ) به سمت بالا.

۱۳ میله در همان لحظهٔ وصل کلید، روبه جلو پرتاب می‌شود. دانش‌آموزان با توجه به قاعدهٔ دست راست و جهت جریان و میدان $\vec{B}$، باید جهت نیروی وارد بر میله را تعیین کنند.

۱۴ $l = ۲\text{m}\ ,\ B = ۰/۵\ \text{T}\ ,\ F = ۱\text{N}\ ,\ I = ?$

$F = IlB\sin\theta \Rightarrow ۱\text{N} = I(۲\text{m})\,(۰/۵\text{T})\sin ۹۰^\circ$

$\Rightarrow I = ۱\text{A}$

جهت جریان از D به C است.

۱۵ $I = ۱/۶A\ ,\ B = ۰/۰۵\text{mT} = ۰/۰۵ \times ۱۰^{-۳}\ \text{T}$

الف) $F = IlB\sin\theta = (۱/۶A)\,(۱\text{m})\,(۰/۰۵ \times ۱۰^{-۳}\ \text{T})\sin ۹۰^\circ$

$= ۸ \times ۱۰^{-۵}\text{N}$

ب) $F = mg \Rightarrow IlB\sin\theta = mg$

$I(۱\text{m})\,(۰/۰۵ \times ۱۰^{-۳})\sin ۹۰^\circ = (۸ \times ۱۰^{-۳}\ \text{kg})\,(۹/۸\text{N/kg})$

$\Rightarrow I = ۱۵۶۸\text{A}$

که جریان بسیار بزرگی است.

۱۶ با بستن کلید، سیملوله آهنربا می‌شود و با توجه به جهت جریان در آن، پایین سیملوله قطب N و بالای آن قطب S می‌شود. بنابراین قطب N آهنربای آویزان به طرف سیملوله کشیده می‌شود.

۱۷ با قرار دادن باتری A درون مدار، جهت خطوط میدان حاصل از سیم حامل جریان سبب انحراف عقربهٔ مغناطیسی به طرف چپ می‌شود.

۱۸ باتری A، با توجه به جهت جریان در سیملوله، سمت راست سیملوله قطب S می‌شود و آهنربای آویزان را به سمت خود جذب می‌کند.

۱۹ جهت میدان $\vec{B}$ ناشی از سیم ۱ در نقطه A درون‌سو است. بنابراین باید جهت میدان ناشی از سیم ۲ در نقطه A برون‌سو باشد تا برآیند آنها بتواند صفر شود.

بنابراین باید جهت جریان در سیم ۲، بر خلاف جهت جریان در سیم ۱ باشد.

۲۰ $N = ۲۵۰$ حلقه $,\ l = ۰/۱۴\text{m}\ ,\ I = ۰/۸\text{A}\ ,\ B = ?$

$$B = \frac{\mu_۰ NI}{l} = \frac{(۴\pi \times ۱۰^{-۷}\,T.\text{m/A})(۲۵۰)(۰/۸\,\text{A})}{۰/۱۴\text{m}} \approx ۱/۸ \times ۱۰^{-۳}\,\text{T}$$

۲۱ $N_P = ۲۰۰\ ,\ N_Q = ۳۰۰\ ,\ I_Q = ۱\text{A}\ ,\ I_P = ?$

$l_P = l_Q$

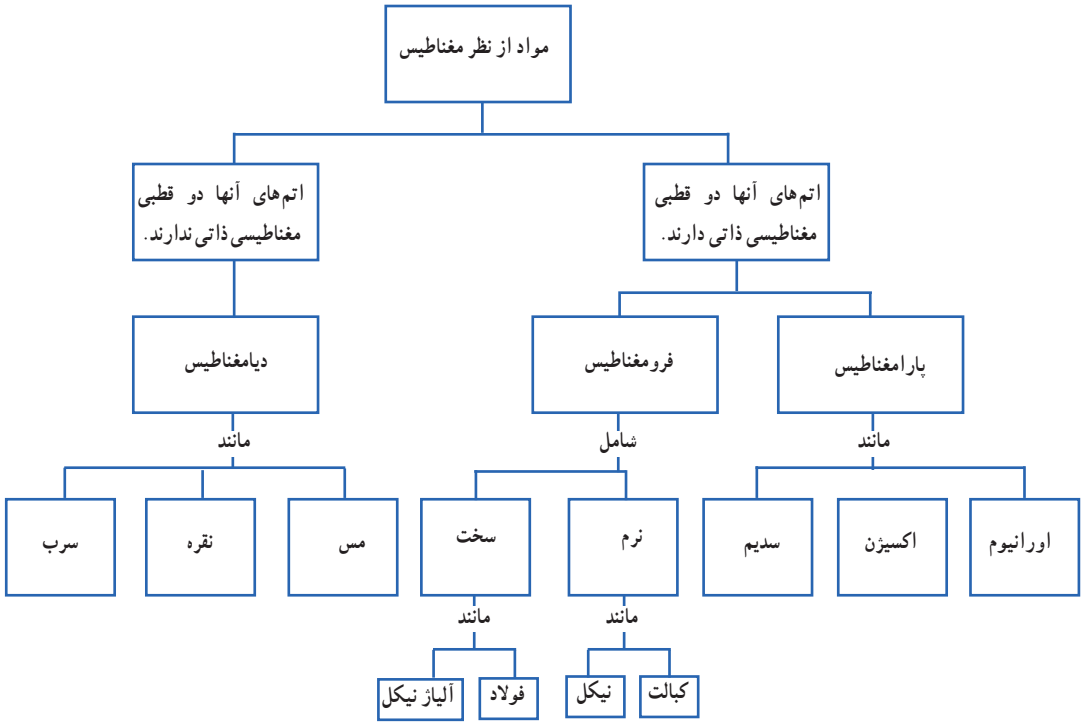
شرط صفر بودن برآیند میدان $\vec{B}$ ناشی از دو سیملوله در نقطهٔ M عبارت است از

$$B_P = B_Q \Rightarrow \frac{\mu_۰ N_P I_P}{l_P} = \frac{\mu_۰ N_Q I_Q}{l_Q}$$

$$\Rightarrow ۲۰۰ I_P = ۳۰۰ \times ۱\text{A} \Rightarrow I_P = \frac{۲}{۳}\text{A}$$

۲۲ چون پس از حذف $\vec{B}$ ، جهت‌گیری حوزه‌های مغناطیسی مادهٔ فرومغناطیسی به‌طور کاتوره‌ای درآمده است نوع مادهٔ فرومغناطیس، نرم است.

۲۳ با توجه به آنچه در بخش ویژگی‌های مغناطیسی مواد دیدید، نقشه مفهومی زیر را کامل کنید.



فصل چهارم

القای الکترومغناطیسی و جریان متناوب

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- با پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی و کاربردهای آن در زندگی روزمره (مثل تولید جریان متناوب) آشنا می‌شوند.
- با عامل‌های مؤثر بر اندازهٔ جریان القایی و چگونگی تعیین جهت آن آشنا می‌شوند.
- با اثر خودالقاوری و ضریب خودالقاوری سیم‌لوله آشنا می‌شوند.
- با پدیدهٔ القای متقابل آشنا می‌شوند.
- با جریان متناوب و ویژگی‌های آن آشنا می‌شوند.
- با اساس کار مبدل‌ها و انواع آنها آشنا می‌شوند.

چه شناختی مطلوب است؟

- اساس کار مولدها برای تولید جریان الکتریکی، قانون القای الکترومغناطیسی فاراده است.
- با تغییر سطح، چرخاندن و یا تغییر میدان مغناطیسی، می‌توان در یک پیچه جریان الکتریکی القا کرد.
- شار مغناطیسی کمیتی نرده‌ای است و برای میدان یکنواخت $\vec{B}$ از رابطهٔ $\Phi = AB\cos\theta$ به دست می‌آید.
- هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار مغناطیسی تغییر می‌کند، بیشتر باشد، جریان کوچک‌تری در آن القا می‌شود.
- جهت جریان القایی را در یک مدار، می‌توان به کمک قانون لنز تعیین کرد.
- از القاگرها می‌توان برای تولید میدان مغناطیسی و همچنین ذخیرهٔ انرژی استفاده کرد.
- یکی از کاربردهای مهم اثر القای الکترومغناطیسی فاراده، تولید جریان متناوب است.
- یکی از مزیت‌های مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac، بسیار آسان‌تر از dc است.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید درنظر گرفته شوند؟

- چه عواملی سبب القای جریان الکتریکی در یک پیچه می‌شود؟
- شار مغناطیسی گذرنده از یک پیچه به چه عواملی بستگی دارد؟
- یکای شار مغناطیسی در SI چیست؟
- چگونه به کمک قانون لنز می‌توان جهت جریان القایی در یک پیچه را تعیین کرد؟
- نقش القاگرها در یک مدار الکتریکی چیست؟
- پدیدهٔ خودالقاوری چیست؟
- ترجیح جریان ac بر dc در توزیع توان الکتریکی چیست؟

در پایان این واحد یادگیری دانش‌آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می‌کنند؟

دانش‌آموزان خواهند دانست که :

- پدیدهٔ القای مغناطیسی اساس تولید جریان الکتریکی است.
- شارعبوری از یک پیچه به چه عواملی بستگی دارد.
- به کمک قانون لنز چگونه می‌توان جهت جریان القایی را پیدا کرد.
- انرژی مغناطیسی ذخیره شده در یک القاگر به چه عواملی بستگی دارد.
- ضریب القاوری یک القاگر به چه عواملی بستگی دارد.
- نقش مفید و مضر القای متقابل در مدارهای الکترونیکی در چیست.
- سازوکار تولید جریان متناوب چگونه است.

دانش‌آموزان قادر خواهند بود :

- کاربرد پدیدهٔ القای الکترو مغناطیسی را بیان کنند و به کمک آزمایش پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی را نشان دهند.
- اثر سطح، تعداد دور و زاویهٔ سطح با $\vec{B}$ را در پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی با انجام آزمایش‌های ساده نشان دهند.
- نقش مقاومت پیچه یا سیم‌لوله را در تولید جریان متناوب بیان کنند و به طور تجربی آن‌را بررسی کنند.
- پدیدهٔ خود القاوری را شرح دهند و به کمک آزمایش آن را نشان دهند.
- نقش ضریب القاوری را در ذخیرهٔ انرژی در یک القاگر توضیح دهند.
- اهمیت انتقال انرژی الکتریکی را به روش متناوب بیان کنند.
- با ساخت یک مبدل با تعداد دور متفاوت، ولتاژ دوسر یک باتری را به گونه‌ای تغییر دهند که مناسب مصرف‌کننده باشد.

بودجه‌بندی پیشنهادی

جلسهٔ اول : بررسی تصویر شروع فصل + مقدمهٔ فصل + بخش ۴ــ۱
جلسهٔ دوم و سوم : بخش ۴ــ۲
جلسهٔ چهارم : بخش ۴ــ۳
جلسهٔ پنجم تا هفتم : بخش ۴ــ۴ تا پایان فصل
جلسهٔ هشتم : ارزشیابی فصل ۴
بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴ را در هر جلسه توزیع کنید و یا برای پرسش‌ها و مسئله‌های باقیمانده، قبل از ارزشیابی فصل، یک جلسه اختصاص دهید.
توجه : برای آزمایش‌های پیشنهادی در راهنمای معلم (که در نسخهٔ ویدیویی این فصل نیز انجام شده است) ترجیحاً مدت زمان یک جلسه را در طول تدریس این فصل منظور کنید.

توجه دانش‌آموزان را به تصویر ورودی فصل و متن زیر آن جلب کنید تا به اهمیت دانشی که در این فصل می‌آموزند آگاه شوند. این تصویر به کاربردهای مفاهیم این فصل(القای الکترومغناطیسی) اشاره دارد. افزون بر این کاربرد می‌توانید با مثال‌های کاربردی دیگر، زمینهٔ مناسبی را برای ورود به فصل آماده سازید.

راهنمای تدریس : ابتدا توجه دانش‌آموزان را به تصویر ورودی فصل و متن زیر آن جلب کنید تا زمینهٔ مناسب برای ورود به فصل فراهم شود.
برای بررسی بیشتر این موضوع، مطابق آزمایش پیشنهادی که در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های فیزیک ۲ آمده است، ابتدا به کمک دانش‌آموزان بررسی کنید که نوار سیاه رنگ پشت کارت‌های بانکی، یک نوار مغناطیسی با خاصیت آهنربایی نسبتاً ضعیف است. در ادامه می‌توانید از دانش‌آموزان سؤال کنید که به نظر آنها : چگونه کشیدن کارت درون شکاف کارت‌خوان، سبب خواندن اطلاعات روی کارت می‌شود؟

در ادامه دانش‌آموزان با جزئیات بیشتری می‌توانند به پرسش زیر تصویر پاسخ دهند و دلیل کشیده شدن کارت بانکی را درون دستگاه کارت‌خوان توضیح دهند.

افزون بر مثال مربوط به کارت‌خوان، می‌توانید به کاربردهای دیگری از پدیده القای الکترومغناطیسی اشاره کنید. مثلاً در فروشگاه‌های بزرگ لباس برای جلوگیری از به‌سرقت رفتن لباس‌ها امروزه در ورودی فروشگاه دروازه‌هایی تعبیه می‌شود و روی هر یک از لباس‌ها هم یک قطعهٔ فلزی نصب می‌کنند.

اگر لباسی که فروشنده قطعهٔ محافظ آن را جدا نکرده باشد از دروازه بگذرد آژیر به صدا درمی‌آید. در ورودی فرودگاه یا مکان‌های مهم امنیتی که می‌خواهند وجود اشیای خاص فلزی مثل انواع اسلحه‌های سرد و گرم را ردیابی کنند به جای بازدید بدنی افراد را از دروازهٔ یک دستگاه آشکارساز فلز عبور می‌دهند. در این‌گونه مواقع از افراد می‌خواهند تا قبل از ورود به دستگاه وسایل فلزی همراه خود را تحویل دهند.

۴ــ۱ــ پدیده القای الکترومغناطیسی

راهنمای تدریس : مطابق الگوی کتاب، ابتدا به کمک آزمایش دانش‌آموزان را با پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی فاراده آشنا کنید. این آزمایش را به شکل‌های مختلف و با ابزارهای متفاوتی می‌توان انجام داد که تعدادی از این روش‌ها در مجموعه فیلم‌های مرتبط با آزمایش‌های کتاب فیزیک ۲ موجود است و از طریق سایت گروه فیزیک می‌توانید به آنها دسترسی داشته باشید. از آنجا که آهنرباهای دائم به شکل فعلی در اختیار فاراده نبود، مطابق شکل ۴ــ۱، وی از آهنربای الکتریکی برای مشاهده و بررسی این پدیده استفاده کرد.

آشکارسازهای فلز در ورودی فرودگاه یا ساختمان‌های دولتی

در هنگام ورود به یک فرودگاه معمولاً چمدان‌ها و وسایل را از دستگاه پرتو X عبور می‌دهیم و خودمان از آشکارساز فلز می‌گذریم.

آشکارسازهای فلزی در همهٔ فرودگاه‌ها معمولاً از نوع PI (Pulse Induction) است. در این نوع آشکارسازها پیچه‌هایی از سیم در دو طرف دروازه به‌عنوان فرستنده و گیرنده گذاشته می‌شوند که در آنها متناوباً جریان‌هایی فرستاده می‌شود. هر تپ جریان الکتریکی که تغییرات چند میکروثانیه‌ای دارد میدان مغناطیسی کوچک و متغیری تولید می‌کند. تغییر میدان مغناطیسی روی پیچهٔ مقابل جریان دیگری القا می‌کند. این جریان القایی را تپ بازتابی می‌نامیم که فقط حدود ۳۰ میکروثانیه دوام دارد. سپس تپ بعدی ارسال و این فرآیند دوباره تکرار می‌شود. در این آشکارسازها معمولاً در هر ثانیه حدود ۱۰۰ تپ فرستاده می‌شود. البته تعداد تپ‌های ارسالی بسته به کارخانهٔ سازنده می‌تواند از ۲۵ تا ۱۰۰۰ تپ در ثانیه باشد.

اگر وسیله‌ای فلزی در بین دروازه‌های این آشکارسازها قرار گیرد میدان مغناطیسی متغیر روی آن جریانی القا می‌کند که سوی آن به‌گونه‌ای است که میدان مغناطیسی اولیه را تضعیف کند و تجهیزات الکترونیکی این تغییر میدان را ثبت و مدار آژیر را فعال می‌کنند.

چنانچه یک کلاف سیم برق‌کشی در اختیار داشته باشید، دوسر کلاف را به یک گالوانومتر حساس یا میلی ولت‌سنج وصل کنید. در حضور یک میدان مغناطیسی نسبتاً قوی (ایجاد شده توسط آهنربای دائم یا آهنربای الکتریکی) حالت‌های مختلف شکل ۴ــ۲ و شکل ۴ــ۳ (کتاب درسی) را انجام دهید تا دانش‌آموزان با عوامل متفاوتی که می‌توانند منجر به ایجاد نیروی محرکهٔ القایی یا جریان القایی به‌طور عملی آشنا شوند و قانون القای الکترومغناطیسی فاراده را تحقیق کنید.

۴ـ۲ـ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده

راهنمای تدریس : با انجام فعالیت‌های ساده‌ای مطابق شکل‌های الف و ب، می‌توانید دانش‌آموزان را با مفهوم شار و کمیت‌های وابسته به آن آشنا کنید.

در شکل الف، سطح حلقه بر جریان آب خروجی عمود است، در شکل ب نیم‌خط عمود بر سطح حلقه با امتداد جریان آب، زاویه می‌سازد و در شکل پ از دو حلقه با سطح متفاوت استفاده شده است. همان‌طور که در «قسمت توجه» نیز اشاره شده است برای رسم نیم‌خط عمود بر یک سطح دو جهت وجود دارد که انتخاب هر کدام به یک اندازه مفید است ولی در حل یک مسئله، همواره باید به انتخاب یک جهت پایبند باشیم. شکل زیر می‌تواند درک خوبی از نیم‌خط عمود بر سطح حلقه برای دانش‌آموزان فراهم کند.

(الف) (ب)

تمرین ۴ــ۱

الف)

$A_۱ = ۲۵\text{cm}^۲ = ۲/۵\times ۱۰^{-۳}\text{m}^۲$

$B = ۰/۰۳\text{T}\ ,\ \Phi_۱ = ?\ ,\ \theta = ۰$

$\Phi_۱ = BA_۱\cos\theta$

$= (۰/۰۳\text{T})(۲/۵\times ۱۰^{-۳}\text{m}^۲)\cos ۰^\circ$

$= ۷/۵\times ۱۰^{-۵}\text{Wb}$

ب)

$A_۲ = ۱/۰\times ۱۰^{-۳}\text{m}^۲\ ,\ \Phi_۲ = ?$

$\Phi_۲ = BA\cos\theta = ۳/۰\times ۱۰^{-۵}\text{Wb}$

پ)

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{(۳/۰ - ۷/۵)\times ۱۰^{-۵}\,\text{Wb}}{۰/۲\text{s}} = -۲/۲۵\times ۱۰^{-۵}\,\text{Wb/s}$$

پرسش ۴ــ۱

هدف از این پرسش این است که قبل از معرفی رابطهٔ قانون القای فاراده، دانش‌آموزان با یکای آهنگ تغییرات شار (Wb/s) که از جنس نیروی محرکهٔ الکتریکی است (با یکای ولت) آشنا شوند.

تمرین ۴ــ۲

$\Delta t = ۰/۴۵\text{s}$, $A = ۱۰۰\text{cm}^۲$

$B_۱ = ۰/۲۸\text{T}$ رو به بالا

$B_۲ = ۰/۱۷\text{T}$ رو به پایین

(جهت بالا را مثبت فرض کرده‌ایم.)

الف)

$\bar{\mathscr{E}} = ?$

$$\bar{\mathscr{E}} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

تغییرات شار ناشی از تغییرات جهت و اندازهٔ میدان است.

به این ترتیب

$$\Phi_۱ = B_۱A\cos\theta_۱ = (۰/۲۸\text{T})(۱۰^{-۲}\text{m}^۲)\cos ۰^\circ$$
$$= ۲/۸\times۱۰^{-۳}\text{Wb}$$
$$\Phi_۲ = B_۲A\cos\theta_۲ = (۰/۱۷\text{T})(۱۰^{-۲}\text{m}^۲)\cos ۱۸۰^\circ$$
$$= -۱/۷\times۱۰^{-۳}\text{Wb}$$
$$\Delta\Phi = \Phi_۲ - \Phi_۱ = -۱/۷\times۱۰^{-۳}\text{Wb} - ۲/۸\times۱۰^{-۳}\text{Wb}$$
$$= -۴/۵\times۱۰^{-۳}\text{Wb}$$

$$\bar{\mathscr{E}} = -\frac{(-۴/۵\times۱۰^{-۳}\text{Wb})}{۰/۴۵\text{s}} = ۱۰^{-۲}\text{V}$$

ب)

$$I = |\bar{\mathscr{E}}|/R = (۱۰^{-۲}\text{v})/(۱۰\Omega) = ۱۰^{-۳}\text{A} = ۱\text{mA}$$

پرسش ۴ـ۲

دانش‌آموزان با توجه به آشنایی با پدیدهٔ القای الکترومغناطیسی فاراده به سادگی می‌توانند به این پرسش پاسخ دهند. با هر بار عبور آهنربا از جلوی پیچه، جریانی در آن القا می‌شود. تندی‌سنج با شمارش تعداد تیپ‌های جریان در واحد زمان، تندی دوچرخه را گزارش می‌دهد.

دانستنی برای معلم

نمایشگر SIDS

مراقبت از کودکان بیمار کاری بس دشوار است. سندروم مرگ ناگهانی کودک[1] نوعی بیماری است که در آن در هنگام خواب کودک تنفس او بدون هیچ دلیل آشکاری قطع می‌شود. یکی از وسایل اعلام خطر در این موارد مانند شکل زیر از دو پیچه تشکیل شده است که با سینهٔ کودک تماس دارند. یکی از پیچه‌ها حامل جریان متناوب است و میدان مغناطیسی متغیر حاصل از آن از پیچهٔ گیرنده در طرف دیگر سینه می‌گذرد.

بالا و پایین رفتن سینه در اثر تنفس یا هر حرکت دیگری مقدار جریان القایی در پیچهٔ گیرنده را تغییر می‌دهد که این تغییرات را نمایشگری نشان می‌دهد. حال اگر تنفس قطع شود و تغییرات جریان به دستگاه ثبّات نرسد، دستگاه طوری تنظیم شده است که با تولید صوت اعلام خطر کند.

۱ـ Sudden Infant Death Syndrom

دانستنی برای معلم

گیتار الکتریکی

صدای یک گیتار آکوستیکی ناشی از نوسان تارهای آن و تشدید صوت در بدنهٔ توخالی آن است. در حالی که در گیتار الکتریکی این اتفاق رخ نمی‌دهد. در گیتار الکتریکی نوسان تارهای فلزی به سیگنال الکتریکی تبدیل شده و توسط یک مدار الکتریکی تقویت می‌شود. سپس سیگنال تقویت شده به بلندگوها فرستاده می‌شود.

اساس کار در گیتار الکتریکی به این صورت است که سیم‌پیچی به دور یک هستهٔ مغناطیسی پیچیده شده است. این مجموعه در مجاورت تار گیتار قرار می‌گیرد. میدان مغناطیسی آهنربا در بخشی از تار فلزی واقع در بالای آهنربا یک قطب شمال و یک قطب جنوب به‌وجود می‌آورد. پس، این بخش از تار نیز خود دارای میدان مغناطیسی می‌شود. وقتی به تار آن زخمه زده می‌شود و آن را به نوسان در می‌آورد حرکت تار نسبت به پیچه سبب تغییر شار میدان مغناطیسی عبوری از پیچه و القای جریان می‌شود. هنگام ارتعاش تار و دور و نزدیک‌شدن آن به پیچه جهت جریان القایی با همان بسامد نوسان تار تغییر می‌کند و سیگنالی با این بسامد به تقویت‌کننده و بلندگو منتقل می‌کند.

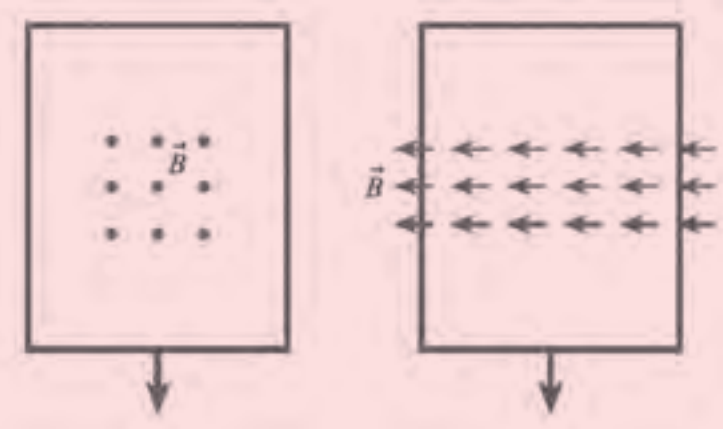
می‌توان این پرسش را مطرح کرد.

پرسش : به نظر شما تغییر کدام کمیت در گیتار الکتریکی جریان الکتریکی القایی را به‌وجود می‌آورد؟

پاسخ : تغییر اندازهٔ بردار مغناطیسی چون با تکان‌های سیم گیتار، مقدار بردار در مکان‌های مختلف فرق می‌کند.

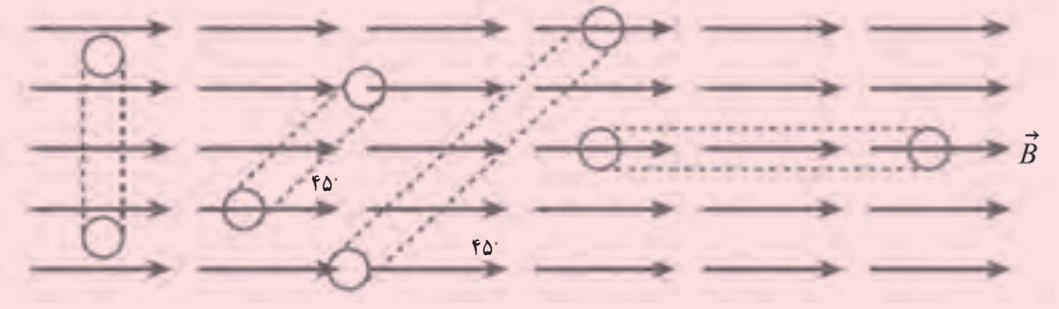
پرسش‌های پیشنهادی بخش‌های ۴ـ۱ و ۴ـ۲

۱ در شکل‌های الف و ب دو حلقهٔ رسانا در جهت نشان داده شده و با وجود میدان مغناطیسی یکنواختی کشیده می‌شوند. در کدام حالت جریان القایی در حلقه ایجاد می‌شود؟ توضیح دهید.

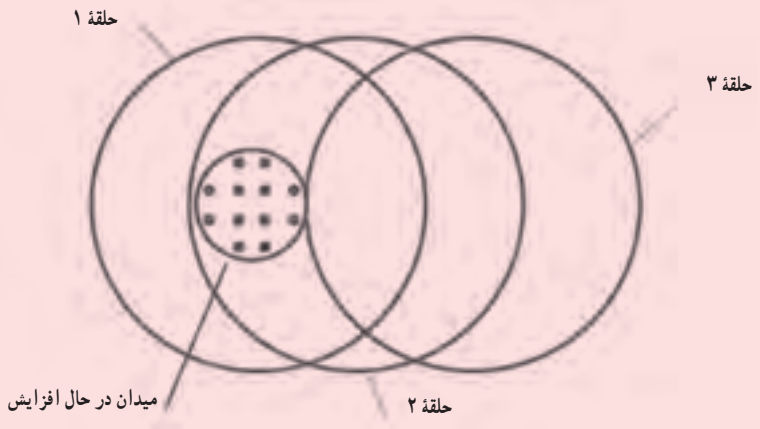


(ب) (الف)

۲ شکل زیر چهار حلقهٔ دایره‌ای را عمود بر صفحهٔ کاغذ و با وجود میدان مغناطیسی یکنواختی نشان می‌دهد. شعاع حلقه‌های ۱ و ۲ دو برابر حلقه‌های ۳ و ۴ است. شار عبوری از هر حلقه را از بیشترین تا کمترین مقدار به ترتیب بنویسید.



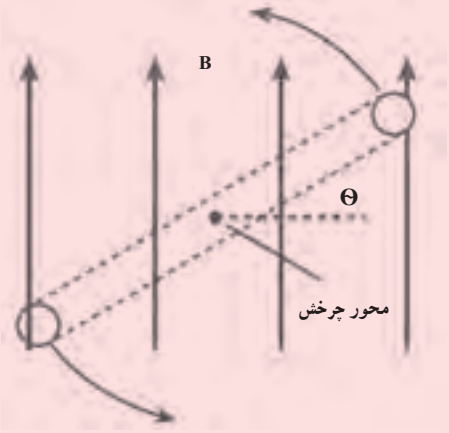
۳ سه حلقهٔ رسانای مشابه مطابق شکل زیر نسبت به هم قرار دارند و میدان مغناطیسی در حال افزایشی در ناحیهٔ نشان داده شده وجود دارد. حلقه‌ها را به ترتیب از بیشترین تا کمترین نیروی محرکهٔ القایی ایجاد شده در آنها بنویسید.



۴ یک حلقهٔ دایره‌ای با سرعت ثابت حول محوری که از مرکز آن می‌گذرد، مطابق شکل زیر از زاویهٔ صفر تا ۳۶۰ درجه می‌چرخد. این حلقه عمود بر صفحهٔ کاغذ است و میدان مغناطیسی یکنواختی به طرف بالا وجود دارد.

الف) در چه زاویه یا زاویه‌هایی شار عبوری از حلقه بیشینه است؟

ب) در چه زاویه یا زاویه‌هایی شار عبوری از حلقه کمینه است؟

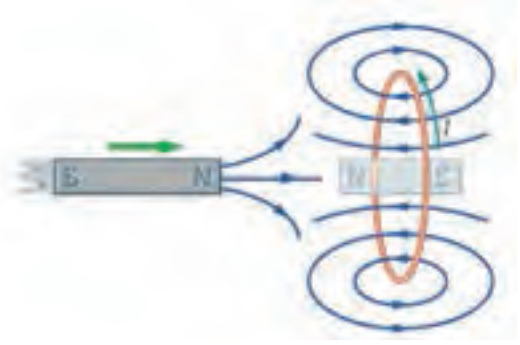


۴ــ۳ــ قانون لنز

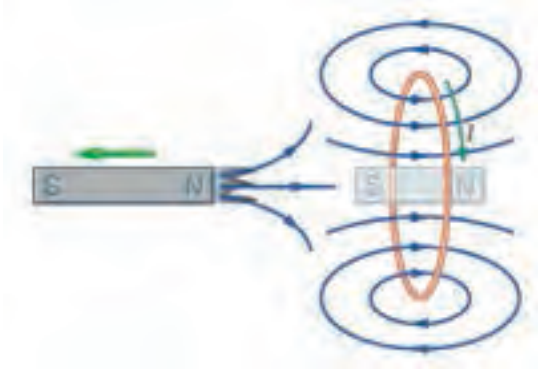
راهنمای تدریس : قانون لنز هرچند بیان ساده و روشنی دارد با این وجود بررسی‌های مختلف نشان داده است که دانش‌آموزان در کاربرد آن و تعیین جهت جریان القایی در یک مولد معمولاً دچار اشتباه می‌شوند.

در کتاب‌های درسی از دو رهیافت نزدیک به هم برای بیان این قانون و چگونگی تعیین جهت جریان القایی استفاده می‌شود که یک رهیافت آن در شکل ۴ــ۵ آمده است.

رهیافت دیگر، که در ادامه توضیح داده شده است نیز به همان اندازهٔ رهیافت کتاب مفید است. مطابق رهیافت دوم، وقتی آهنربایی مثلاً با قطب N به حلقه‌ای رسانا نزدیک می‌شود، سمتی از حلقه که روبه‌روی آهنرباست، مانند قطبی همنام با آهنربا رفتار می‌کند و می‌خواهد با نزدیک شدن آهنربا مخالفت کند (شکل الف). همچنین هنگام دور شدن آهنربا از حلقه، سمتی از حلقه که روبه‌روی آهنرباست، مانند قطبی ناهمنام با آهنربا رفتار می‌کند و می‌خواهد با دورشدن آهنربا از حلقه مخالفت کند (شکل ب).



(الف)



(ب)

همان‌طور که دیده می‌شود، رهیافت کتاب مبتنی بر مخالفت با تغییر شار است، درحالی‌که رهیافت دوم مبتنی بر مخالفت با حرکت آهنرباست.

لازم است دانش‌آموزان توجه کنند که قانون لنز برای مدارهای بسته‌ای که به هر دلیل در آنها جریان القا می‌شود کاربرد دارد

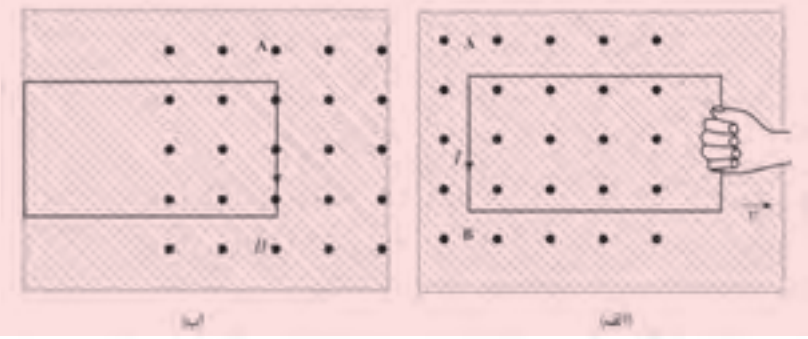
(شکل الف)، در حالی که اگر مدار بسته نباشد، مشابه (حلقهٔ ناکامل) شکل ب، نه جریانی در مدار القا می‌شود و نه می‌توان از قانون لنز برای تعیین جهت آن استفاده کرد.

(ب) (الف)

دانستنی برای معلم

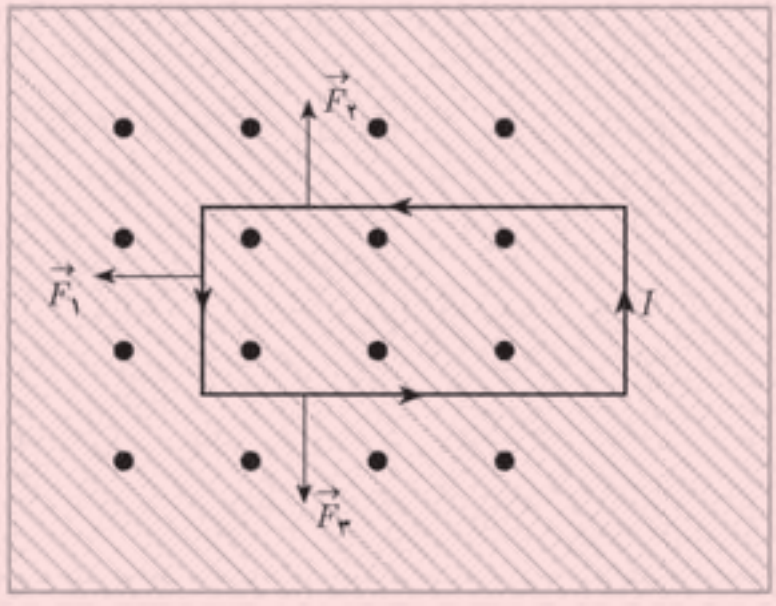
بررسی میکروسکوپیک قانون لنز با استفاده از قانون پایستگی انرژی

یک حلقهٔ مستطیل شکل را که در صفحه‌ای عمود بر میدان مغناطیسی یکنواخت B (شکل زیر) قرار دارد، درنظر بگیرید و فرض کنید که شخصی این حلقه را از چپ به راست می‌کشد. اگر مسئله را از دید یک ناظر بیرونی (مثلاً سوار بر آهنربا) بررسی کنیم، متوجه می‌شویم که از دید این ناظر، بر حامل‌های بارِ مثبت، نیرویی طبق رابطه $\vec{F}=q\vec{v}\times\vec{B}$ وارد می‌شود. از قاعدهٔ دست راست در می‌یابیم که امتداد اثرِ این نیرو در شاخهٔ AB رو به پایین است. از آنجا که جهت قراردادیِ جریان، جهت حرکت بارهای مثبت فرضی است پس با کشیدن حلقه به سمت راست، جریانی پاد ساعتگرد در حلقه تولید می‌شود. جالب آنکه اگر حلقه را از راست به چپ به درون هُل دهیم در حلقه جریان ساعتگرد ایجاد می‌شود. حال بیایید مسئله را از دید ناظری سوار بر حلقه بررسی کنیم؛ از آنجا که این ناظر، حرکت حلقه را مشاهده نمی‌کند، باید برقراری جریان را، که چیزی واقعی است و نباید به ناظرها وابسته باشد، طوری دیگر توجیه کند. این ناظر بالاخره مجبور می‌شود به این نتیجهٔ منطقی برسد که چون در نبود حرکت حلقه نیرویی که می‌تواند بارها را در حلقه به حرکت درآورد، نیرویی الکتریکی است، پس یک میدان مغناطیسی متغیّر میدان الکتریکی‌ای تولید می‌کند که بارها را در جهت پادساعتگرد به حرکت درمی‌آورد.



حال با توجه به اینکه می‌دانیم بر یک رسانای حامل جریان در میدان مغناطیسی، نیرویی برابر $\vec{F} = I\,\vec{l}\times\vec{B}$ وارد می‌شود، آنگاه با استفاده از قاعدهٔ دست راست در می‌یابیم که بر اضلاع مستطیل، نیروهایی مطابق شکل زیر وارد می‌شوند. بدیهی است که $\vec{F}_۲$ و $\vec{F}_۴$ یکدیگر را خنثی می‌کنند و بنابراین، این فقط $\vec{F}_۱$ است که در برابر حرکت مقاومت می‌کند.

توجه کنید که اگر حلقه را به طرف داخل میدان حرکت می‌دادیم، جهت جریان ساعتگرد و در نتیجه جهت نیروی $\vec{F}_۱$، خلاف جهت قبلی و دوباره در جهت مخالفت با عاملِ به‌وجود آورندهٔ آن می‌شد.

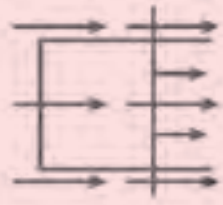


حال می‌خواهیم ثابت کنیم که قانون لنز در واقع چیزی جز پایستگی انرژی نیست. دیدیم که ناظر سوار بر حلقه وجود جریان را به نیرویی الکتریکی نسبت می‌دهد. بدیهی است که مقدار این نیرو باید با نیروی مغناطیسی که ناظر سوار بر آهنربا محاسبه می‌کرد، برابر باشد: $qE = qvB$، و از آنجا $E = vB$ به‌دست می‌آید. از طرفی، اختلاف پتانسیل دو سر میلهٔ AB از رابطهٔ $\mathscr{E} = El$ به‌دست می‌آید که با درنظر گرفتن رابطهٔ بالا به $\mathscr{E} = vBl$ خواهد انجامید. می‌دانیم که جریانِ موجود در مدار را می‌توان از رابطهٔ $I = \frac{\mathscr{E}}{R}$ که R مقاومت مدار است، محاسبه کرد؛ چون $\mathscr{E} = vBl$ است، پس $I = \frac{vBl}{R}$ و از آنجا $F = IlB = \frac{l^۲B^۲v}{R}$ خواهد شد.

بنابراین، عاملی که حلقه را می‌کشد، با توان ثابت $P = Fv = \frac{B^۲l^۲v^۲}{R}$ کار انجام می‌دهد. حال اگر آهنگ تولید انرژی در مدار از رابطهٔ $P = I^۲R$ محاسبه کنیم، دوباره به رابطهٔ بالا می‌رسیم. به عبارت دیگر، قانون لنز چیزی جز تبدیل کار مکانیکی به انرژی گرمایی نیست. کار انجام شده روی سیستم، درست برابر با انرژی داخلی القا شده در سیم است؛ زیرا اینها تنها انرژی‌هایی هستند که در سیستم به یکدیگر تبدیل می‌شوند.

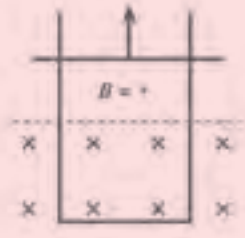
پرسش‌های پیشنهادی بخش ۴ــــ۳

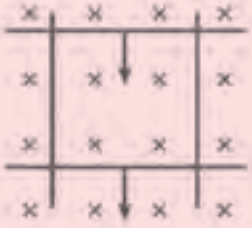
۱ در شکل زیر یک یا چند قسمت از حلقه‌های رسانا با سرعت ثابتی درون میدان مغناطیسی یکنواختی حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه تعیین کنید.

(الف) 

(ب)

(پ)

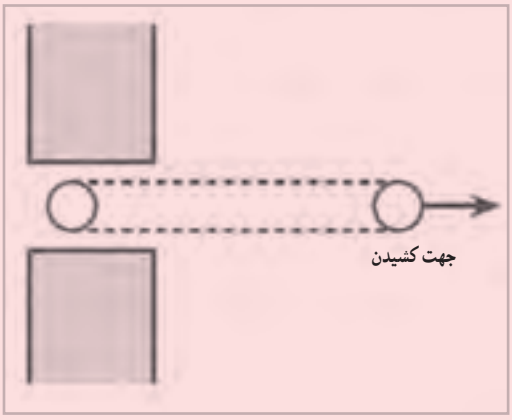
(ت) 

(ث) 

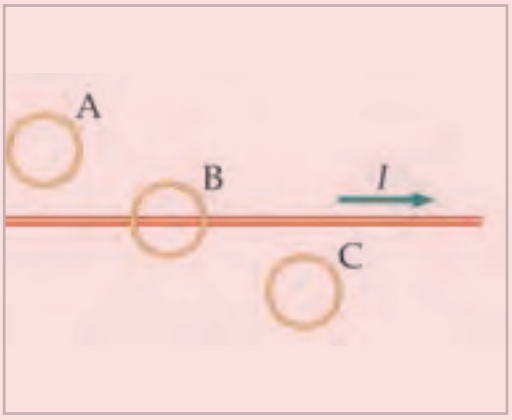
(ج)

۲ در شکل چ مقطع حلقه‌ای نشان داده شده است که در حال کشیده شدن از بین قطب‌های دو آهنرباست. جهت جریان القایی را در هر مقطع حلقه با علامت • یا × مشخص کنید.

۳ جریان عبوری از سیم راست افقی در حال افزایش است (شکل ح). جهت جریان القایی را در هریک از حلقه‌ها تعیین کنید.



(چ)



(ح)

پرسش ۴ــ۳

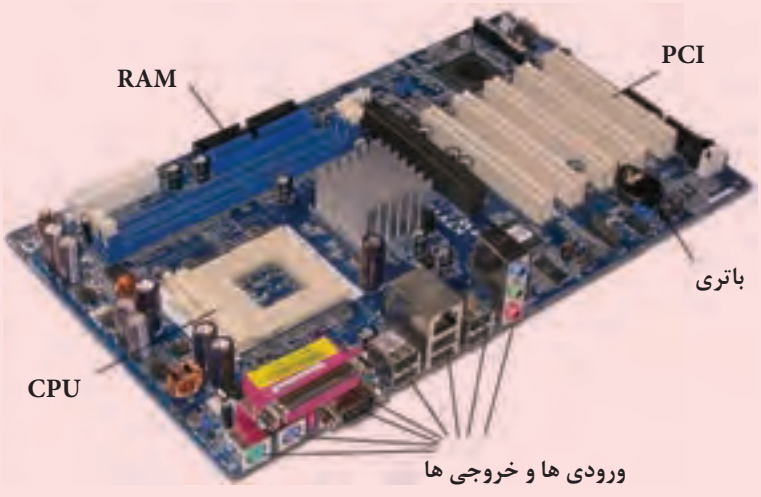
الف) با توجه به قانون لنز، آهنربا در حال دورشدن از پیچه است؛ یعنی رو به پایین حرکت می‌کند.

ب) جهت میدان $\vec{B}$ ناشی از سیم حامل جریان I، در محل حلقه برون‌سو است. چون جریان I در حال افزایش است، بنابه قانون لنز باید جهت جریان در حلقه، ساعتگرد باشد تا با افزایش شار عبوری از حلقه، مخالفت کند.

۴ــ۴ــ القاگرها

راهنمای تدریس : تا اینجا دانش‌آموزان آزمایش‌های مربوط به القای الکترومغناطیسی را با پیچه‌های مختلف (که نوعی القاگر هستند) انجام داده‌اند هرچند برای آنها، نام القاگر به‌کار نبرده‌اند.

در این بخش شکل ۴ــ۶ دانش‌آموزان را با انواع مختلف القاگر آشنا کنید. به این منظور، انواع القاگر که در آزمایشگاه موجود است را به کلاس درس ببرید و در اختیار دانش‌آموزان قرار دهید تا با انواع القاگر آشنا شوند و در صورت لزوم به‌کاربرد آنها در مدارهای مختلف نیز می‌توانید اشاره کنید.



به‌عنوان یک فعالیت ساده می‌توانید، مادربرد[1] یک رایانه را به کلاس درس ببرید و ضمن اینکه دانش‌آموزان با برخی از قطعات آن‌که تاکنون با آنها آشنا شده‌اند (مقاومت و خازن) با القاگرهای تعبیه شده روی مادربرد نیز آشنا شوند.

آزمایش ۴ــ۲، که آزمایشی ساده و مفید برای دیدن پدیدهٔ خودــالقاوری است به چندین روش در مجموعه فیلم‌های مربوط به آموزش مجازی فیزیک ۲ آمده است که توصیه می‌شود آن را مشاهده کنید.

اثبات ضریب القاوری مربوط به سیملوله، جزو اهداف این کتاب نیست و صرفاً مطابق رابطهٔ ۴ــ۴ باید گزارش شود و دانش‌آموزان باید به عوامل دخیل در مقدار این کمیت آشنا شوند.

۱ــ Motherboard

توجه

همان طور که نتیجهٔ مثال ۴ــ۵ نیز نشان می‌دهد $1H$ برای ضریب القاوری یک القاگر عدد بسیار بزرگی است و برای سیملوله‌ای با حدود ۲۰۰۰ دور و طول ۰/۶m، این ضریب از مرتبهٔ میلی هانری (mH) است. این موضوع در بخش اول تمرین ۴ــ۳ مورد توجه قرارگرفته است.

تمرین ۴ــ۳

۱

$N=?\ ,\ l=۲/۸\text{m}$

$A=۱۰\text{cm}^۲\ ,\ L=۱\text{H}$

$$L=\mu_۰\frac{AN^۲}{\ell}$$

$$۱\text{H}=(۴\pi\times۱۰^{-۷}\ T.m/A)\times\frac{(۱۰\times۱۰^{-۴}\text{m}^۲)N^۲}{۲/۸\times۱۰^{-۲}\text{m}}$$

$$\Rightarrow N^۲=\frac{۲/۸}{۴\pi\times۱۰^{-۹}}\simeq۲/۲\times۱۰^{۸}$$

در این صورت $N\simeq۱۵۰۰۰$ دور خواهد شد که تعداد دور بالایی است.

۲

$N_۱=N_۲$ و $\ell_۱=۲\ell_۲$ و $L_۱/L_۲=?$

با توجه به رابطهٔ ضریب القاوری سیملوله به سادگی خواهیم داشت $L_۱=\frac{۱}{۲}L_۲$.

تمرین ۴ــ۴

$\ell = ۲۲cm \ , A = ۰/۴۴cm^۲$

$N = ۲۰۰۰$ دور $, I = ۱/۷A$

$$L = \mu_۰ \frac{AN^۲}{\ell}$$

$$=(۴\pi \times ۱۰^{-۷}\ T.m/A)$$

$$\times \frac{(۰/۴۴\times ۱۰^{-۴}m^۲)(۲۰۰۰)^۲}{۲۲\times ۱۰^{-۲}m}$$

$$\Rightarrow L \simeq ۱۰^{-۳}H = ۱mH$$

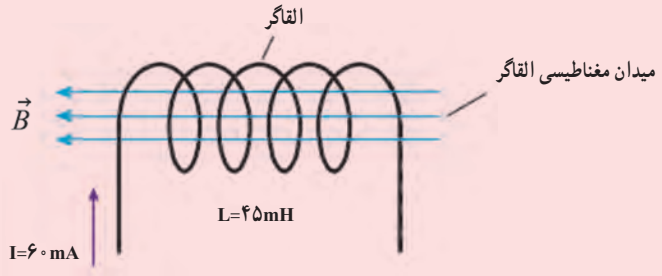
$$U = \frac{۱}{۲}LI^۲$$

$$= \frac{۱}{۲}(۱\times ۱۰^{-۳}H)(۱/۷A)^۲$$

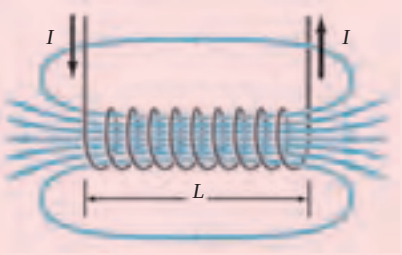
$$\Rightarrow U = ۱/۴۴ \times ۱۰^{-۳}J = ۱/۴۴mJ$$

پرسش های پیشنهادی بخش ۴ــــ۴

۱ انرژی ذخیره در القاگر شکل زیر چقدر است؟



۲ سطح مقطع و طول سیملولهٔ شکل زیر به ترتیب $۲۰\,cm^۲$ و $۸۰\,cm$ است. اگر تعداد حلقه‌های این سیملوله برابر ۱۰۰۰ باشد، ضریب خودالقایی آن را پیدا کنید.



۳ ضریب خودالقایی القاگری ۱۰mH است. چه جریانی باید از این القاگر بگذرد تا ۲۰mJ انرژی در آن ذخیره شود؟

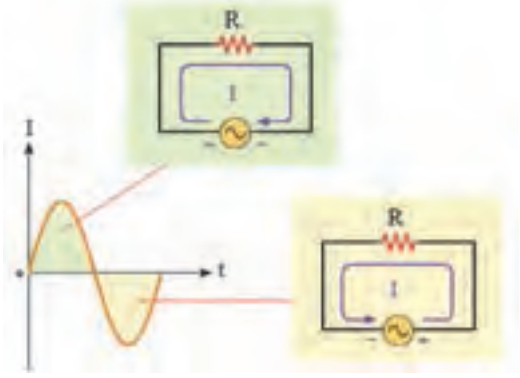
دانستنی برای معلم

به‌طور سنتی، کارخانه‌های ریخته‌گری از کوره‌های آتش برای ذوب فلزها استفاده می‌کنند. ولی، بسیاری از کارخانه‌های ریخته‌گری امروزی برای پرهیز از آلودگی‌های ناشی از این کوره‌ها، از کوره‌های القایی استفاده می‌کنند که در آنها فلزها با جریان سیم‌های عایقی گرم می‌شوند که به دور ظرفی که فلزها را در خود جای داده است، پیچیده شده‌اند.

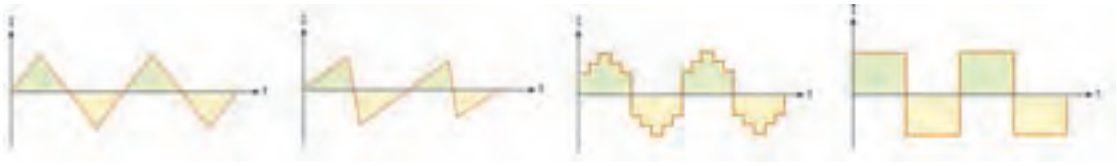
۴ـ۵ـ جریان متناوب

راهنمای تدریس : همان‌طور که در کتاب نیز اشاره شده است، بهتر است با تاریخچه‌ای از بحث‌های علمی در خصوص مزیت جریان متناوب و جریان مستقیم ارائه کنید؛ حتی فیلم‌های مستندی در این خصوص نیز تولید شده است که مشاهدهٔ آنها می‌تواند انگیزه مناسبی در دانش‌آموزان ایجاد کند.

برای درک بهتر شکل ۴ـ۱۳ کتاب درسی، خوب است شکل زیر را نیز روی تابلو رسم کنید تا تغییر جهت جریان در جریان متناوب بهتر تبیین شود.



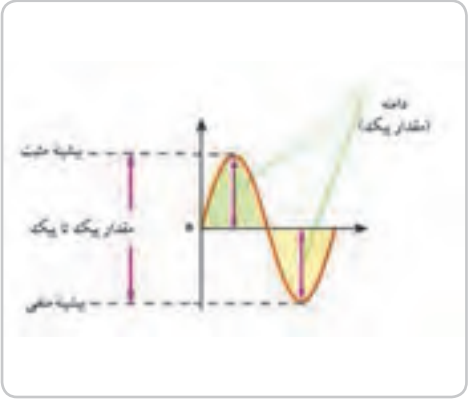
در ادامه می‌توانید نمونه‌های دیگری از موج متناوب را به دانش‌آموزان معرفی کنید که به منظور خاصی تولید می‌شوند و در کاربردهای روزمره متداول نیستند (شکل زیر)



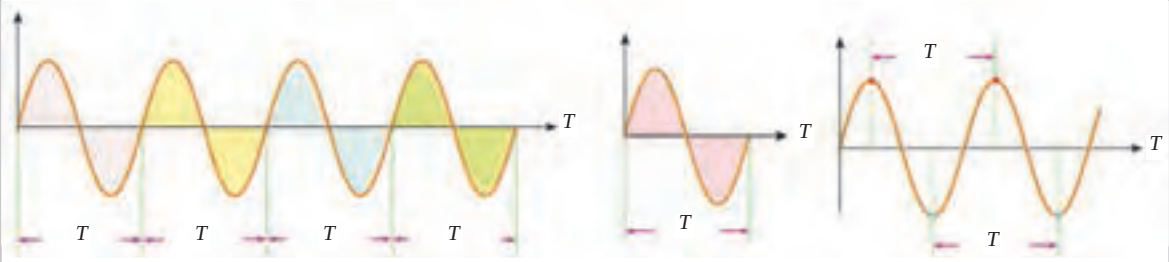
الف ب پ ت

چند نمونه از شکل‌های موج جریان متناوب (الف) موج مربعی، ب) موج پله‌ای، (پ) موج دندانه اره‌ای، (ت) موج مثلثی.

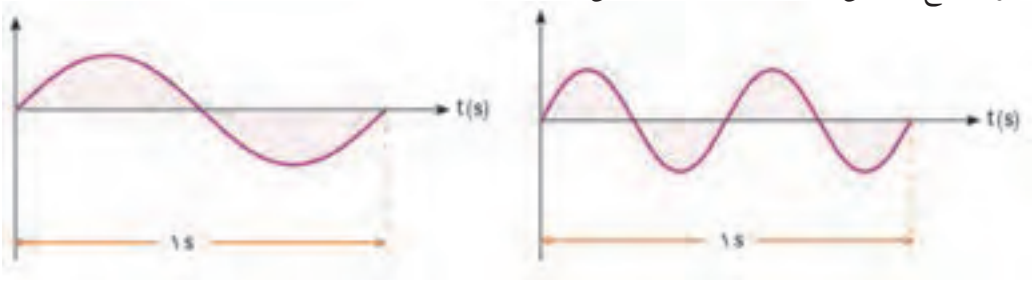
در کتاب‌های مهندسی معمولاً فاصلهٔ بیشینهٔ مثبت تا بیشینهٔ منفی را در جریان متناوب، مقدار پیک تا پیک می‌گویند که دو برابر دامنهٔ موج است (شکل رو به رو).



از آنجا که دانش‌آموزان در دورهٔ اول متوسطه با مفاهیم مرتبط با نوسان و موج آشنایی پیدا نکرده‌اند، لذا در این قسمت نگاهی اجمالی به برخی از مفاهیم اولیه موردنیاز در این بخش داشته باشید. با رسم شکل‌هایی مشابه شکل‌های زیر، مفهوم چرخه و دورهٔ تناوب را برای دانش‌آموزان معرفی کنید.



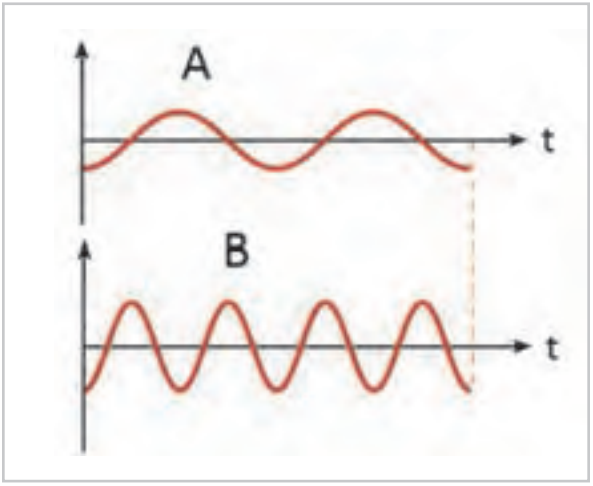
مفهوم بسامد را نیز می‌توانید در ادامهٔ همین قسمت به دانش‌آموزان معرفی کنید. تعداد چرخه‌ها در یکای زمان، بسامد نامیده می‌شود و وارون دورهٔ تناوب است ($f = \frac{۱}{T}$). یکای بسامد چرخه بر ثانیه یا عکس ثانیه ($s^{-۱}$) است که هرتز (Hz) نامیده می‌شود. شکل زیر دو موج سینوسی با بسامد متفاوت را نشان می‌دهد.



از آنجا که دانش‌آموزان در این پایهٔ تحصیلی با مفهوم مشتق در درس ریاضی خود آشنا نشده‌اند، لذا رابطهٔ ۴ــ۶ بدون اثبات و صرفاً به‌صورت نتیجه‌گیری از قانون القای الکترومغناطیسی فاراده به دانش‌آموزان معرفی شود.

پرسش پیشنهادی

نسبت دورهٔ تناوب و بسامد دو نمودار جریان متناوب A و B را به ترتیب به‌دست آورید.



تمرین ۴ــ۵

الف) دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند با جایگذاری زمان t در معادلهٔ جریان ــ زمان مولد، جریان را در هر لحظهٔ دلخواه پیدا کنند. برای مثال در لحظهٔ $t = ۲/۰\,ms$ داریم

$$I = (۴/۰\times۱۰^{-۳})\sin ۲۵۰\pi \times ۲ \times ۱۰^{-۳}$$

$$= ۴/۰\times۱۰^{-۳}\sin\frac{\pi}{۲} = ۲/۰ \times ۱۰^{-۳}A$$

$$= ۲/۰\,mA$$

ب) دانش‌آموزان با مقایسه معادله داده شده با شکل کلی معادله می‌توانند دورهٔ تناوب را به‌دست آورند که برابر

$$\frac{۲\pi}{T} = ۲۵۰\pi \Rightarrow T = \frac{۱}{۱۲۵}s$$

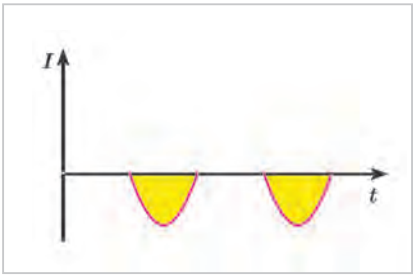
است.

فعالیت ۴ــ۱

انتظار می‌رود دانش‌آموزان با آشنایی مختصری که از دیود و یک‌سو بودن انتقال جریان الکتریکی در آن به‌دست آورده‌اند به سادگی بتوانند نمودار شکل (ب) را برای مدار شکل (پ) دوباره رسم کنند.

نتیجه را می‌توانند به‌صورت نمودار شکل (الف) یا نمودار شکل (ب) رسم کنند.

(الف)



(ب)

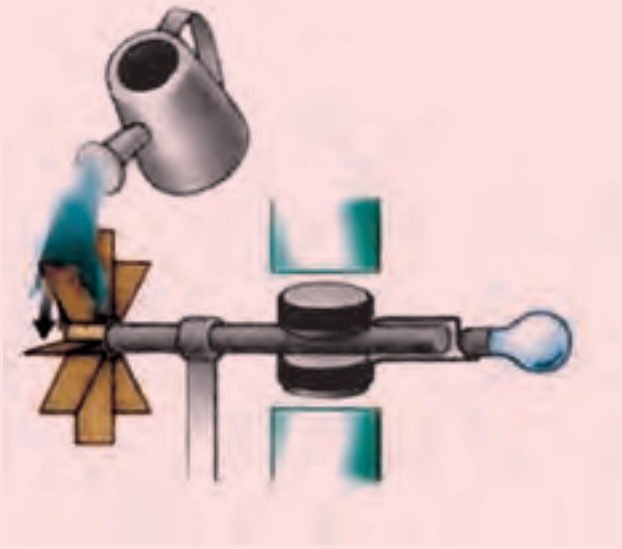
تمرین ۴ــ۶

مشابه مثال ۴ــ۸ است و دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند این تمرین را حل کنند ($V_2 \approx ۳۷۰۰\ V$).

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی بخش ۴ــ۵

۱ الف) برای افزایش روشنایی لامپ به‌وسیلهٔ مولد سادهٔ شکل زیر سه راه پیشنهاد کنید.

ب) تبدیل‌های انرژی زیر را در یک نیروگاه برق آبی کامل کنید. انرژی ..... تولید شده توسط ژنراتور ← انرژی ..... توربینی ← انرژی ..... آب



۲ پیچهٔ یک مولد جریان متناوب در هر ۱ms یک دور می‌چرخد. این پیچه در هر یک از زمان‌های ۱μs و ۱s چه زاویه‌ای برحسب رادیان می‌چرخد؟

۳ معادلهٔ جریان متناوبی در SI به‌صورت $I = ۲\times۱۰^{-۲}\sin ۲۰\pi t$ است.

الف) دورهٔ تناوب این جریان چقدر است؟

ب) در چه لحظه‌ای برای اولین بار جریان بیشینه می‌شود؟

پ) در لحظهٔ $t = ۷۵\text{ms}$ جریان چقدر است؟

۴ معادلهٔ نیروی محرکهٔ القایی در مداری به مقاومت ۱۰Ω در SI به صورت زیر است

$$\varepsilon = ۰/۴\cos ۲۰\pi t$$

الف) زمان تناوب را حساب کنید.

ب) در چه لحظه‌ای برای اولین بار نیروی محرکهٔ القایی بیشینه می‌شود؟

پ) جریان بیشینه را در مدار پیدا کنید.

ت) معادلهٔ جریان را در مدار بنویسید.

ث) در چه لحظه‌هایی برای اولین و دومین بار مقدار جریان عبوری از مدار بیشینه می‌شود؟

۱ دانش‌آموزان باید به شرایط یکسان آزمایش و بیشتر بودن تعداد دور مدار شکل (ب) توجه کنند و توضیح دهند که چرا ولت‌سنج حساس در مدار شکل (ب) عدد بزرگ‌تری را می‌خواند.

۲ دانش‌آموزان باید به شرایط یکسان آزمایش و حرکت سریع‌تر آهنربا به طرف مدار شکل (ب) توجه کنند و توضیح دهند که چرا ولت‌سنج حساس در مدار شکل (ب) عدد بزرگ‌تری را می‌خواند.

۳ الف) با چرخش میله، آهنربای درون فضای پیچه می‌چرخد. دانش‌آموزان باید بر همین اساس و با توجه قانون القای الکترومغناطیسی فاراده به این پرسش پاسخ دهند.

ب) با توجه به آنچه در پرسش ۲ قسمت (ب) دیدند به سادگی می‌توانند به این پرسش پاسخ دهند. یا به رابطهٔ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده و وجود Δt در مخرج این رابطه توجه کنند.

پ) استفاده از آهنربای قوی‌تر و پیچه با تعداد دور بیشتر. همچنین استفاده از ولت‌سنج حساس‌تر می‌تواند به بهبود نتیجه اندازه‌گیری بینجامد.

۴ اگر نیم‌خط عمود بر سطح پیچه را به سمت راست فرض کنیم در این صورت

$$\Phi_1 = B_1 A\cos\theta_1 = (0/40\,\mathrm{T})(50\times10^{-4}\,\mathrm{m^2})\cos0^\circ$$
$$= 2\times10^{-4}\,\mathrm{Wb}$$
$$\Phi_2 = B_2 A\cos\theta_2 = (0/40\,\mathrm{T})(50\times10^{-4}\,\mathrm{m^2})\cos180^\circ$$
$$= -2\times10^{-4}\,\mathrm{Wb}$$
$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -2\times10^{-4} - 2\times10^{-4} = -4\times10^{-4}\,\mathrm{Wb}$$

دانش‌آموزان باید توجه کنند برای محاسبه Φ_2، باید جهت نیم‌خط عمود بر پیچه که به سمت راست انتخاب شده بود را تغییر ندهند.

$$|\varepsilon| = |-N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}| = |-1000\frac{(-4\times10^{-4}\,\mathrm{Wb})}{10^{-2}\,\mathrm{s}}| = 40\,\mathrm{V}$$

۵ در این مسئله نیز نیم‌خط عمود بر پیچه را عمود بر خطوط میدان مغناطیسی زمین فرض کنیم بنابراین $\theta_1 = 0^\circ$ است. در حالتی که پیچه می‌چرخد و سطح حلقه‌های آن موازی میدان مغناطیسی زمین می‌شود $\theta_2 = 90^\circ$ می‌شود. ادامهٔ مسئله مشابه مسئله ۴ حل می‌شود.

۶ جریان القایی در جهت ساعتگرد است.

۷ دانش‌آموزان باید با توجه به قانون القای الکترومغناطیسی فاراده و قانون لنز، توضیح قانع‌کننده‌ای ارائه دهند که چرا آهنربایی که از حلقه‌های رسانا عبور می‌کند، فرورفتگی کمتری هنگام برخورد با زمین نرم ایجاد می‌کند.

۸ الف)ساعتگرد،ب)پادساعتگرد،پ)جریانی القانمی‌شود.

۹ پادساعتگرد، دانش‌آموزان باید به جهت حرکت سیملوله، جهت جریان و جهت میدان ایجاد شده در سیملوله توجه کنند و سرانجام با توجه به قانون لنز جهت جریان القایی را در حلقه تشخیص دهند.

۱۰ دانش‌آموزان باید توجه داشته باشند که چون نیروی محرکهٔ باتری ثابت است، با افزایش مقاومت رئوستا، جریان عبوری از مدار کاهش می‌یابد، با توجه به تعیین جهت میدان مغناطیسی در محل حلقهٔ رسانا، و همچنین کاهش جریان در مدار، جهت جریان القایی در حلقهٔ رسانا پادساعتگرد است.

۱۱ در حلقهٔ سمت راست، جریان به‌صورت ساعتگرد القا می‌شود.

در حلقهٔ سمت چپ، جریانی القا نمی‌شود. دانش‌آموزان باید به فرض دراز بودن سیم، که در صورت مسئله آمده است توجه داشته باشند.

۱۲ ساعتگرد، دانش‌آموزان باید دلیل کافی برای پاسخ خود ارائه دهند.

۱۳ پادساعتگرد، دانش‌آموزان باید دلیل کافی برای پاسخ خود ارائه دهند.

۱۴ الف) b به a. دانش‌آموزان باید دلیل کافی برای پاسخ خود ارائه دهند.

ب) a به b. دانش‌آموزان باید دلیل کافی برای پاسخ خود ارائه دهند.

۱۵ الف) با توجه به تعریف شار و عوامل مرتبط با آن، انتظار می‌رود دانش‌آموزان به سادگی بتوانند به این پرسش پاسخ دهند.

$$\Phi = BA\cos\theta$$

$$= (۲۰\times۱۰^{-۳}\mathrm{T})(۱۰۰\times۱۰^{-۴}\mathrm{m}^{۲})\cos۰^{\circ}$$

$$=۲\times۱۰^{-۴}\mathrm{Wb}$$

فرض شده است که نیم‌خط عمود بر حلقه، در جهت درون سو است.

ب) در حالتی که حلقه وارد میدان می‌شود یا از آن در حال خارج شدن است.

در حالت ورود : پادساعتگرد، دانش‌آموزان برای پاسخ خود باید دلایل کافی ارائه دهند.

در حالت خروج : ساعتگرد، دانش‌آموزان برای پاسخ خود باید دلایل کافی ارائه دهند.

۱۶ در حالت ۱ : روبه بالا (پادساعتگرد)

در حالت ۲ : جریانی القا نمی‌شود.

در حالت ۳ : رو به پایین (ساعتگرد)

۱۷ دانش‌آموزان باید به رابطهٔ $U=\frac{۱}{۲}LI^{۲}$ و همچنین عوامل دخیل در ضریب القاوری سیملوله $L=\mu_{۰}\frac{AN^{۲}}{l}$ ، توجه کنند و براساس آن پیشنهادهای خود را ارائه دهند. در این مدار فرض شده است که باتری غیرقابل تعویض است و نیروی محرکهٔ آن ثابت است.

۱۸ الف) با جایگذاری مقادیر داده شده در رابطهٔ $L = \mu_{\circ}\frac{NA^{۲}}{l}$ به سادگی این ضریب محاسبه می‌شود.

ب) دانش‌آموزان باید از رابطهٔ $U = \frac{۱}{۲}LI^{۲}$ استفاده کنند. در ضمن باید توجه کنند که در این رابطه، یکای انرژی باید برحسب ژول (J) نوشته شود.

۱۹ الف) دانش‌آموزان باید از رابطهٔ **۴ــ۷**، برای حل این مسئله استفاده کنند. با جایگذاری مقادیر داده شده داریم

$$I = (۲/۰\text{A})\sin\frac{۲\pi}{۰/۰۲\text{s}}t = (۲/۰\text{A})\sin ۱۰۰\pi t$$

در $t = \frac{۱}{۲۰۰}\text{s}$ داریم

$$I = (۲/۰\text{A})\sin ۱۰۰\pi(\frac{۱}{۲۰۰}\text{s}) = (۲/۰\text{A})\sin\frac{\pi}{۲} = ۲/۰\text{A}$$

به این ترتیب در لحظهٔ $t = \frac{۱}{۲۰۰}\text{s}$ برای اولین بار، جریان به بیشینهٔ خود می‌رسد. با توجه به مقاومت رسانا داریم:

$$\varepsilon_m = RI_m = (۵\pi)(۲/۰A) = ۱۰\text{V}.$$

ب) $\sqrt{۲}\text{A}$.

۲۰ دانش‌آموزان باید از رابطهٔ **۴ــ۸** استفاده کنند. در این صورت بیشینهٔ ولتاژ مولد برابر **۴/۵** ولت به‌دست می‌آید.

جهت دانلود رایگان منابع استخدامی دبیر علوم تجربی - فیزیک آزمون آموزش و پرورش، اینجا بزنید.