

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فیزیک (۳) و آزمایشگاه

سال سوم آموزش متوسطه

رشته ریاضی و فیزیک

وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف : دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری

نام کتاب : فیزیک (۳) و آزمایشگاه - ۲۵۶/۴

شورای برنامه‌ریزی و تألیف : احمد احمدی، اعظم پورقاسی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، ابوالقاسم زال‌پور،

سیدمهدی شیوایی، شیرین فراهانی، حسن عزیزی، غلامعلی محمودزاده و منصور وصالی

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وبسایت : www.chap.sch.ir

رسم : هدیه بندار

صفحه‌آرا : فائزه محسن‌شیرازی

طراح جلد : علیرضا رضائی‌کُر

ناشر : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران - تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹

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

سال انتشار و نوبت چاپ : چاپ سیزدهم ۱۳۹۲

حق چاپ محفوظ است.

شابک ۹۶۴-۰۵-۰۹۹۱-۴ ISBN 964-05-0991-4



هر کاری را که انسان باورش این است که نسبت به آن کار ضعیف است، نمی‌تواند آن کار را انجام بدهد. ... هر کشوری که اعتقادش این باشد که نمی‌تواند خودش صنعتی را ایجاد کند این ملت محکوم به این است که تا آخر نتواند، و این اساس نقشه‌هایی بوده است که برای ملل ضعیف دنیا قدرت‌های بزرگ کشیده‌اند.

امام خمینی

فهرست

پیشگفتار

۲	فصل ۱- ترمودینامیک
۴	۱-۱- معادله‌ی حالت
۶	۲-۱- فرایندهای ترمودینامیکی
۷	۳-۱- تبادل انرژی
۹	۴-۱- فرایندهای خاص
۱۹	۵-۱- انرژی درونی
۱۹	۶-۱- قانون اول ترمودینامیک
۲۱	۷-۱- ماشین‌های گرمایی
۲۷	۸-۱- بازدهی ماشین گرمایی
۲۹	۹-۱- قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)
۳۱	۱۰-۱- یخچال
۳۶	۱۱-۱- قانون دوم ترمودینامیک (به بیان یخچالی)
۳۷	تمرین‌های فصل اول
۴۲	فصل ۲- الکتریسیته‌ی ساکن
۴۲	۱-۲- قانون کولن
۶۰	۲-۲- میدان الکتریکی
۶۲	۳-۲- تعریف کمی میدان الکتریکی
۶۳	۴-۲- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره‌ی باردار
۶۸	۵-۲- تجسم میدان الکتریکی

۷۰	۶-۲- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی
۷۱	۷-۲- توزیع بار الکتریکی در یک جسم
۷۷	۸-۲- انرژی پتانسیل الکتریکی
۷۹	۹-۲- اختلاف پتانسیل الکتریکی
۸۱	۱۰-۲- خازن
۸۳	۱۱-۲- ظرفیت خازن
۸۴	۱۲-۲- عامل‌های مؤثر بر ظرفیت خازن تخت
۹۰	۱۳-۲- انرژی خازن
۹۰	۱۴-۲- به هم بستن خازن‌ها
۹۶	تمرین‌های فصل دوم
۱۰۰	فصل ۳- جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم
۱۰۰	۱-۳- جریان الکتریکی
۱۰۲	۲-۳- قانون اهم
۱۰۲	۳-۳- عوامل مؤثر در مقاومت رساناهای فلزی
۱۰۹	۴-۳- اثر دما بر مقاومت رساناهای فلزی
۱۱۱	۵-۳- محاسبه‌ی انرژی الکتریکی مصرف شده در یک مقاومت
۱۱۵	۶-۳- نیروی محرکه‌ی مولد
۱۱۶	۷-۳- مدارهای تک حلقه
۱۲۳	۸-۳- به هم بستن مقاومت‌ها
۱۳۱	۹-۳- قانون کیرشهف
۱۳۵	تمرین‌های فصل سوم
۱۳۹	فصل ۴- مغناطیس
۱۴۰	۱-۴- آهنربا
۱۴۳	۲-۴- میدان مغناطیسی
	۳-۴- تعریف میدان مغناطیسی با استفاده از نیروی وارد بر سیم حامل جریان
۱۴۷	در میدان مغناطیسی

۱۵۳	۴-۴- نیروی وارد بر ذره‌ی باردار متحرک در میدان مغناطیسی
۱۵۵	۴-۵- آثار مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی
۱۶۲	۴-۶- نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان
۱۶۵	۴-۷- خاصیت مغناطیسی مواد
۱۷۱	تمرین‌های فصل چهارم

۱۷۷	فصل ۵- القای الکترومغناطیسی
۱۷۷	۵-۱- پدیده‌ی القای الکترومغناطیسی
۱۸۰	۵-۲- شار مغناطیسی
۱۸۲	۵-۳- قانون القای الکترومغناطیسی فارادی
۱۸۶	۵-۴- محاسبه‌ی جریان القایی
۱۸۸	۵-۵- خودالقایی
۱۹۵	۵-۶- انرژی ذخیره شده در القاگر
۱۹۶	۵-۷- جریان متناوب
۲۰۰	تمرین‌های فصل پنجم

۲۰۴	واژه‌نامه‌ی فارسی - انگلیسی
-----	-----------------------------

۲۰۷	فهرست مراجع
-----	-------------

پیشگفتار

در قرن بیست و یکم بشر وارد دوره‌ی جدیدی از توسعه‌ی علم و فناوری شده است. حجم اطلاعات علمی بشر طبق تخمین دانشمندان در چند سال آینده در هر چند ماه دو برابر می‌شود. شیوه‌های زندگی نیز به دنبال این تحولات در علم و تکنولوژی خیلی سریع تغییر می‌کنند. بنابراین نیازهای فردای دانش‌آموزان امروز برای ما خیلی آشکار نیست. به دنبال این تحولات شیوه‌های آموزش علوم (فیزیک) به تبع نیازهای مجهول آینده فرزندانمان تغییر چشمگیری در جهان داشته است. در این شیوه‌ها تلاش زیادی می‌شود تا دانش‌آموز «چگونگی آموختن» را بیاموزد و مهارت برخورد با مطلب یا مسئله جدید و طی مراحل‌ی که منجر به حل آن مسئله می‌شود را فرا گیرد.

کتاب فیزیک (۳) و آزمایشگاه براساس روش فعال تألیف شده است. یعنی دانش‌آموز در ساخت مفاهیم نقش دارد و نقش دبیران محترم، طرح مسئله و سپس راهنمایی دانش‌آموزان برای رسیدن به حل مسئله است. در این کتاب سعی شده سه هدف نگرشی، دانشی و مهارتی مورد توجه کامل قرار گیرد و حجم و تعداد مفاهیم با توجه به اختصاصی بودن درس برای دانش‌آموزان رشته علوم ریاضی و تجربی انتخاب شده است.

انتظار می‌رود همکاران گرامی با تکیه بر تجربه و توانایی‌های خود، فعالیت یا آزمایشی را که در یادگیری می‌تواند کمک کند طراحی کرده و دانش‌آموزان را بر انجام آن‌ها ترغیب کنند و از آنان بخواهند که نتایج آن فعالیت‌ها را در دفتر گزارش کار خود ثبت کنند. این دفتر و عملکرد دانش‌آموزان در حین انجام فعالیت می‌تواند به عنوان یکی از ملاک‌های ارزشیابی مورد توجه

قرار گیرد. لازم به تذکر است که عناوین و مباحث این کتاب براساس سن دانش‌آموزان و زمان تخصیص داده به این درس تدارک دیده شده است و همکاران محترم بایستی از پیرایه‌های اضافی به این مباحث، بپرهیزند.

گروه فیزیک دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی همواره از دریافت نظرهای ارزشمند دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان جهت رفع نارسایی‌ها و لغزش‌های احتمالی به گرمی استقبال می‌کند. نظرهای اصلاحی خود را به نشانی تهران – صندوق پستی ۱۵۸۵۵/۳۶۳ – گروه فیزیک و یا نشانی الکترونیک physics-dept@talif.sch.ir ارسال نمایید.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری

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



نیروگاه شهید سلیمی نکا

نیروگاه شهید سلیمی نکا واقع در استان مازندران از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های حرارتی در خاورمیانه است که به منظور تأمین بخش قابل توجهی از برق کشور، طراحی و نصب گردیده است. ظرفیت اسمی نیروگاه جمعاً ۳۵۰۲ مگاوات است. قسمت‌های اصلی نیروگاه عبارتند از: دیگ بخار، ساختمان میانی، سالن توربین، مبدل‌ها و ساختمان‌های کمکی. سوخت اصلی نیروگاه، گاز طبیعی و سوخت دوم آن نفت کوره یا مازوت است.

ترمودینامیک

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که انواع مختلف انرژی می‌توانند به یک‌دیگر تبدیل شوند، هنگامی که جسمی روی سطح حرکت می‌کند، مقداری از انرژی جنبشی آن به انرژی درونی جسم و سطح تبدیل می‌شود، یا وقتی ظرف آبی را در مقابل نور آفتاب قرار می‌دهیم، ظرف و آب گرم‌تر می‌شوند. در این حالت، بخشی از انرژی نورانی به انرژی درونی ظرف و آب تبدیل می‌شود. برخی از این تبدیل‌ها خودبه‌خود رخ می‌دهند ولی برای وقوع تبدیل‌های دیگر، دستگاه‌هایی طراحی و ساخته شده‌اند؛ مثلاً در گذشته، برای ایجاد روشنایی از تبدیل انرژی شیمیایی موجود در شمع یا نفت به انرژی نورانی استفاده می‌شد ولی بعدها که انسان به انرژی الکتریکی دست یافت، لامپ را اختراع کرد که انرژی الکتریکی را به انرژی نورانی تبدیل می‌کند. موتورهای الکتریکی که در وسایل خانگی نظیر جاروبرقی، پنکه، یخچال و ... به کار می‌روند، برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی طراحی و ساخته شده‌اند. در فصل ۴ در مورد این موتورها صحبت خواهیم کرد.

در این فصل به بررسی وسایلی می‌پردازیم که گرما را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این وسیله‌ها ماشین گرمایی نامیده می‌شوند. در شکل ۱-۱ طرح یکی از اولین ماشین‌های گرمایی (ماشین نیوکامن) نشان داده شده است. در این ماشین، گرمایی که به دیگ بخار داده می‌شود برای به کار انداختن یک تلمبه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در شکل ۱-۱ الف در اثر وزن پیستون دسته‌ی تلمبه به طرف پایین حرکت می‌کند و بخار آب وارد استوانه می‌شود. با باز شدن شیر در شکل ۱-۱ ب، آب به داخل استوانه فوران می‌کند که در نتیجه‌ی آن مقداری از بخار، مایع می‌شود و فشار گاز در داخل استوانه کاهش می‌یابد. سپس فشار هوا پیستون را به طرف پایین می‌راند و دسته‌ی دیگر تلمبه به طرف بالا کشیده می‌شود. بدین ترتیب، حرکت تلمبه ادامه می‌یابد.

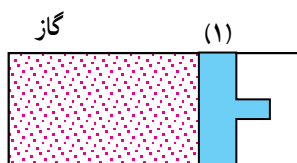
ماشین‌های گرمایی در طول زمان کامل‌تر شده‌اند و امروزه ما با انواع پیشرفته‌ی آن‌ها سروکار داریم. برای آشنایی با طرز کار این ماشین‌ها و این که از چه قانون‌هایی پیروی می‌کنند، لازم است با علم ترمودینامیک آشنا شویم.

اندازه‌ی $\Delta T = \frac{Q}{mc}$ افزایش می‌یابد. در این مثال ما برای توضیح دادن چگونگی رفتار جسم از کمیت‌های ماکروسکوپیک دما، گرما و گرمای ویژه استفاده کرده‌ایم؛ یعنی علم ترمودینامیک را برای این منظور به کار برده‌ایم.

در این فصل، به بررسی و توصیف قانون‌های ترمودینامیک و کاربرد آن‌ها در ماشین‌های گرمایی می‌پردازیم. به همین منظور، تحولات ماده‌ی خاصی را که معمولاً به صورت گاز یا مایع است، در نظر می‌گیریم. این ماده را دستگاه می‌نامیم. آنچه در اطراف دستگاه قرار دارد و می‌تواند با آن تبادل انرژی داشته باشد، محیط نامیده می‌شود.

۱-۱- معادله‌ی حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۱-۲ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی مسدود شده است. پیستون می‌تواند در درون استوانه حرکت کند (در این جا دستگاه مورد بررسی گاز است). اگر پیستون برای مدتی طولانی در وضعیت (۱) (با حجم V_1) قرار داشته باشد، دما و فشار آن در همه‌ی نقاط گاز یکسان (مثلاً برابر T_1 و P_1) خواهد بود. در این صورت، می‌گوییم که گاز در حالت تعادل است.



شکل ۱-۲

فعالیت ۱-۱

اگر دما و فشار در داخل گاز در شکل ۱-۲ در نقاط مختلف متفاوت باشند، چه رخ می‌دهد؟ این پرسش را در کلاس به بحث بگذارید.

در حالت تعادل هر یک از کمیت‌های فشار، دما و حجم گاز مقدار مشخصی دارد؛ مثلاً، هنگامی که گاز درون استوانه در شکل ۱-۲ در وضعیت (۱) قرار دارد، مقدار این کمیت‌ها به ترتیب برابر با P_1 ، T_1 و V_1 است. حال اگر گاز را گرم کنیم یا پیستون را به طرف راست یا چپ جابه‌جا

کنیم، مقدار بعضی از این کمیت‌ها (یا همه‌ی آن‌ها) تغییر خواهد کرد و اگر مدتی نسبتاً طولانی صبر کنیم، این کمیت‌ها مقدارهای مشخص دیگری چون P_2 ، T_2 و V_2 را اختیار خواهند کرد. از این کمیت‌ها برای توصیف حالت دستگاه می‌توان استفاده کرد و گفت که دستگاه در ابتدا در حالتی بود که کمیت‌های فشار، دما و حجم به ترتیب مقدارهای P_1 ، T_1 و V_1 را داشتند. سپس در اثر گرم شدن یا جابه‌جایی پیستون، دستگاه به حالتی تحول یافت که در آن این کمیت‌ها مقادیر P_2 ، T_2 و V_2 را اختیار کردند. این کمیت‌های ماکروسکوپی که حالت دستگاه را می‌توان برحسب آن‌ها توصیف کرد، متغیرهای ترمودینامیکی نامیده می‌شوند. متغیرهای ترمودینامیکی از یک‌دیگر مستقل نیستند و با هم رابطه دارند؛ مثلاً، اگر در شکل ۱-۲ با ثابت نگه داشتن پیستون (یعنی، در حجم ثابت) گاز را تا دمای معینی گرم کنیم، فشار آن تغییر خواهد کرد و مقدار متفاوتی خواهد داشت. حال اگر بخواهیم این مقدار فشار باز هم تغییر کند، باید دما یا حجم یا هر دو را تغییر دهیم.

رابطه‌ی بین متغیرهای ترمودینامیکی معادله‌ی حالت نامیده می‌شود. معادله‌ی حالت یک دستگاه در حالت کلی بسیار پیچیده است ولی آزمایش نشان می‌دهد هنگامی که گازها بسیار رقیق‌اند، معادله‌ی حالت آن‌ها ساده و مستقل از نوع گاز است. در این حالت، گاز را گاز کامل می‌نامند.

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که برای مقدار معینی گاز کامل نسبت $\frac{PV}{T}$ مقدار ثابتی دارد. این مقدار ثابت به مقدار گاز بستگی دارد و مستقل از نوع گاز است. در نتیجه،

$$\frac{PV}{T} \propto n \quad (1-1)$$

که در آن n مقدار گاز برحسب مول است که به صورت نسبت جرم گاز (m) به جرم مولکولی آن (M) تعریف می‌شود.

$$n = \frac{m}{M} \quad (2-1)$$

تعداد مولکول‌های موجود در هر مول از یک ماده برابر با عدد آووگادرو است. ثابت تناسب در رابطه‌ی ۱-۲ ثابت گازها نامیده می‌شود و مقدار آن برابر است با $R = 8.314 \text{ J/mol.K}$. بنابراین، معادله‌ی حالت گاز کامل که کمیت‌های P ، V و T را به یک‌دیگر مربوط می‌کند، به صورت زیر است:

$$PV = nRT \quad (3-1)$$

مثال ۱-۱

تعیین کنید که در شرایط متعارفی (فشار یک اتمسفر، دمای صفر درجه سلسیوس) در اتاقی به ابعاد $3\text{m} \times 3\text{m} \times 4\text{m}$ چند مول هوا وجود دارد؟
حل: حجم اتاق برابر با 36m^3 است.

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 10^5 \times 36}{8.314 \times 273} = 1589 \text{ mol}$$

۲-۱- فرایندهای ترمودینامیکی

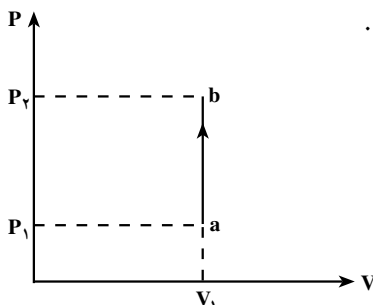
در بخش قبل دیدیم که حالت (تعادل) یک دستگاه را می‌توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی P ، V و T بیان کرد. هم‌چنین، در اثر گرم شدن گاز یا جابه‌جاشدن پیستون حالت گاز تغییر می‌کند و گاز به حالت دیگری می‌رود. هنگامی که دستگاه از یک حالت به حالت دیگر می‌رود، می‌گوییم که یک فرایند ترمودینامیکی انجام شده است.

برای مثال، در بخش قبل دیدیم که گاز ابتدا در حالت P_1 ، V_1 و T_1 بود و در اثر گرم کردن آن با ثابت نگه‌داشتن حجم، گاز به حالت P_2 ، V_1 و T_2 رسید. در این فرایند ترمودینامیکی حالت دستگاه در حجم ثابت از (a) با دمای T_1 و فشار P_1 به (b) با دمای T_2 و فشار P_2 تغییر کرده است.

۲-۱- فعالیت

چند فرایند ترمودینامیکی را که در اطراف شما رخ می‌دهد، ذکر کنید.

فرایندهای ترمودینامیکی را می‌توان در دستگاه مختصات P - V (که بر روی یک محور P و روی محور دیگر V مشخص می‌شود) و یا دستگاه V - T یا دستگاه P - T نمایش داد. نمودار P - V ی فرایند مثال بالا، در شکل ۳-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱

تمرین ۱-۱

نمودار V-T را برای مثال بالا رسم کنید.

به همین طریق نیز می‌توان یک فرایند ترمودینامیکی انجام داد که در آن با جابه‌جا کردن پیستون گاز منبسط یا متراکم شود. در این فرایند نیز می‌توان نمودارهای مربوط را رسم کرد. در ادامه‌ی فصل با فرایندهای ترمودینامیکی مختلف آشنا می‌شویم.

لازم به تذکر است که ترمودینامیک فقط به بررسی وضعیت ماده در حالت‌های تعادل می‌پردازد؛ بنابراین، برای بررسی رفتار گاز با استفاده از این علم، باید فرایند (مثلاً گرم کردن یا جابه‌جا کردن پیستون) را آن قدر آهسته انجام دهیم که گاز در هر لحظه، به حالت تعادل بسیار نزدیک باشد و در نتیجه، متغیرهای ترمودینامیکی P ، V و T گاز در حین فرایند در همه جا یکسان و مقدار مشخصی داشته باشند. در این صورت، با معلوم بودن متغیرهای ترمودینامیکی می‌توان همه‌ی مراحل فرایند را در نمودارهای مربوط نمایش داد.

۱-۳- تبادل انرژی

تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق گرما و کار صورت می‌گیرد.

الف – گرما: در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرما انرژی‌ای است که به علت اختلاف دما بین دو جسم مبادله می‌شود. به عبارت دیگر گرما، هنگامی بین محیط و دستگاه مبادله می‌شود که این دو با هم اختلاف دما داشته باشند. در این کتاب بنا به قرارداد گرمایی را که جسم (دستگاه) می‌گیرد، با علامت مثبت و گرمایی را که دستگاه از دست می‌دهد، با علامت منفی نشان داده‌ایم. در این فصل نیز این قرارداد را رعایت می‌کنیم.

هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما می‌کند، معمولاً فرض می‌شود که با یک منبع گرما در تماس است. منبع گرما، جسمی است که اگر گرما از دست بدهد یا بگیرد، دمای آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نکند؛ مثلاً، هوای اتاق را برای یک استکان چای داغ می‌توان منبع گرما در نظر گرفت. با سرد شدن چای، دمای اتاق به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نمی‌کند.

پرسش ۱-۱

آیا از مخلوط آب و یخ می‌توان به عنوان منبع گرما استفاده کرد؟

ب- کار: در بخش قبل دیدیم که ممکن است در یک فرایند ترمودینامیکی، حجم گاز نیز تغییر کند و گاز متراکم یا منبسط شود؛ مثلاً، برای متراکم کردن گاز داخل استوانه در شکل ۱-۲ باید به پیستون نیرو وارد و آن را به طرف چپ جابه‌جا کنیم. در این صورت، همان‌طور که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندیم، کار انجام داده‌ایم. در این مثال، می‌توان گفت که تبادل انرژی بین دستگاه و محیط از طریق کار صورت گرفته است.

فعالیت ۳-۱

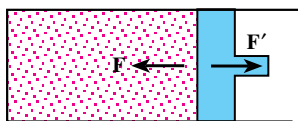
با انگشت خود انتهای یک سرنگ (یا تلمبه‌ی دوچرخه) را مسدود کنید و الف) سعی کنید گاز داخل آن را متراکم کنید؛ ب) پیستون سرنگ را بکشید و سعی کنید گاز داخل آن را منبسط و سپس آن را رها کنید. مشاهدات خود را به کلاس گزارش دهید.

در فعالیت ۳-۱ در حالت الف گاز بر پیستون نیرو وارد می‌کند و ما برای متراکم کردن گاز باید حداقل نیرویی برابر با این نیرو به پیستون وارد کنیم. در حالت ب، پیستون پس از رهاشدن به وضعیت اولیه برمی‌گردد. در این حالت نیز گاز به پیستون نیرو وارد می‌کند ولی نیرویی که محیط (به علت فشار هوا) به پیستون وارد می‌کند، بیش‌تر است. در فعالیت ۳-۱ حضور دو نیرو را به ترتیب در بخش الف و ب تجربه می‌کنیم:

۱) نیروی F که محیط (که پیستون را نیز شامل می‌شود) به گاز وارد می‌کند؛

۲) نیروی F' که گاز به محیط وارد می‌کند (شکل ۱-۴).

این دو نیرو کنش و واکنش‌اند و اندازه‌ی آن‌ها با یک‌دیگر برابر است. هنگامی که پیستون جابه‌جا می‌شود، هر دوی این نیروها کار انجام می‌دهند.



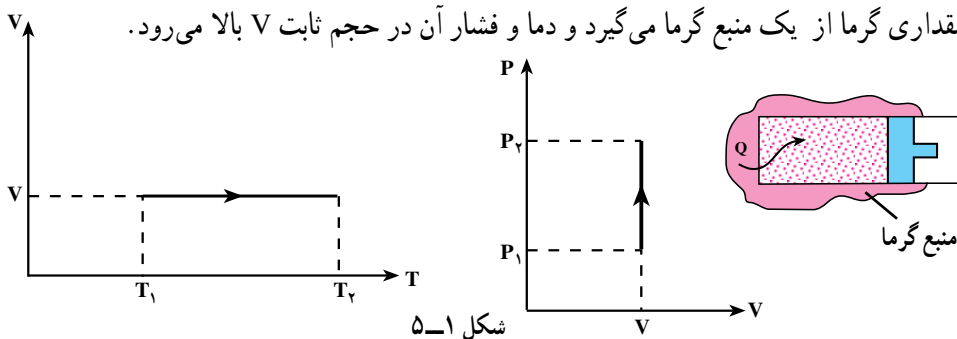
شکل ۱-۴

علامت کار این نیروها مخالف یک‌دیگر است؛ مثلاً در فعالیت ۳-۱ الف کار محیط روی دستگاه مثبت و کار دستگاه بر روی محیط منفی است (چرا؟). کار محیط روی دستگاه را با W و کار دستگاه روی محیط را با W' نشان می‌دهیم. با توجه به مطالب گفته‌شده، $W' = -W$ است. در تراکم $W > 0$ و در انبساط $W < 0$ است.

۴-۱- فرایندهای خاص

در ترمودینامیک بین دو حالت مشخص (مثلاً حالت‌های a و b در شکل ۳-۱) فرایندهای متفاوتی می‌تواند رخ دهد. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارند که کاربرد آن‌ها وسیع‌تر است؛ از جمله: فرایند هم حجم، فرایند هم فشار، فرایند هم دما و فرایند بی در رو. در ادامه، به توصیف این فرایندها می‌پردازیم.

الف) فرایند هم حجم: حجم گاز در حین این فرایند ثابت نگه داشته می‌شود. در فرایند هم حجم، کار صفر است (چرا؟) و گاز فقط می‌تواند با محیط تبادل گرما کند. در شکل ۵-۱ نمودارهای P-V و P-T برای یک فرایند هم حجم نشان داده شده است. طی این فرایند، گاز مقداری گرما از یک منبع گرما می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت V بالا می‌رود.



اگر در این مثال، گاز به صورت هم حجم گرما از دست بدهد، نمودارهای شکل ۵-۱ به چه صورت درمی‌آیند؟

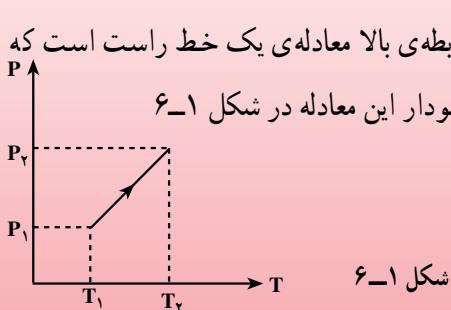
مثال ۲-۱

نمودار P-T فرایند شکل ۵-۱ را در صورتی که گاز کامل باشد، رسم کنید.

حل: چون گاز کامل است، با استفاده از رابطه‌ی ۳-۱ داریم:

$$P = \frac{nRT}{V}$$

از آنجا که $\frac{nR}{V}$ ثابت است، رابطه‌ی بالا معادله‌ی یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این معادله در شکل ۶-۱ نمایش داده شده است.



اکنون به محاسبه‌ی گرمایی که در فرایند هم حجم به دستگاه داده می‌شود، می‌پردازیم.

در فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه‌ی ΔT با رابطه‌ی زیر داده می‌شود.

$$Q = mc\Delta T \quad (4-1)$$

در این رابطه، m جرم جسم و c گرمای ویژه‌ی آن است. باید توجه داشت که در مورد گازها مقدار گرمای ویژه به نوع فرایند بستگی دارد. در نتیجه، در رابطه‌ی ۴-۱ باید گرمای ویژه‌ی مربوط به فرایند هم حجم را، که در زیر تعریف می‌شود، قرار داد.

گرمای ویژه‌ی یک گاز در حجم ثابت برابر است با مقدار گرمایی که در حجم ثابت به یکای جرم آن داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. گرمای ویژه در حجم ثابت را با c_v نشان می‌دهیم؛ بنابراین، رابطه‌ی ۴-۱ به صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = mc_v\Delta T \quad (5-1)$$

معمولاً مقدار گازها را برحسب مول بیان می‌کنند. در نتیجه، اگر با استفاده از رابطه‌ی ۲-۱ جرم گاز را برحسب مول قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$Q = nMc_v\Delta T \quad (6-1)$$

کمیت Mc_v را با C_{MV} نشان می‌دهند و آن را ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت می‌نامند. C_{MV} مقدار گرمایی است که در حجم ثابت به یک مول از یک گاز داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. با استفاده از این کمیت، رابطه‌ی ۶-۱ به صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = nC_{MV}\Delta T \quad (7-1)$$

ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت چند گاز در ستون سوم جدول ۱-۱ آمده است. با تقریب خوبی می‌توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت به جنس گاز بستگی ندارد و برای گازهای تک اتمی برابر با $\frac{3}{2}R$ ، برای گازهای دو اتمی برابر با $\frac{5}{2}R$ است.

مثال ۳-۱

به $^{\circ}/2$ مول از گازهای He ، O_2 و CO_2 ، در حجم ثابت، 100° ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چه قدر افزایش می‌یابد؟
حل: از رابطه‌ی ۷-۱ داریم:

$$\Delta T = \frac{Q}{nC_{MV}}$$

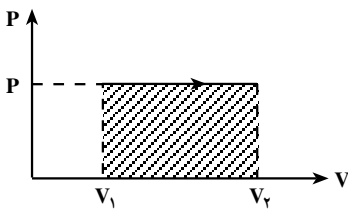
با استفاده از جدول ۱-۱ مقادیر C_{MV} را برای این گازها در رابطه‌ی بالا قرار می‌دهیم.

$$\Delta T = \frac{100}{^{\circ}/2(12/5)} = 40^{\circ}\text{K} \quad \text{برای He}$$

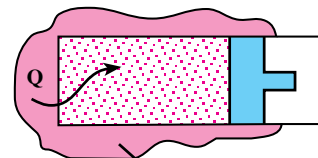
$$\Delta T = \frac{100}{^{\circ}/2(21/2)} = 23/6^{\circ}\text{K} \quad \text{برای O}_2$$

$$\Delta T = \frac{100}{^{\circ}/2(28/5)} = 17/5^{\circ}\text{K} \quad \text{برای CO}_2$$

ب- فرایند هم فشار: فشار گاز در حین این فرایند ثابت می‌ماند. به عنوان مثالی از این فرایند، گازی را مطابق شکل ۷-۱ الف در داخل استوانه‌ای که با یک منبع گرما در تماس است در نظر بگیرید. گاز ابتدا در فشار P و حجم V_1 در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است.



(ب)



(الف)
منبع گرما

شکل ۷-۱

در این صورت، فشار گاز با فشار محیط برابر است (چرا؟) دمای منبع را اندکی بالا می‌بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود که در نتیجه‌ی آن گاز کمی منبسط می‌شود و پیستون را اندکی به سمت راست جابه‌جا می‌کند. اگر گرما دادن به گاز را به همین روش به صورت بسیار آهسته ادامه دهیم، گاز به کندی منبسط می‌شود و پیستون بسیار آهسته

به طرف راست حرکت می‌کند. در این حالت، شتاب حرکت پیستون بسیار کوچک و نزدیک به صفر خواهد بود. در نتیجه، نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند، باید با نیرویی که محیط به پیستون وارد می‌کند، برابر باشد. بنابراین، می‌توان گفت که در حین گرمادادن همواره فشار گاز با فشار محیط برابر است؛ یعنی، در حین فرایند، فشار گاز ثابت می‌ماند. نمودار P-V ی این فرایند در شکل ۷-۱ ب نشان داده شده است.

در این فرایند، هم گرما و هم کار مبادله می‌شوند. در ابتدا کار را محاسبه می‌کنیم. اگر فشار گاز P باشد، گاز در حین فرایند نیروی PA را به پیستون وارد می‌کند که در آن مساحت پیستون است. اگر جابه‌جایی پیستون برابر با d باشد، با استفاده از رابطه‌ی ۴-۱ در فیزیک ۲ و آزمایشگاه، کار W' که دستگاه روی محیط انجام می‌دهد از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$W' = (PA)d$$

ولی ΔV ، تغییر حجم استوانه است که برابر است با $\Delta V = V_2 - V_1$. در نتیجه،

$$W' = P\Delta V \quad (۸-۱)$$

در بخش قبل دیدیم که کار محیط روی دستگاه (W) و کار دستگاه روی محیط (W') برابرند و علامت مخالف دارند. در نتیجه داریم:

$$W = - P\Delta V \quad (۹-۱)$$

تمرین ۲-۱

در بخش ۳-۱ دیدیم که W در تراکم مثبت و در انبساط منفی است. نشان دهید که این نتیجه از رابطه‌ی ۹-۱ نیز به دست می‌آید.

پرسش ۲-۱

علامت W' در تراکم و انبساط گاز چیست؟

با توجه به شکل ۷-۱ ب، حاصل ضرب $P\Delta V$ برابر با سطح زیر نمودار P-V (مساحت هاشورزده) است. این نتیجه برای حالت خاص فرایند هم فشار به دست آمد ولی می‌توان نشان داد که در مورد تمام فرایندهای دیگر نیز درست است. یعنی، در هر فرایند، قدرمطلق کار انجام شده را با محاسبه‌ی سطح زیر نمودار P-V ی آن فرایند می‌توان به دست آورد. علامت کار را نیز می‌توان با

توجه به ملاحظات صفحه‌ی قبل تعیین کرد. در آنچه از این پس می‌آید، که به جز در مواردی که به صراحت قید شود، منظور از کار، W ، یعنی کار انجام‌شده بر روی دستگاه است.

مثال ۴-۱

در یک فرایند هم‌فشار یک لیتر گاز کامل O_2 در دمای $300^\circ K$ مقداری گرما از دست می‌دهد و حجم آن در فشار یک اتمسفر به $9/10$ حجم اولیه‌اش می‌رسد. دمای نهایی و کار انجام‌شده را محاسبه کنید.

حل: چون حجم گاز به‌طور هم‌فشار کاهش یافته است، داریم:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\frac{1}{300} = \frac{9/10}{T_2}$$

$$T_2 = 270^\circ K$$

در این فرایند، کار انجام‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۱-۹، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$W = P\Delta V = 1 \times 10^5 (9/10 - 1) \times 10^{-3} = 10 J$$

اکنون به محاسبه‌ی گرمای مبادله شده در فرایند هم‌فشار می‌پردازیم. در این حالت نیز می‌توانیم از رابطه‌ی ۴-۱ استفاده کنیم ولی همان‌طور که در مورد فرایند هم‌حجم انجام دادیم، باید از گرمای ویژه‌ی مربوط به فرایند هم‌فشار که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، استفاده کنیم. گرمای ویژه‌ی یک گاز در فشار ثابت برابر است با مقدار گرمایی که در فشار ثابت به یکای جرم آن داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. گرمای ویژه در فشار ثابت را با C_p نشان می‌دهیم؛ بنابراین، رابطه‌ی ۴-۱ در مورد فرایند هم‌فشار به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$Q = mc_p \Delta T \quad (10-1)$$

در این‌جا نیز مقدار گاز را برحسب مول بیان می‌کنیم و به جای m مقدار nM را در رابطه‌ی

۱۰-۱ قرار می‌دهیم. سپس کمیت Mc_p را با C_{MP} نمایش می‌دهیم که ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت نامیده می‌شود. C_{MP} مقدار گرمایی است که در فشار ثابت به یک مول از یک گاز داده می‌شود تا دمای آن یک کلوین بالا رود. در این صورت، رابطه‌ی ۱۰-۱ به‌صورت زیر درمی‌آید.

$$Q = nC_{MP} \Delta T \quad (11-1)$$

ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت چند گاز در ستون چهارم جدول ۱-۱ آمده است. می توان نشان داد که با تقریب خوبی C_{MP} به جنس گاز بستگی ندارد و برای گازهای تک اتمی برابر با $\frac{5}{2}R$ ، برای گازهای دو اتمی برابر با $\frac{7}{2}R$ است.

مثال ۵-۱

مقدار گرمایی را که گاز O_2 در مثال ۴-۱ از دست می دهد، محاسبه کنید.
 حل: مقدار n در مثال ۴-۱ برابر است با:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \times 10^5 \times 1 \times 10^{-3}}{8.314 \times 300} = 0.04 \text{ مول}$$

با استفاده از جدول ۱-۱ و رابطه ی ۱۱-۱ داریم:

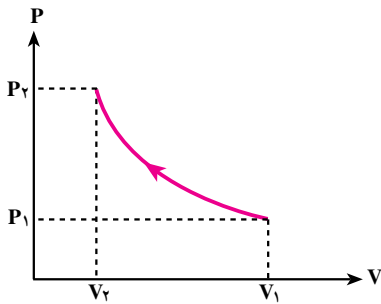
$$Q = nC_{MP}(T_f - T_i) = 0.04(29/4)(270 - 300) = -35/3 \text{ J}$$

جدول ۱-۱- ظرفیت گرمایی مولی چند گاز در حجم ثابت و در فشار ثابت

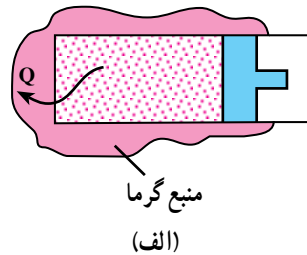
C_{MP} J/mol K	C_{MV} J/mol K	گاز	
۲۰/۸	۱۲/۵	He	گازهای تک اتمی
۲۰/۸	۱۲/۵	Ar	
۲۸/۸	۲۰/۴	H_2	گازهای دو اتمی
۲۹/۸	۲۰/۸	N_2	
۲۹/۴	۲۱/۲	O_2	
۳۷	۲۸/۵	CO_2	گازهای چند اتمی
۳۶/۸	۲۷/۸	NH_3	

پ- فرایند هم دما: دمای دستگاه در حین این فرایند ثابت می ماند؛ مثلاً، برای انجام تراکم هم دما در یک گاز، می توان استوانه ی شکل ۲-۱ را مطابق با شکل ۸-۱ الف در تماس با یک منبع گرما قرار داد و گاز را بسیار آهسته متراکم کرد. قبل از تراکم، گاز و منبع در حالت تعادل اند.

در نتیجه‌ی تراکم، دمای گاز اندکی بالا می‌رود و اختلاف دمای آن با منبع سبب می‌شود که گاز مقداری گرما از دست بدهد و دمای آن با دمای منبع یکسان شود. با ادامه‌ی تراکم، گاز مقداری گرما از دست می‌دهد و دمای آن در حین تراکم ثابت باقی می‌ماند. نمودار P-V ی این تراکم در شکل ۸-۱ ب نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۸-۱

پرسش ۳-۱

در فرایند هم‌دما (شکل ۸-۱) علامت Q و W چیست؟

فعالیت ۴-۱

انتهای یک سرنگ را مسدود و آن را وارد مخلوط آب و یخ کنید. پس از مدتی گاز را به آرامی متراکم کنید. آیا می‌توان این فرایند را هم‌دما در نظر گرفت؟

مثال ۶-۱

۲/۱ مول از یک گاز کامل در دمای 300°K در داخل استوانه‌ای به حجم ۵ لیتر قرار دارد. گاز را به‌طور هم‌دما متراکم می‌کنیم. مطلوب است: (الف) فشار گاز در حجم‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ لیتر؛ (ب) رسم نمودار P-V ی این فرایند.
حل: (الف) با استفاده از معادله‌ی حالت گاز کامل داریم:

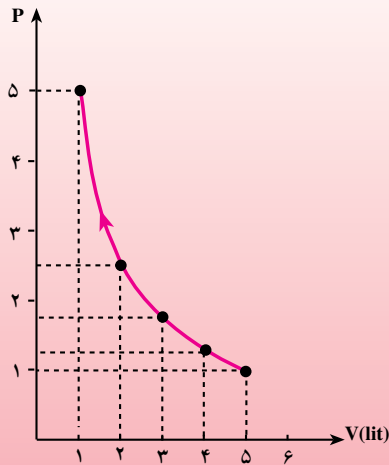
$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{2 \times 8.314 \times 300}{5 \times 10^{-3}} = 99600 \approx 1 \text{ atm}$$

به همین ترتیب، برای حجم‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ لیتر به ترتیب فشارهای ۱/۲۵،

۱/۷، ۲/۵ و ۵ اتمسفر به دست می‌آیند.

ب) با استفاده از مقدارهای بالا به کمک نقطه‌یابی نمودار P-V ی این فرایند در

شکل ۹-۱ رسم شده است.



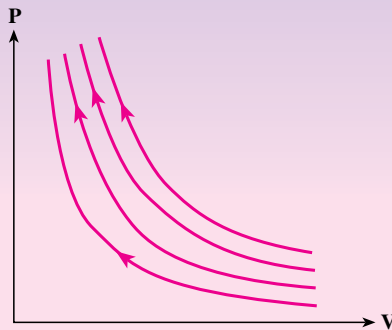
شکل ۹-۱

تمرین ۳-۱

در شکل ۱۰-۱ نمودار P-V ی مربوط به تراکم هم‌دمای یک گاز در دماهای

$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ نشان داده شده است. تعیین کنید که هر نمودار مربوط به کدام

دماست.

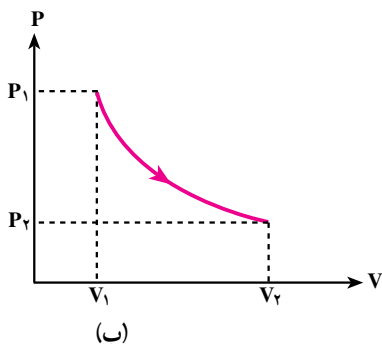


شکل ۱۰-۱

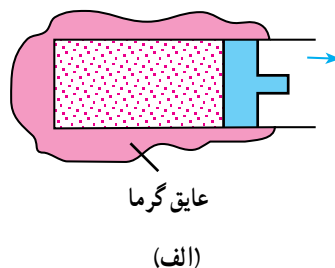
ت- فرایند بی‌دررو: در این فرایند بین دستگاه و محیط گرما مبادله نمی‌شود. برای انجام دادن

این فرایند، باید دستگاه را مطابق شکل ۱۱-۱ الف عایق‌بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را بسیار

آهسته انجام دهیم. نمودار P-V ی انبساط بی‌درروی گاز در شکل ۱۱-۱ ب نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۱



(الف)

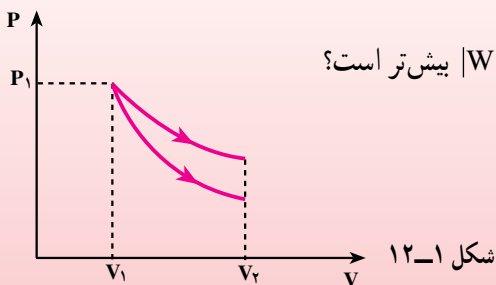
پرسش ۴-۱

چگونه می‌توان تراکم گاز را در فعالیت ۴-۱ به صورت بی‌دررو انجام داد؟ توضیح دهید.

هنگامی که یک گاز را به سرعت متراکم (یا منبسط) می‌کنیم، گاز فرصت تبادل گرما را با محیط پیدا نمی‌کند. در این صورت نیز می‌توان گفت که فرایند به صورت بی‌دررو انجام شده است.

مثال ۷-۱

گازی را در حجم V_1 و فشار P_1 در نظر بگیرید. آن را یک بار به صورت هم‌دما و یک بار به صورت بی‌دررو منبسط می‌کنیم. نمودارهای مربوط در شکل ۱۲-۱ رسم شده‌اند. (الف) کدام یک از نمودارها به فرایند بی‌دررو و کدام یک به فرایند هم‌دما مربوط است؟



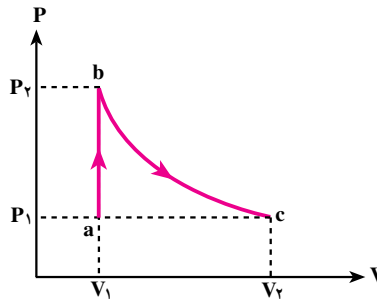
(ب) در کدام فرایند $|W|$ بیش‌تر است؟

حل: (الف) در انبساط هم‌دما فشار گاز کاهش می‌یابد (چرا؟) ولی چون گاز در این فرایند با یک منبع گرما در تماس است، مقداری گرما از منبع گرما می‌گیرد و در نتیجه کاهش فشار در آن در مقایسه با فرایند بی‌دررو، که در طی آن گاز گرما نمی‌گیرد، کم‌تر است. بنابراین، نمودار هم‌دما در بالای نمودار بی‌دررو قرار می‌گیرد. (ب) چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم‌دما بیش‌تر است، $|W|$ برای این فرایند مقدار بیش‌تری دارد.

تمرین ۴-۱

نمودارهای P - V ی مربوط به تراکم هم دما و تراکم بی درروی یک گاز کامل را از فشار و حجم اولیه P_1 و V_1 رسم کنید.

دستگاه‌ها می‌توانند فرایندی را طی کنند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایندی را که در شکل ۱۳-۱ می‌بینید، از دو فرایند هم حجم و بی دررو تشکیل شده است. طی این فرایند، دستگاه از طریق یک فرایند هم حجم از حالت a (با حجم V_1 و فشار P_1) به حالت b (با حجم V_1 و فشار P_2) می‌رود. سپس از طریق یک انبساط بی دررو به حالت c (با حجم V_2 و فشار P_1) می‌رسد.

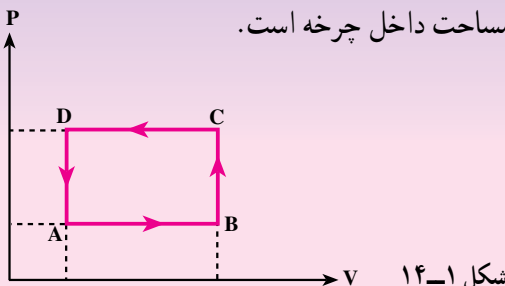


شکل ۱۳-۱

در این مثال، گاز را مثلاً می‌توان از طریق یک فرایند هم فشار به حالت اولیه (نقطه‌ی a) برگرداند. فرایندی که در طول آن دستگاه پس از طی چند فرایند به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد، چرخه نامیده می‌شود.

تمرین ۵-۱

الف) در چرخه‌ی شکل ۱۴-۱ توضیح دهید که در هر مرحله، چه فرایندی انجام می‌شود. ب) تعیین کنید که کار انجام شده در چرخه مثبت است یا منفی؟ پ) نشان دهید که کار کل برابر با مساحت داخل چرخه است.



شکل ۱۴-۱

تمرین ۱-۷

گاز کاملی را با حجم و فشار اولیه V_1 و P_1 در نظر بگیرید که چرخه‌ای به شرح زیر را طی می‌کند. (۱) حجم و فشار آن از طریق یک انبساط هم‌دما به V_2 و P_2 می‌رسد. (۲) سپس حجم و فشار آن از طریق یک انبساط بی‌دررو به V_3 و P_3 می‌رسد. (۳) در اثر یک تراکم هم‌دما حجم و فشار آن به V_4 و P_4 می‌رسد؛ (۴) سپس یک تراکم بی‌دررو طوری انجام می‌شود که حجم و فشار گاز را به مقدار اولیه‌ی آن‌ها برمی‌گرداند. این چرخه را در دستگاه P - V رسم کنید. (این چرخه، چرخه‌ی کارنو نامیده می‌شود).

۱-۵- انرژی درونی

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های مولکول‌های تشکیل دهنده‌ی آن ماده برابر است. به طور دقیق‌تر، می‌توان گفت که انرژی درونی U با مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل مولکول‌های آن ماده برابر است. هنگامی که دستگاه در حالت معینی قرار دارد، که مثلاً با P ، T تعیین می‌شود، مقدار U مشخص است و به این متغیرها بستگی دارد. در مورد گاز کامل می‌توان نشان داد که انرژی درونی فقط تابع دمای مطلق گاز است. هنگامی که دستگاه در یک فرایند با مبادله‌ی کار، گرما یا هر دو با محیط از یک حالت اولیه، که مثلاً انرژی درونی آن U_1 است، به یک حالت دیگر می‌رود ممکن است انرژی درونی آن تغییر کند و مثلاً به مقدار U_2 برسد. مقدار تغییر انرژی درونی، یعنی $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به مقدار گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط ارتباط دارد. این ارتباط، موضوع قانون اول ترمودینامیک است.

پرسش ۱-۵

تغییر انرژی درونی یک دستگاه در یک چرخه چه قدر است؟

۱-۶- قانون اول ترمودینامیک

این قانون در واقع همان قانون پایستگی انرژی است که در مورد فرایندهای ترمودینامیکی به کار

می‌رود. اگر دستگاه در فرایندی، گرمای Q را بگیرد و کار W بر روی آن انجام شود، تغییر انرژی درونی آن بر طبق این قانون با رابطه‌ی زیر داده می‌شود.

$$\Delta U = Q + W \quad (۱۲-۱)$$

این رابطه قانون اول ترمودینامیک نامیده می‌شود. در این رابطه، Q می‌تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد. W نیز می‌تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد. بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ($\Delta U > 0$)، یا کاهش ($\Delta U < 0$) یابد یا این که تغییر نکند ($\Delta U = 0$).

مثال ۸-۱

در مثال‌های ۴-۱ و ۵-۱ تغییر انرژی درونی گاز چه قدر است؟
حل: در مثال‌های ۴-۱ و ۵-۱ دیدیم که دستگاه $35/3 \text{ J}$ گرما از دست می‌دهد و کار انجام شده بر روی دستگاه 10 J است. تغییر انرژی درونی دستگاه از رابطه‌ی ۱۲-۱ به دست می‌آید:

$$\Delta U = Q + W = -35/3 + 10 = -25/3 \text{ J}$$

تمرین ۷-۱

دستگاهی در یک انبساط بی‌دررو 5 J کار بر روی محیط انجام می‌دهد. تغییر انرژی درونی آن چه قدر است؟

گرما و کاری که بین دستگاه و محیط مبادله می‌شوند، فقط در حین فرایند معنا دارند. در واقع، می‌توان گفت که انتقال انرژی بین دستگاه و محیط از طریق تبادل کار و گرما صورت می‌گیرد. پس از اتمام فرایند، انرژی‌های منتقل شده به صورت انرژی درونی دستگاه درمی‌آیند و دیگر نمی‌توانیم از موجودی کار یا گرمای دستگاه صحبت کنیم. حتی نمی‌توانیم مشخص کنیم که کدام بخش از افزایش انرژی درونی از کار و کدام بخش از گرما ناشی شده است. این وضع را می‌توان به دریاچه‌ای تشبیه کرد که آب آن در اثر بارش باران و وارد شدن رودها افزایش می‌یابد. پس از این افزایش نمی‌توان گفت که کدام بخش از آب دریاچه از طریق رود و کدام بخش از آن از طریق باران تأمین شده است.

۷-۱- ماشین‌های گرمایی

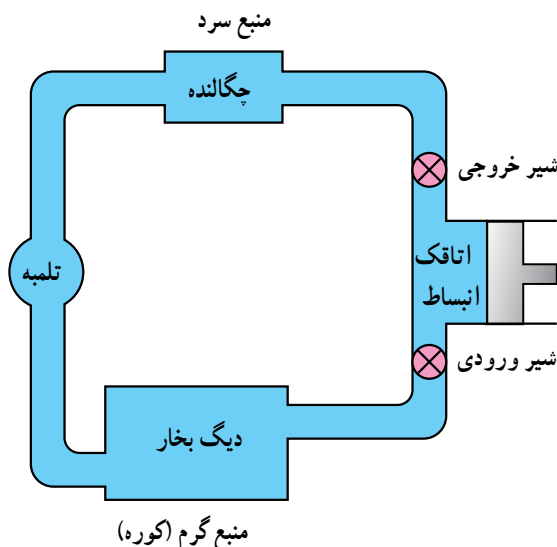
تا حدود ۲۵۰ سال پیش انرژی مکانیکی مورد نیاز انسان به‌طور عمده از طریق نیروی ماهیچه‌ای انسان‌ها و حیوان‌ها تأمین می‌شد. از نیروی حاصل از باد و جریان آب (مثلاً در آسیاب‌های بادی و آبی) نیز انرژی مکانیکی به‌دست می‌آید. اما استفاده از این منابع انرژی فقط در زمان‌ها و مکان‌های خاصی امکان‌پذیر بود. امروزه بیش‌تر انرژی مورد نیاز انسان از طریق ماشین‌های گرمایی به‌دست می‌آید. این ماشین‌ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می‌کنند. از نظر تاریخی اولین ماشین گرمایی، ماشین بخار بوده است. انرژی مکانیکی حاصل از ماشین بخار در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار و ... به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نیروگاه‌ها این انرژی ابتدا به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس از طریق شبکه‌ی برق رسانی به مکان‌های مختلف منتقل می‌گردد. از این طریق انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی فراهم می‌آید.

ماشین‌های درون‌سوز نوع دیگری از ماشین‌های گرمایی هستند که با سوخت‌هایی چون بنزین یا گازوئیل کار می‌کنند. این نوع ماشین‌ها در موتور اتومبیل‌ها و کامیون‌ها و نیز در برخی هواپیماها به کار گرفته می‌شوند.

ماشین‌های گرمایی با ترکیب چند فرایند (مانند شکل فرایندهای تمرین‌های ۱-۵ و ۱-۶) مقداری گرما دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کنند. از آن‌جا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین‌ها عموماً به این صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد؛ یعنی، این ماشین‌ها در یک چرخه‌ی معین کار می‌کنند و این چرخه، در ضمن کار ماشین دائماً تکرار می‌شود.

اساس کار همه‌ی ماشین‌های گرمایی یکسان است. در زیرچگونگی کار ماشین بخار و ماشین‌های گرمایی درون‌سوز را توضیح می‌دهیم. با بررسی این دو نمونه، با اساس کار ماشین‌های گرمایی آشنا می‌شوید.

الف — ماشین بخار: ماشین بخار در نواحی مختلف جهان به‌طور گسترده برای تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. دیدیم که در ماشین‌های گرمایی، دستگاه در یک چرخه مقداری گرما دریافت می‌کند و بر روی محیط کار انجام می‌دهد. در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور که در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است، آب در دیگ بخار مقداری گرما دریافت می‌کند و پس از انجام دادن چند فرایند مختلف، که در زیر به توضیح آن‌ها می‌پردازیم، به حالت اولیه‌ی خود در دیگ بخار برمی‌گردد و این چرخه دائماً تکرار می‌شود. چون گرما توسط کوره (یعنی از بیرون دستگاه) به آب داده می‌شود، این ماشین را برون‌سوز می‌نامند.



شکل ۱۵-۱- بخش‌های اصلی ماشین بخار عبارت‌اند از: دیگ بخار، اتاقک انبساط، چگالنده، تلمبه، شیرهای ورودی و خروجی و لوله‌های رابط.

برای بررسی نحوه‌ی کار ماشین بخار، مقدار مشخصی آب را در دیگ بخار در نظر می‌گیریم. فرایندهایی را که آب در ماشین بخار طی می‌کند، به چهار مرحله‌ی اصلی تقسیم می‌کنیم.

الف) مرحله‌ی اول: در این مرحله، آب درون دیگ بخار در فشار ثابت از کوره گرما می‌گیرد و به بخار تبدیل می‌شود. دما و حجم بخار آب در این مرحله تا حد معینی افزایش می‌یابد.

ب) مرحله‌ی دوم: شیر ورودی باز می‌شود و بخار آب که دما و فشار آن بسیار زیاد است، وارد اتاقک انبساط می‌شود؛ به پیستون نیرو وارد می‌کند و آن را به حرکت درمی‌آورد. در نتیجه‌ی این حرکت، بخار آب به سرعت منبسط می‌شود و دما و فشار آن کاهش می‌یابد. چون این انبساط بسیار سریع انجام می‌شود، این فرایند را می‌توان بی‌دررو در نظر گرفت. این حرکت پیستون برای به کار انداختن مولد برق، به حرکت درآوردن چرخ‌های لکوموتیو و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاری که دستگاه بر روی محیط انجام می‌دهد (یعنی، کاری که ماشین گرمایی انجام می‌دهد) در این مرحله به دست می‌آید.

پ) مرحله‌ی سوم: طراحی ماشین به گونه‌ای است که وقتی پیستون به انتهای مسیر خود رسید، بازگردانده می‌شود. در هنگام بازگشت پیستون، شیر ورودی بسته و شیر خروجی باز می‌شود و بخار آب به سمت چگالنده، که لوله‌های آب سرد آن را خنک می‌کنند، هدایت می‌شود. در چگالنده،

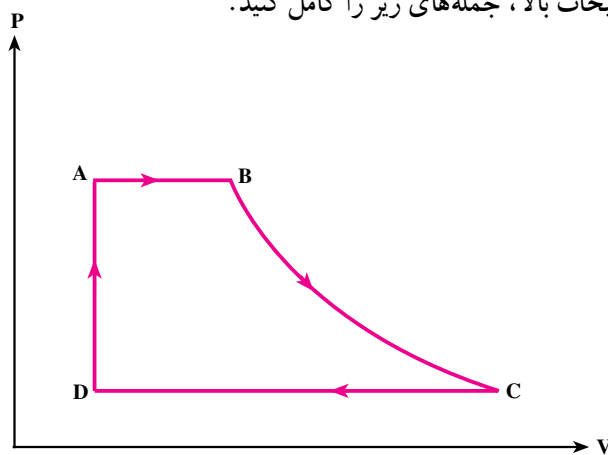
بخار آب در فشار ثابت گرما از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود (میعان). در این فرایند، دما و حجم (بخار آب) کاهش می‌یابد.

ت) مرحله‌ی چهارم: تلمبه، آب حاصل از میعان را به دیگ بخار برمی‌گرداند و فشار آن را به فشار اولیه می‌رساند و یک چرخه‌ی ترمودینامیکی کامل می‌شود.

در حین کار ماشین بخار، این چرخه دائماً تکرار می‌شود. دستگاه در این چرخه به‌طور عمده با دو منبع گرما (کوره و چگالنده) تبادل گرما می‌کند. کوره را که در دمای بالاتری قرار دارد، منبع گرم و چگالنده را منبع سرد می‌نامیم.

فعالیت ۱-۵

نمودار $P-V$ ی یک ماشین بخار در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است. با توجه به توضیحات بالا، جمله‌های زیر را کامل کنید.



شکل ۱-۱۶ — نمودار $P-V$ ی یک ماشین بخار آرمانی

از A تا B — تبدیل آب به بخار آب داغ در فشار ثابت

از B تا C — انبساط بی‌درروی بخار آب (در این مرحله، انرژی مکانیکی مورد نیاز از ماشین بخار به‌دست می‌آید)

از C تا D — میعان بخار آب در فشار ثابت

از D تا A — افزایش فشار آب تا فشار اولیه در حجم تقریباً ثابت

الف - در مسیر A تا B، آب با گرفتن گرما از کوره به ... تبدیل می شود و حجم و دمای آن ... می یابد.

ب - در مسیر B تا C بخار آب داغ وارد استوانه می شود و سبب ... می شود. در نتیجه ی این عمل، فشار و دمای بخار آب ... می یابد.

پ - در مسیر C تا D بخار آب گرما از دست می دهد. دمای آن پایین می آید و ... می شود.

ت - در مسیر D تا A تلمبه آب را به دیگ بخار برمی گرداند. در این عمل، فشار آب به

ث - در یک چرخه ی کامل ماشین بخار، دستگاه از مقداری گرما می گیرد، مقداری کار انجام می دهد و بقیه را به ... می دهد.

فعالیت ۱-۷

با استفاده از نمودار P-V ی ماشین بخار

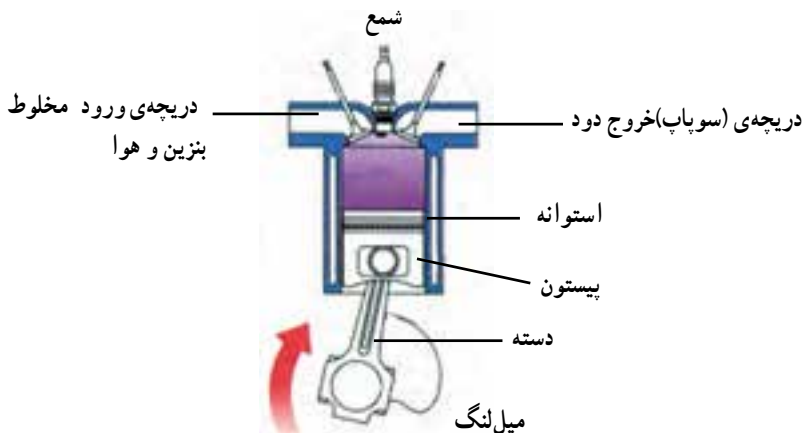
الف - نوع فرایند را در هر مرحله بیان کنید.

ب - مشخص کنید که آب در مراحل AB، BC و CD گرما گرفته یا از دست داده است؟

پ - کار انجام شده را در هر مرحله با استفاده از سطح زیر نمودار مشخص کنید و علامت کار انجام شده در چرخه ی کامل را تعیین کنید.

ت - انرژی درونی دستگاه در فرایند B تا C افزایش می یابد یا کاهش؟

ب - ماشین گرمایی درون سوز: موتورهای پیستونی یکی از متداول ترین انواع موتورهای درون سوزاند. موتور همه ی اتومبیل ها، هواپیماهای ملخ دار، بعضی از کشتی ها و قطارها و نیروگاه های کوچک، درون سوز است. موتور گرمایی درون سوز در دو نوع بنزینی و دیزلی طراحی شده است. در این جا به توصیف موتور بنزینی می پردازیم. قسمت اصلی این موتور از یک استوانه که پیستون در داخل آن حرکت می کند، تشکیل شده است. اجزای موتور در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است. در این نوع موتور بخشی از انرژی حاصل از سوخت، سبب حرکت پیستون می شود. این حرکت از طریق دسته و میل لنگ به حرکت دورانی تبدیل می شود. با انتقال این حرکت دورانی به چرخ ها



شکل ۱-۱۷- اجزای موتور

اتومبیل حرکت می‌کند. بخش دیگر انرژی از طریق رادیاتور، که موتور را سرد می‌کند، و لوله‌ی خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.

مراحل مختلف کار ماشین‌های گرمایی درون‌سوز به شرح زیر است.

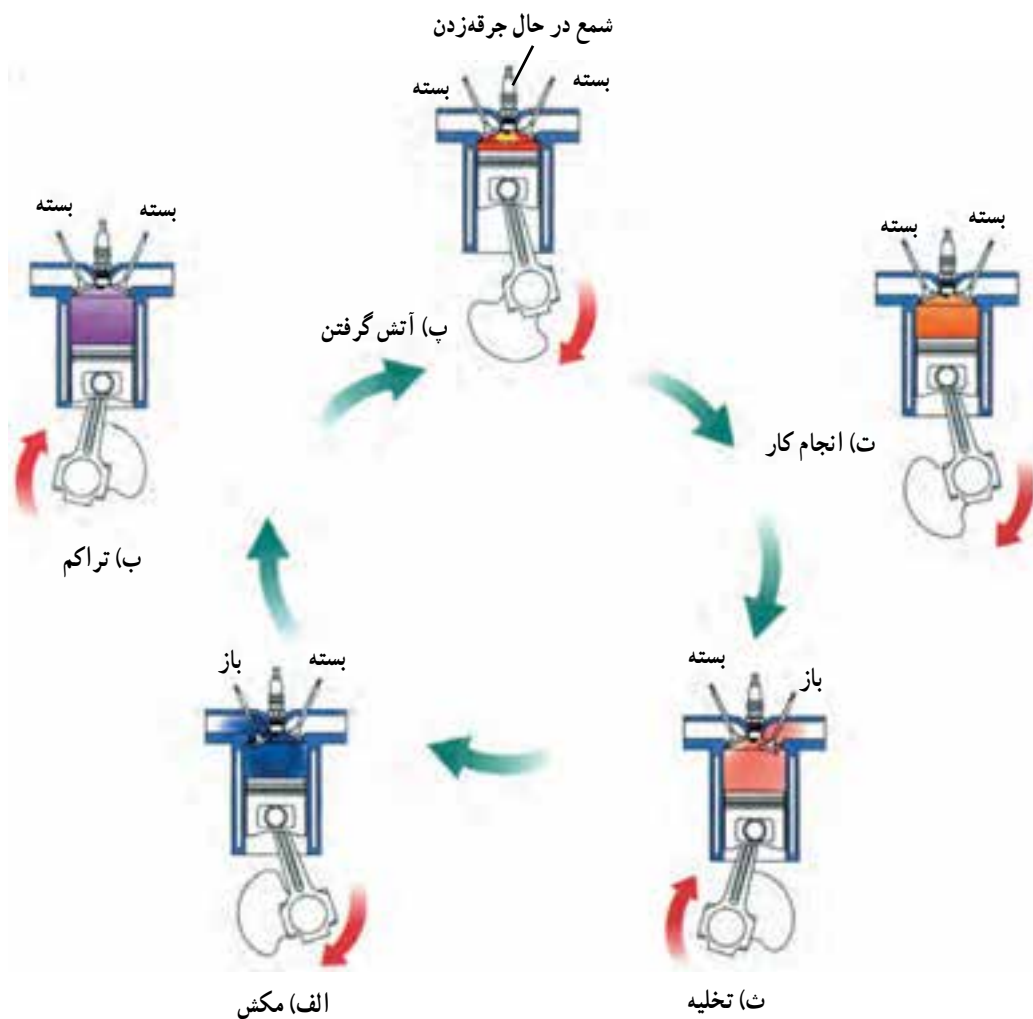
الف) مرحله‌ی مکش: با پایین آمدن پیستون (از یک وضعیت اولیه) مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه‌ی ورودی وارد استوانه می‌شود. وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، این دریچه بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا در داخل استوانه محبوس می‌شوند.

ب) مرحله‌ی تراکم: پیستون بالا می‌آید، مخلوط را تراکم می‌کند و به حجم اولیه می‌رساند. در این وضعیت، دمای مخلوط بسیار بالا می‌رود.

پ) مرحله‌ی آتش‌گرفتن: هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط آتش می‌گیرد و دما و فشار آن تا مقدار زیادی بالا می‌رود. چون آتش گرفتن مخلوط در داخل استوانه رخ می‌دهد و مخلوط از بیرون گرما نمی‌گیرد، این موتورها را درون‌سوز می‌گویند.

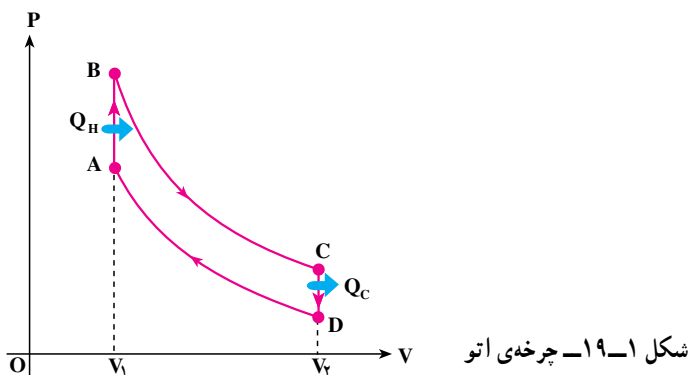
ت) مرحله‌ی انجام کار: در این مرحله در اثر فشار زیاد، دستگاه منبسط می‌شود و پیستون را به طرف پایین می‌راند. کاری که دستگاه بر روی محیط انجام می‌دهد، در این مرحله حاصل می‌شود.

ث) مرحله‌ی تخلیه: در این مرحله، بخشی از دود حاصل از سوختن مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه‌ی خروج دود، که در این مرحله باز می‌شود، خارج می‌گردد و سپس پیستون بالا آمده و بقیه‌ی دود را خارج می‌کنند. به این ترتیب، مقدار زیادی گرما به هوای بیرون داده می‌شود. موتور دائماً این چرخه را تکرار می‌کند. مرحله‌های مختلف کار موتور درون‌سوز در شکل ۱-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۱ - مراحل مختلف در چرخه‌ی موتورهای درون‌سوز

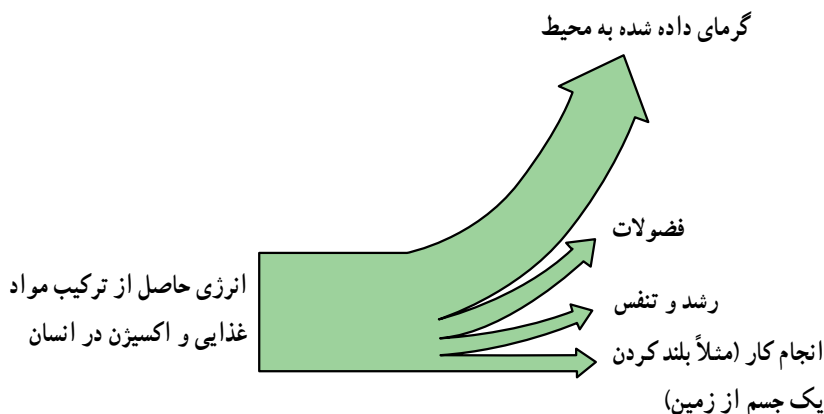
معمولاً برای بررسی ساده‌تر و تطبیق طرز کار این موتورها با چرخه‌های ترمودینامیکی، فرض می‌شود که مخلوط آتش‌نگیر و ولی آن قدر گرما به آن داده شود که به فشار و دمای نهایی در مرحله‌ی آتش‌گرفتن، برسد. در مرحله‌ی تخلیه نیز فرض می‌شود که دستگاه در داخل استوانه باقی بماند ولی آن قدر از آن گرما گرفته شود تا به وضعیت اولیه برگردد. به این ترتیب، چرخه‌ی معادلی به نام چرخه‌ی اتو (مطابق شکل ۱۹-۱) برای این ماشین‌ها در نظر گرفته می‌شود.

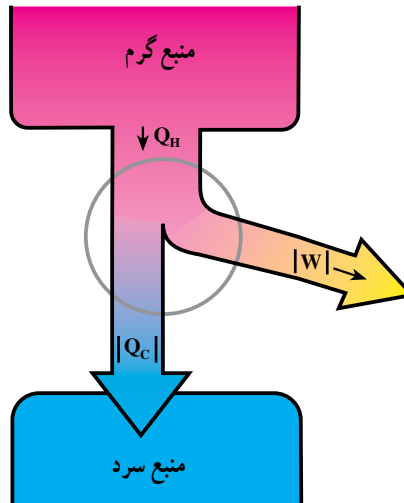


A تا B — دستگاه مقداری گرما می‌گیرد و دما و فشار آن به مقدار زیادی بالا می‌رود (معادل مرحله‌ی آتش‌گرفتن)
 B تا C — دستگاه منبسط می‌شود و پیستون را به طرف پایین می‌راند.
 C تا D — دستگاه مقداری گرما از دست می‌دهد و دما و فشار آن کاهش می‌یابد (معادل مرحله‌ی تخلیه)
 D تا A — دستگاه متراکم می‌شود و فشار و حجم آن به وضعیت اولیه برگردانده می‌شود.

۱-۸- بازدهی ماشین گرمایی

در بررسی ماشین‌های بخار و درون‌سوز دیدیم که دستگاه مقداری گرما Q_H از منبع گرم می‌گیرد. قسمتی از آن را به کار $|W|$ تبدیل می‌کند و بقیه‌ی گرما $|Q_C|$ را به منبع سرد می‌دهد. این نتیجه برای ماشین‌های بخار و درون‌سوز به دست آمد ولی ماشین‌های گرمایی دیگر نیز بر همین اساس کار می‌کنند. حتی بدن انسان نیز در حدود ۲۵ درصد از انرژی حاصل از مواد غذایی را به کار تبدیل می‌کند و بقیه را به صورت گرما و ... به محیط بیرون می‌دهد (شکل ۱-۲۰).
 با توجه به آن چه گفته شد، طرز کار ماشین‌های گرمایی را می‌توان در شکل ۱-۲۱ خلاصه کرد.





شکل ۲۱-۱

در این شکل طرز کار ماشین‌های گرمایی به صورت وار نشان داده شده است. بخشی از گرمای گرفته شده Q_H به کار $|W|$ تبدیل می‌شود و بقیه‌ی آن، $|Q_C|$ ، به منبع سرد داده می‌شود. قانون اول ترمودینامیک را می‌توان برای یک چرخه‌ی این ماشین‌ها به صورت زیر نوشت:

$$\Delta U = Q_H - |Q_C| - |W| \quad (۱۳-۱)$$

چون دستگاه پس از طی کردن یک چرخه به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد، $\Delta U = 0$ است. در نتیجه، کاری که ماشین گرمایی بر روی محیط انجام می‌دهد، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$|W| = Q_H - |Q_C| \quad (۱۴-۱)$$

بازدهی (η) ماشین‌های گرمایی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \quad (۱۵-۱)$$

این کمیت نشان می‌دهد که چه کسری از گرمای حاصل از سوخت به کار تبدیل می‌شود. با استفاده از رابطه‌ی (۱۴-۱) $|W| \leq Q_H$ است. در نتیجه، بازدهی ماشین‌های گرمایی نمی‌تواند بیش‌تر از ۱ باشد. بازدهی ماشین‌های بخار در حدود ۵۰ درصد و ماشین‌های درون‌سوز در بهترین وضعیت در حدود ۴۰ درصد است.

پرسش ۶-۱

یکای بازده چیست؟

پرسش ۷-۱

چگونه می‌توان بازدهی ماشین گرمایی را افزایش داد؟

مثال ۹-۱

یک ماشین گرمایی در هر چرخه 4000 J گرما را از منبع گرم دریافت می‌کند و 2500 J گرما به منبع سرد می‌دهد. الف) در هر چرخه چه مقدار کار بر روی محیط انجام می‌شود؟ ب) بازدهی این ماشین چه قدر است؟
حل: الف) از رابطه‌ی ۱۳-۱ داریم:

$$|W| = Q_H - |Q_C|$$

$$|W| = 4000 - 2500 = 1500\text{ J}$$

ب) با استفاده از رابطه‌ی ۱۴-۱ بازدهی این ماشین به دست می‌آید.

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H}$$

$$\eta = \frac{1500}{4000} = 0.375$$

در این ماشین گرمایی حدود ۶۲ درصد از گرمای دریافت شده به منبع سرد داده شده و تنها حدود ۳۸ درصد آن به کار تبدیل شده است.

۹-۱-۱ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی)

در بررسی ماشین‌های گرمایی در بخش قبل، دیدیم که همه‌ی این ماشین‌ها با دو منبع گرما که دمای متفاوتی دارند، کار می‌کنند. در این ماشین‌ها، دستگاه گرمای Q_H را از یک منبع گرم می‌گیرد مقداری از آن را به کار $|W|$ تبدیل می‌کند و بقیه $(|Q_C|)$ را به یک منبع سرد می‌دهد. در واقع هیچ‌یک از ماشین‌های گرمایی که تاکنون ساخته شده‌اند، نمی‌توانند همه‌ی گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند.

پرسش ۸-۱

اگر ماشینی همه‌ی گرمای دریافتی را به کار تبدیل کند، آیا قانون اول ترمودینامیک

نقض می‌شود؟

اکنون این سؤال پیش می‌آید که آیا فناوری امروز بشر به حدی نرسیده است که ماشینی بسازد که تمام گرمای دریافتی را به کار تبدیل کند؟ آیا در آینده ممکن است چنین ماشینی ساخته شود یا این که در آینده نیز ساختن چنین ماشینی امکان‌پذیر نیست؟

قانون دوم ترمودینامیک به این سؤال پاسخ می‌دهد. براساس این قانون، ممکن نیست دستگاه چرخه‌ای را بسازیم که در حین آن مقداری گرما را از منبع گرم جذب و تمام آن را به کار تبدیل کند.

بیان بالا، قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نامیده می‌شود. توجه داریم که، همان‌طور که در پرسش ۱-۸ مطرح شد، اگر در یک چرخه تمام گرما به کار تبدیل شود، قانون اول ترمودینامیک نقض نمی‌شود اما براساس قانون دوم ترمودینامیک امکان طراحی و ساخت ماشینی که این تبدیل را انجام دهد، غیرممکن است. اگر قانون دوم ترمودینامیک بر فرایندهای ترمودینامیک حاکم نبود، می‌توانستیم قطاری بسازیم که از هوا گرما بگیرد (هوا را سرد کند) و با تبدیل کامل آن به کار حرکت کند یا نیروگاهی در کنار دریا بسازیم که با سرد کردن آب دریا انرژی الکتریکی تولید کند.

۷-۱- فعالیت

جمله‌های زیر را تکمیل کنید :

الف) بنابر قانون دوم ترمودینامیک، در یک چرخه مقدار مشخصی نمی‌تواند به طور کامل به تبدیل شود. (ب) بازدهی یک ماشین گرمایی هرگز نمی‌تواند باشد.

بیش‌ترین بازدهی یک ماشین گرمایی را سعدی کارنو مشخص کرده است. این بازده از ماشینی به دست می‌آید که با چرخه‌ی کارنو (که در تمرین ۱-۶ معرفی شده است)، بین دو منبع گرم و سرد به ترتیب با دماهای T_H و T_C ، کار می‌کند. بازدهی ماشین کارنو از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (16-1)$$

این بازده از بازدهی هر ماشین دیگری که بین این دو منبع کار کند، بیش‌تر است. به این علت، بازده با زیرنویس max مشخص شده است.

مثال ۱۰-۱

می‌خواهیم یک ماشین گرمایی بسازیم که منبع گرم آن آب سطح اقیانوس در دمای 27°C و منبع سرد آن آب اعماق اقیانوس در دمای 7°C باشد. حداکثر بازدهی که می‌توان به دست آورد (بازدهی ماشین کارنو) چه قدر است؟

حل:

$$T_C = 273 + 7 = 280\text{K}$$

$$T_H = 273 + 27 = 300\text{K}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۶-۱ داریم:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

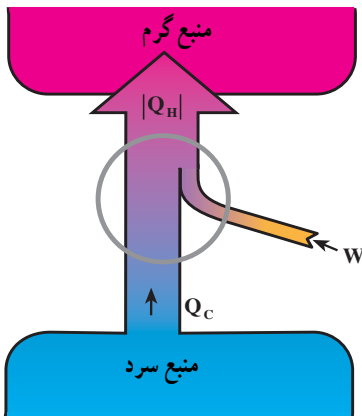
$$\eta_{\max} = 1 - \frac{280}{300} = 0.067 = 6.7\%$$

بازدهی هر ماشین دیگری که بین این دو منبع کار کند، از این مقدار کم‌تر است.

۱۰-۱-۱ یخچال

اگر جسم سردی را در کنار جسمی گرم قرار دهیم، چه اتفاقی می‌افتد؟ آیا ممکن است گرما خودبه‌خود از جسم سرد به جسم گرم منتقل شود؟ یعنی جسم گرم گرما بگیرد و گرم‌تر شود و جسم سرد گرما از دست بدهد و سردتر شود؟

چه پدیده‌ای اتفاق می‌افتد که محتویات داخل یخچال سرد می‌شود؟ اگر یخچال به برق وصل نباشد، آیا باز هم این امر رخ می‌دهد؟



یخچال وسیله‌ای است که گرما را از جسم سرد به جسم گرم منتقل می‌کند. در یخچال هم دستگاه یک چرخه را طی می‌کند و در حین آن محیط با انجام کار W بر روی دستگاه گرمای Q_C را از منبع سرد (محتویات درون یخچال) می‌گیرد و گرمای $|Q_H|$ را به منبع گرم (هوای بیرون یخچال) می‌دهد.

طرز کار یخچال به صورت طرح‌وار در شکل ۲۲-۱

نشان داده شده است.

شکل ۲۲-۱

همان‌طور که در شکل ۱-۲۲ می‌بینید، یخچال مانند یک ماشین گرمایی است که در جهت عکس کار می‌کند. طرز کار یخچال در بخش مطالعه‌ی آزاد آمده است.

تمرین ۱-۸

علامت W ، Q_H و Q_C را در یخچال مشخص کنید.

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک،

چون در چرخه $\Delta U = 0$ است،

$$|Q_H| = Q_C + W \quad (1-17)$$

ملاحظه می‌شود گرمایی که یخچال به هوای اطراف خود می‌دهد، بیش‌تر از گرمایی است که از داخل یخچال می‌گیرد.

مطالعه‌ی آزاد

ساز و کار یخچال

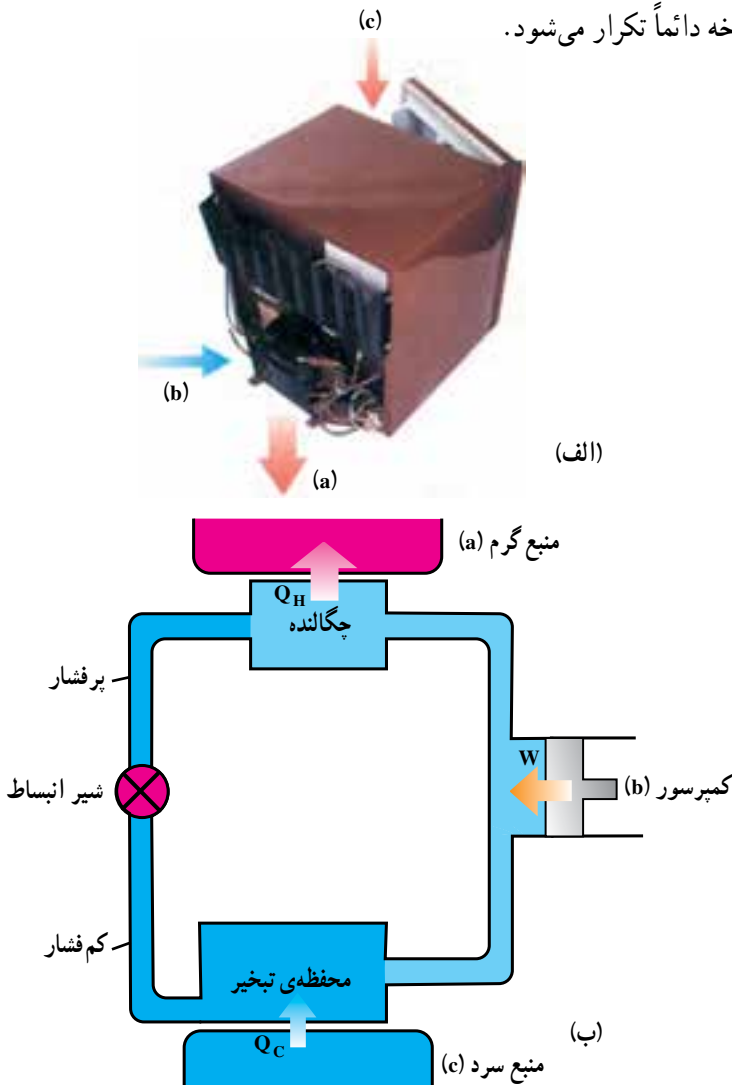
یخچال یکی از وسایل بسیار ضروری خانگی است. یخچال‌ها را در اندازه‌های مختلف می‌سازند و آن‌ها را با حجم داخلی مشخص می‌کنند؛ مثلاً یخچال ۹ فوت دارای حجم داخلی ۹ فوت مکعب یا حدود ۲۴۰ لیتر است.

در شکل ۱-۲۳ الف یک یخچال و در شکل ۱-۲۳ ب نمایش طرح‌وار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی یخچال عبارت‌اند از: چگالنده، محفظه‌ی تبخیر، کمپرسور و شیر انبساط. چگالنده در تماس با منبع گرم (هوای بیرون یخچال) و محفظه‌ی تبخیر با منبع سرد (محتویات داخل یخچال) در تماس است. ماده‌ای که چرخه‌ی ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است. این گاز از جمله گازهایی است که به لایه‌ی اُزن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به‌صورت مایع در فشار زیاد و در محفظه‌ی تبخیر به‌صورت گاز در فشار کم قرار دارد.

شیر انبساط راه بسیار باریکی است که این دو ناحیه‌ی کم‌فشار و پرفشار را به یک‌دیگر وصل می‌کند.

طرز کار یخچال به طور مختصر به شرح زیر است.

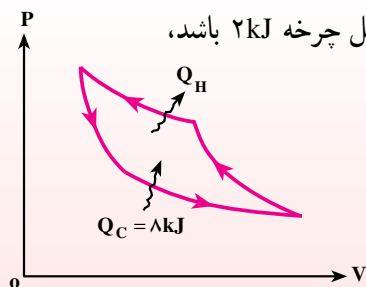
کمپرسور با انجام کار W گاز را از محفظه‌ی تبخیر می‌گیرد و به چگالنده منتقل می‌کند و دما و فشار آن را بالا می‌برد. در این مرحله، گاز که دمای آن از دمای منبع گرم بالاتر است، گرمای Q_H را به این منبع می‌دهد و مایع می‌شود. هنگامی که این مایع پرفشار از شیر انبساط می‌گذرد و وارد محفظه‌ی تبخیر با فشار کم می‌شود، به بخار تبدیل می‌گردد و گرمای نهان تبخیر Q_C را از منبع سرد می‌گیرد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.



شکل ۱-۲۳- الف) یخچال، ب) نمایش طرح وار آن

مثال ۱۱-۱

نمودار P-V ی چرخه‌ای که دستگاه در یک یخچال فرضی طی می‌کند، در شکل ۱-۲۴ نشان داده شده است. اگر دستگاه در هر چرخه ۸kJ گرما از منبع سرد بگیرد و مساحت داخل چرخه ۲kJ باشد،



شکل ۱-۲۴

(الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می‌دهد؟
 (ب) فضایی که یخچال در آن قرار دارد، یک اتاق در بسته به ابعاد $3\text{m} \times 4\text{m} \times 2\text{m}$ است. در هر چرخه، دمای اتاق چند کلون افزایش می‌یابد؟ فرض کنید دمای اتاق 27°C و فشار آن یک اتمسفر و ظرفیت گرمایی مولی هوا در حجم ثابت 20 J/mol.K است. ($R \simeq 8\text{ J/mol.K}$)

حل: (الف) با استفاده از رابطه‌ی ۱-۱۷ داریم:

$$|Q_H| = Q_C + W$$

$$|Q_H| = 8 + 2 = 10\text{ kJ}$$

(ب) با استفاده از معادله‌ی حالت گاز کامل تعداد مول‌های موجود در اتاق را به دست می‌آوریم:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{1.05 \times 24}{300 \times 8} = 1.03 \text{ مول}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱-۷ تغییر دمای اتاق به دست می‌آید.

$$\Delta T = \frac{|Q_H|}{nC_{MV}}$$

$$\Delta T = \frac{10 \times 1.03}{1.03 \times 20} = 0.5\text{ K}$$

ضریب عملکرد یخچال: از نظر اقتصادی بهترین یخچال، یخچالی است که با انجام کار (صرف انرژی الکتریکی) کم‌تر گرمای بیشتری را از درون یخچال (منبع سرد) به بیرون منتقل کند. ضریب عملکرد (K) یخچال به صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع سرد به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد، تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_C}{W} \quad (18-1)$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیش‌تر باشد، استفاده از آن بیش‌تر مقرون به صرفه است. ضریب عملکرد یخچال‌های تجاری بین ۲ تا ۷ است.

پرسش ۹-۱

چگونه می‌توان ضریب عملکرد یخچال را افزایش داد؟

مثال ۱۲-۱

توان یک یخچال 25°C وات و ضریب عملکرد آن ۴ است.

(الف) چه مدت طول می‌کشد تا در این یخچال 1 kg آب 25°C به یخ 4°C تبدیل شود؟

(ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می‌شود؟

$$c_{\text{آب}} = 4200\text{ J/kgK} \text{ و } c_{\text{یخ}} = 2100\text{ J/kgK} \text{ و } L_f = 335000\text{ J/kg}$$

حل: (الف) گرمای Q_C که آب از دست می‌دهد، برابر است با:

$$Q_C = mc_{\text{آب}} \Delta T_1 + mL_f + mc_{\text{یخ}} \Delta T_2$$

$$Q_C = 1 \times 4200 \times 25 + 1 \times 335000 + 1 \times 2100 \times 4 = 448400\text{ J}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۸-۱ برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

$$W = \frac{Q_C}{K} = \frac{448400}{4} = 112100\text{ J}$$

با استفاده از رابطه‌ی توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به دست می‌آید:

$$t = \frac{W}{P} = \frac{112100}{250} = 448/4\text{ s} = 7/5\text{ دقیقه}$$

(ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$|Q_H| = Q_C + W$$

$$|Q_H| = 448400 + 112100 = 560500\text{ J}$$

طرز کار کولر گازی مانند یخچال است. در کولر گازی منبع سرد در داخل اتاق و منبع گرم در بیرون قرار دارد. کولر با انجام کار، گرما را از داخل اتاق می‌گیرد و به هوای بیرون می‌دهد.

تمرین ۱-۹

توان مصرفی یک کولر گازی 700 وات و ضریب عملکرد آن $2/5$ است. این کولر در هر دقیقه چه مقدار گرمای اتاق را می‌گیرد و چه مقدار گرما به فضای بیرون می‌دهد؟

۱-۱۱ قانون دوم ترمودینامیک (به بیان یخچالی)

می‌دانیم که گرما از جسم گرم به جسم سرد منتقل می‌شود ولی عکس این عمل، خودبه‌خود صورت نمی‌گیرد. اگر یک لیوان آب خنک در اتاق قرار داشته باشد، گرما خود به خود از آب به اتاق منتقل نمی‌شود. ولی وقتی آب را در داخل یخچال قرار می‌دهیم، یخچال با صرف انرژی مقداری گرما را از آب می‌گیرد و به هوای اتاق منتقل می‌کند. مطالب بالا موضوع قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی را تشکیل می‌دهد. براساس این بیان:

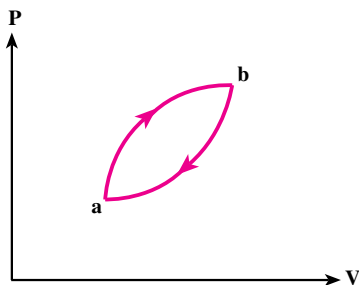
گرما به خودی خود از جسم سرد به جسم گرم منتقل نمی‌شود.

می‌توان نشان داد که دو بیان ماشین گرمایی و یخچالی قانون دوم ترمودینامیک، معادل یک‌دیگرند.

اگر قانون دوم به بیان یخچالی نقض شود (یعنی گرما به‌طور خود بخود از جسم سرد به جسم گرم منتقل شود)، قانون دوم به بیان ماشین گرمایی نیز نقض می‌شود (یعنی می‌توان ماشینی ساخت که در یک چرخه تمام گرما را به کار تبدیل کند) و به عکس.

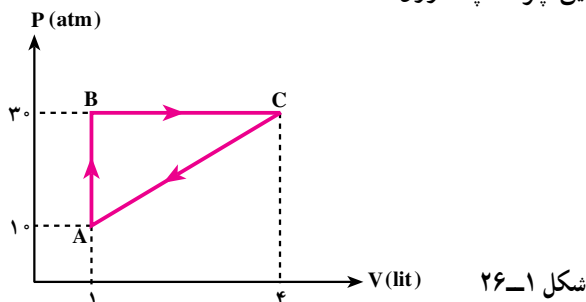
تمرین‌های فصل اول

- ۱- در فرایند هم حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش داد؟
 - ۲- حجم 5° مول از یک گاز کامل تک اتمی $8/3$ لیتر و فشار آن $1/5$ اتمسفر است. مقداری گرما به آن می‌دهیم تا فشار آن از طریق یک فرایند هم‌حجم دو برابر شود. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید.
 - ۳- در مسأله‌ی ۲ فرض کنید که به جای گرما دادن حجم گاز را از طریق یک فرایند هم فشار نصف کنیم. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید.
 - ۴- نشان دهید در فرایند هم‌دما، هر چه دمای گاز بیش‌تر باشد، برای متراکم کردن آن تا یک اندازه‌ی معین باید کار بیش‌تری انجام داد.
 - ۵- نشان دهید در انبساط هم‌فشار گاز کامل، باید به آن گرما داد.
 - ۶- در یک فرایند 50°J - کار بر روی دستگاه انجام می‌شود و دستگاه 40°J گرما دریافت می‌کند، تغییر انرژی درونی آن چه قدر است؟
 - ۷- فرایندی را نام ببرید که در آن دمای دستگاه بدون دریافت یا انتقال گرما تغییر می‌کند.
 - ۸- در یک انبساط بی‌دررو گاز 50°J کار بر روی محیط انجام می‌دهد. تغییر انرژی درونی گاز چه قدر است؟
 - ۹- در شکل ۱-۲۵ فرایند چرخه‌ای برای گازی نشان داده شده است.
- الف) تعیین کنید که گاز در این فرایند گرما گرفته یا از دست داده است؟
- ب) اگر قدر مطلق گرمای مبادله شده 40°J باشد، کار انجام شده چه قدر است؟

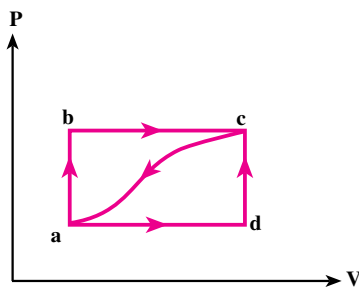


شکل ۱-۲۵

۱۰- گاز داخل یک استوانه، چرخه‌ای مطابق شکل ۱-۲۶ را می‌پیماید. گرمای خالص داده شده به گاز در این چرخه چند ژول است؟



۱۱- دستگاهی مطابق شکل ۱-۲۷ از طریق مسیر abc از حالت a به c می‌رود.



شکل ۱-۲۷

در این مسیر، دستگاه ۹۰ ژول گرما می‌گیرد و ۷۰ ژول کار انجام می‌دهد.

الف) تغییر انرژی درونی دستگاه در مسیر abc چه قدر است؟

ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرآیند از مسیر adc انجام شود، قدر مطلق کار انجام شده روی

دستگاه در مقایسه با مسیر abc بیش‌تر است یا کم‌تر؟ گرمای داده شده به گاز بیش‌تر است یا کم‌تر؟

پ) اگر گاز را از مسیر (منحنی) به حالت a برگردانیم، چه قدر باید از آن انرژی بگیریم؟

۱۲- ته یک سرنگ را می‌بندیم. آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به تدریج گرم

می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟

۱۳- چرا برخی نیروگاه‌ها را در کنار رودهای بزرگ یا دریاها احداث می‌کنند؟

۱۴- یک ماشین بخار $10^4 \times 2/254$ کJ گرما از دیگ بخار دریافت می‌کند و

$10^4 \times 1/915$ کJ گرما در چگالنده از دست می‌دهد.

الف) کار انجام شده در یک چرخه چند کیلوژول است؟

ب) بازدهی این ماشین چه قدر است؟

پ) بازدهی واقعی از این مقدار کم تر است؟ چرا؟

۱۵- یک موتور درون سوز در هر چرخه 8000 J گرما از سوزاندن سوخت دریافت می کند و

2000 J کار تحویل می دهد. گرمای حاصل از سوخت $5 \times 10^4 \text{ J/g}$ است و موتور در هر ثانیه 40

چرخه را می پیماید. کمیت های زیر را حساب کنید.

الف - بازدهی موتور،

ب - گرمای تلف شده در هر چرخه،

پ - سوخت مصرف شده در هر چرخه،

ت - توان موتور.

۱۶- ضریب عملکرد یک یخ ساز (فریزر) $K = 4$ است. این یخ ساز در هر ساعت، $1/5 \text{ kg}$

آب با دمای 2°C θ_1 را به یخ با دمای 1°C $\theta_2 = -1^\circ \text{C}$ تبدیل می کند.

$$L_F = 335000 \text{ J/kg} \text{ و } C_{\text{یخ}} = 2100 \text{ J/kg.K} , C_{\text{آب}} = 4200 \text{ J/kg.K}$$

الف - چه مقدار گرما در هر ساعت باید از آب گرفته شود؟

ب - یخ ساز در هر ساعت چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف می کند؟

پ - چه مقدار گرما در هر ساعت به بیرون داده می شود؟

۱۷- آیا می توان با بازگذاشتن در یخچال، آشپزخانه را خنک کرد؟ در مورد پاسخ خود توضیح

دهید.

۱۸- وجود برفک روی بدنه ی داخلی محفظه ی یخ ساز یخچال چه اثری بر عملکرد دستگاه

دارد؟

۱۹- یک کولر گازی در هر دقیقه $9 \times 10^4 \text{ J}$ گرما از اتاق می گیرد و در همان مدت، $1/3 \times 10^5 \text{ J}$

گرما به فضای بیرون می دهد.

الف - توان مصرفی این کولر چند وات است؟

ب - ضریب عملکرد آن چند است؟

۲۰- یک مول از یک گاز کامل تک اتمی در یک ماشین گرمایی چرخه ای را مطابق شکل

۲۸-۱ می پیماید. مطلوب است :

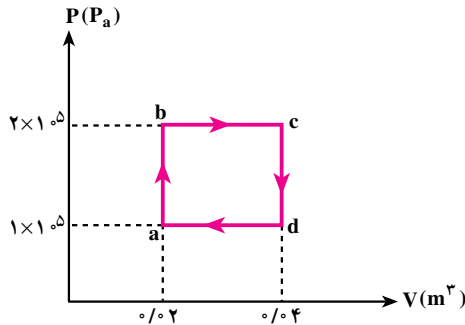
الف - کار انجام شده در طی چرخه،

ب - گرمای مبادله شده در فرایند abc،

پ - بازدهی چرخه،

ت - بازدهی یک ماشین گرمایی کارنو که بین بالاترین و پایین ترین دمای چرخه عمل می کند،

چه قدر است؟



شکل ۱-۲۸

۲۱- کمیت های Q_H ، Q_C و W که در یک چرخه در یک ماشین گرمایی یا یخچال مبادله

می شود، به صورت زیر داده شده است.

$$(۱) \quad Q_C = ۴۰J, \quad W = ۶۰J, \quad Q_H = ۱۰۰J$$

$$(۲) \quad Q_C = ۰, \quad W = ۱۰۰J, \quad Q_H = ۱۰۰J$$

$$(۳) \quad Q_C = ۴۰J, \quad W = ۶۰J, \quad Q_H = ۱۰۰J$$

$$(۴) \quad Q_C = ۱۰۰J, \quad W = ۰, \quad Q_H = ۱۰۰J$$

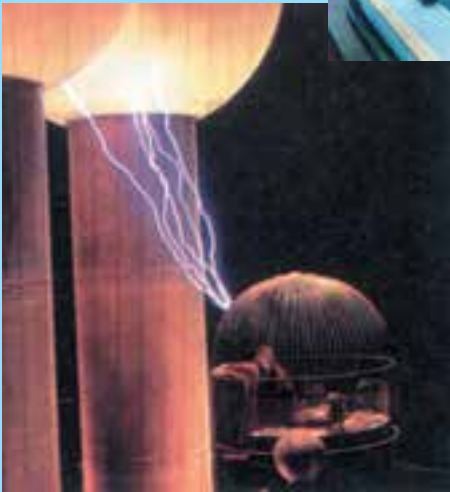
$$(۵) \quad Q_C = ۵۰J, \quad W = ۶۰J, \quad Q_H = ۱۰۰J$$

الف) در کدام مورد قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی نقض می شود؟

ب) در کدام مورد قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نقض می شود؟

پ) در کدام مورد قانون اول ترمودینامیک نقض می شود؟

۶



شکل بالا یک مولد وان دوگراف را در موزه‌ی علوم بوستون نشان می‌دهد. این مولد یک تخلیه‌ی الکتریکی عظیم ایجاد می‌کند. اما همان‌طور که در شکل دیده می‌شود شخص درون قفس فلزی (اتاقک فارادی) از اثرهای این تخلیه حفاظت شده است.

الکتریسیته ی ساکن

در کتاب‌های علوم دوره‌ی راهنمایی و نیز کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، با بارالکتریکی و نحوه‌ی باردار کردن اجسام آشنا شدید و آموختید که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد. بار الکترون را بار منفی و بار پروتون را مثبت نام‌گذاری کرده‌اند. علاوه بر این، دیدید که بار الکتریکی به‌وجود نمی‌آید و نیز از بین نمی‌رود و فقط از یک جسم به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این بیان، پایداری بارالکتریکی گفته می‌شود. هم‌چنین آموختید اجسام باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. این نیروها ممکن است رپایشی یا رانشی باشند. بیش‌تر نیروهایی که شما با آن‌ها آشنا هستید و با آن‌ها سرو کار دارید، منشأ الکتریکی دارند. به کمک این نیروها می‌توان ساختار اجسام، پیوند بین ذره‌ها و بسیاری از پدیده‌هایی را که در طبیعت رخ می‌دهند، توصیف کرد. دامنه‌ی کاربرد دانش الکتریسیته در فناوری و صنعت به قدری گسترده است که نیازی به بیان ندارد.

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

۲-۱- قانون کولن

همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندید، دو جسم باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. نیرویی که دو جسم باردار بر یک‌دیگر وارد می‌کنند، نیروی الکتریکی نام دارد. نیروهای الکتریکی ممکن است رپایشی (جاذبه‌ای) یا رانشی (دافعه‌ای) باشند. دیدیم که اگر بارهای الکتریکی دو جسم همنام باشند، یعنی هر دو مثبت یا هر دو منفی باشند، نیروهای بین دو جسم، رانشی است. در حالی که اگر بارالکتریکی یک جسم مثبت و بارالکتریکی دیگری منفی باشد، نیروی الکتریکی بین دو جسم، رپایشی خواهد بود.

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

شارل کولن، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای

توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آن‌ها بستگی دارند، شناسایی کند. شما هم می‌توانید با انجام دادن آزمایش‌های ساده‌ای، با این عامل‌ها آشنا شوید.

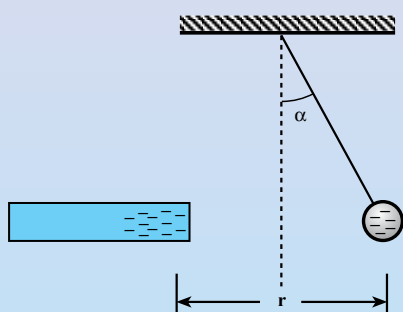
آزمایش ۱-۲

وسایلهای آزمایش: میله‌ی پلاستیکی – پارچه‌ی پشمی – ورقه‌ی نازک آلومینیومی و مقداری نخ خشک
شرح آزمایش:

۱- کمی ورقه‌ی آلومینیومی را فشرده کنید و آن را به‌صورت کره‌ی کوچکی در آورید. این کره‌ی کوچک را به کمک یک تکه نخ خشک آویزان کنید. این وسیله را آونگ الکتریکی می‌نامیم و از آن در آزمایش‌های الکتریسته‌ی ساکن استفاده می‌کنیم.
۲- به آونگ الکتریکی به روش القا یا با تماس به جسمی که بار منفی دارد، بار الکتریکی منفی بدهید.

۳- میله را باردار کرده و آن را به آونگ الکتریکی نزدیک کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟

۴- میله را در فاصله‌ی معینی از آونگ و نزدیک آن نگاه دارید و زاویه‌ی انحراف آونگ را از وضع قائم با دقت مشاهده کنید.



شکل ۱-۲*

۵- مرحله‌ی ۴ را تکرار کنید و هر بار فاصله‌ی میله را از آونگ تغییر دهید. مراقب باشید که در مراحل ۴ و ۵، میله با آونگ تماس پیدا نکند. نتیجه‌ی آزمایش را بنویسید و به کلاس گزارش دهید.

* اجسام باردار با بار منفی را، با رنگ آبی و با بار مثبت را با رنگ قرمز نشان می‌دهیم.

کولن نیز با انجام دادن آزمایش و اندازه‌گیری‌های دقیق به این نتیجه رسید که :
نیروهای الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار با مجذور فاصله‌ی آن‌ها از یک‌دیگر نسبت

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

وارون دارد؛ یعنی :

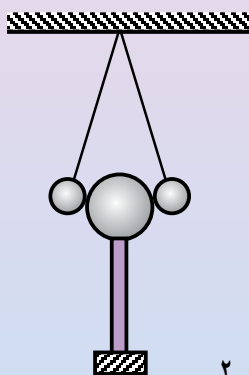
برای آن‌که معلوم شود نیروی الکتریکی به چه عامل یا عامل‌های دیگری بستگی دارد،
آزمایش ۲-۲ را انجام دهید.

آزمایش ۲-۲

وسيله‌های آزمایش: برای انجام دادن این آزمایش، علاوه بر وسیله‌های آزمایش
۱-۲ به دو کره‌ی فلزی کوچک و هم‌اندازه که روی پایه‌های عایق نصب شده باشند،
نیاز دارید.

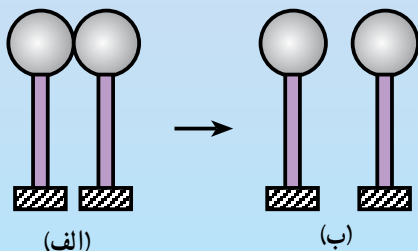
شرح آزمایش:

- ۱- دو آونگ الکتریکی کاملاً مشابه بسازید و آن‌ها را از یک نقطه آویزان کنید.
- ۲- یک کره را باردار کنید و آن را هم‌زمان به دو آونگ تماس دهید. سپس آن را از آونگ‌ها دور کنید. چه اتفاقی می‌افتد؟ زاویه‌ی بین دو نخ آونگ‌ها را بعد از دور شدن کره‌ی فلزی اندازه‌گیری کنید.



شکل ۲-۲

- ۳- کره‌ی دیگر را که بدون بار است به کره‌ی باردار تماس دهید و آن‌ها را از یک‌دیگر جدا کنید. با انجام دادن این عمل، بار الکتریکی به‌طور مساوی بین دو کره تقسیم می‌شود.



شکل ۳-۲

۴- ابتدا با تماس دست به آونگ‌ها، بار آن‌ها را تخلیه کنید. سپس یکی از کره‌های باردار را مانند مرحله‌ی ۲ به دو آونگ تماس دهید. این بار نیز زاویه‌ی بین دو آونگ را اندازه‌گیری کنید.

۵- نتیجه‌ی مرحله‌های ۲ و ۴ را با یک‌دیگر مقایسه کنید. نتیجه را بنویسید و به کلاس گزارش دهید.

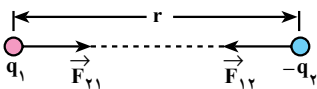
کولن نیز با انجام دادن آزمایش و اندازه‌گیری‌های دقیق به این نتیجه رسید که : نیروی الکتریکی با حاصل ضرب اندازه‌ی بار دو ذره نسبت مستقیم دارد ؛ یعنی :

$$F \propto q_1 \cdot q_2$$

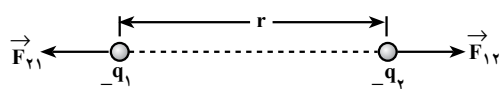
کولن، نتیجه‌ی آزمایش‌های خود را که امروزه به نام قانون کولن شناخته شده است ، به صورت زیر بیان کرد :

نیروی الکتریکی ربایشی یا رانشی بین دو ذره‌ی باردار q_1 و q_2 که در فاصله‌ی r از یک‌دیگر قرار دارند، با حاصل ضرب بار دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصله‌ی دو ذره از یک‌دیگر نسبت وارون دارد.

$$F \propto \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$



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



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

شکل ۲-۴

در شکل ۲-۴ به معنای نیرویی است که ذره‌ی اول به ذره‌ی دوم وارد می‌کند و \vec{F}_{21} نیرویی است که ذره‌ی دوم به ذره‌ی اول وارد می‌کند.

نیروهای الکتریکی که دو ذره‌ی باردار به یک‌دیگر وارد می‌کنند، هم‌اندازه و در جهت‌های مخالف یک‌دیگرند (قانون سوم نیوتون). اگر اندازه‌ی این نیروها را با F نشان دهیم، داریم :

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

قانون کولن را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (۱-۲)$$

در این رابطه، q_1 و q_2 برحسب کولن، r برحسب متر و F برحسب نیوتون است. $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ضریب تناسب است که در آن ضریب ϵ_0 یک ثابت جهانی است و ضریب گذردهی الکتریکی خلأ نام دارد.

$$\frac{C^2}{N.m^2} \quad 8/85 \times 10^{-12}$$

برای سادگی در نوشتن، می توان ضریب قانون کولن را با نماد k نشان داد.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{N.m^2}{C^2}$$

به کمک قانون کولن (رابطه ی ۱-۲) می توان اندازه ی نیروی الکتریکی ای را که دو ذره ی باردار به یک دیگر وارد می کنند، محاسبه کرد. در محاسبه ها، علامت مثبت یا منفی بارهای الکتریکی را در رابطه ی ۱-۲ وارد نمی کنیم و ربایشی یا رانشی بودن نیروها را به کمک نوع بارها مشخص می کنیم.

مثال ۱-۲

دو ذره با بارهای الکتریکی $q_1 = 2 \cdot C$ و $q_2 = 5 \cdot C$ در فاصله ی ۳cm از یک دیگر ثابت شده اند. اندازه ی نیروی که دو ذره به یک دیگر وارد می کنند و نوع آن را مشخص کنید.

حل: با استفاده از رابطه ی ۱-۲ داریم:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{(2 \times 10^{-6}) \cdot (5 \times 10^{-6})}{9 \times 10^{-4}}$$

$$F = 100 N$$

چون بارهای الکتریکی دو ذره همنوع اند، نیروی که دو ذره به یک دیگر وارد می کند، رانشی است.

اگر تعدادی ذره ی باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برآیند نیروهایی است که هر یک از ذره های دیگر در غیاب سایر ذره ها، بر آن ذره وارد می کنند.

مثال ۲-۲

سه ذره با بارهای الکتریکی $q_1 = ۲/۵ \text{ C}$ ، $q_2 = -۱ \text{ C}$ و $q_3 = ۴ \text{ C}$ در نقطه‌های A و B و C مطابق شکل ۵-۲ ثابت شده‌اند. نیروی الکتریکی وارد بر q_3 را محاسبه کنید. $BC = ۲ \text{ cm}$ و $AC = ۶ \text{ cm}$.



شکل ۵-۲

حل: نیرویی که بر q_3 وارد می‌شود، برآیند دو نیرویی است که از طرف q_1 و q_2 بر آن وارد می‌شوند. برای محاسبه‌ی این نیرو، نیرویی را که هریک از بارهای q_1 و q_2 در غیاب دیگری، بر q_3 وارد می‌کند، محاسبه می‌کنیم. نیروی الکتریکی وارد بر q_3 ، برآیند این دو نیروست (شکل ۶-۲). با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ داریم:

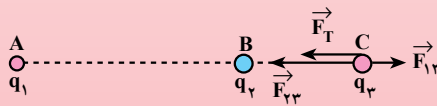
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \times \frac{2/5 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{13} = 25 \text{ N} \quad \text{نیرویی که } q_1 \text{ بر } q_3 \text{ وارد می‌کند، رانشی است.}$$

$$F_{23} = 9 \times 10^9 \times \frac{1 \times 4 \times 10^{-12}}{4 \times 10^{-4}}$$

$$F_{23} = 90 \text{ N} \quad \text{نیرویی که } q_2 \text{ بر } q_3 \text{ وارد می‌کند، ربایشی است.}$$



شکل ۶-۲

مطابق شکل ۶-۲ نیروهای \vec{F}_{13} و \vec{F}_{23} در جهت‌های مخالف یک‌دیگرند. اندازه‌ی برآیند آن‌ها، \vec{F}_T ، برابر تفاضل اندازه‌های آن‌ها و در جهت نیروی بزرگ‌تر (در جهت \vec{F}_{23}) است.

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

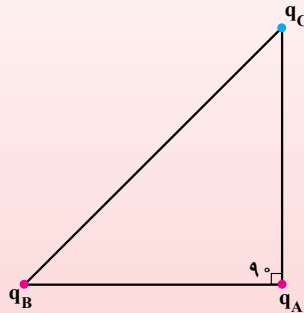
$$F_T = F_{23} - F_{13} = 65 \text{ N}$$

تمرین ۱-۲

در مثال ۲-۲، نیروی وارد بر q_1 را به دست آورید.

مثال ۳-۲

سه ذره ی باردار مطابق شکل ۷-۲ در سه رأس مثلث قائم الزاویه ی ABC ثابت شده اند. بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر ذره ی باردار واقع در رأس زاویه ی قائمه را محاسبه کنید؛ در صورتی که $q_C = -4 \cdot C$ ، $q_B = 4 \cdot C$ ، $q_A = 2 \cdot C$ ، $AC = 2\sqrt{3} \text{ cm}$ و $AB = 3 \text{ cm}$ باشد.



شکل ۷-۲

حل: نیروی بین q_A و q_B رانشی و بین q_A و q_C رایشی است. با استفاده از رابطه ی ۱-۲ داریم:

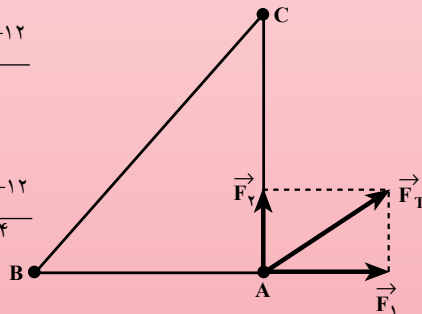
$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F_{BA} = F_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 2 \times 10^{-12}}{9 \times 10^{-4}}$$

$$F_1 = 8 \cdot \text{N}$$

$$F_{CA} = F_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 2 \times 10^{-12}}{12 \times 10^{-4}}$$

$$F_2 = 6 \cdot \text{N}$$



شکل ۸-۲

نیروهای \vec{F}_1 و \vec{F}_2 در شکل ۸-۲ نشان داده شده‌اند. این دو نیرو بر یک دیگر عمودند و \vec{F}_T برآیند آن‌هاست. داریم:

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

$$F_T^2 = F_1^2 + F_2^2$$

$$F_T^2 = (8)^2 + (6)^2$$

$$F_T = 10 \text{ N}$$

یادداشت ریاضی

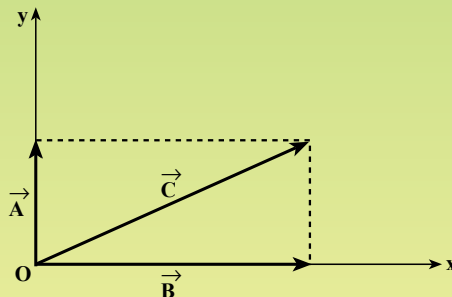
برای حل کردن مسأله‌های فیزیک به محاسبه‌هایی نظیر محاسبه‌های برداری نیازمندیم که شما در کتاب‌های ریاضی سال‌های گذشته با آن‌ها آشنا شده‌اید. در این جا این محاسبه‌ها را صرفاً جهت حل مسأله‌های فیزیکی آورده‌ایم و جزء درس فیزیک منظور نمی‌شوند. در کتاب ریاضی سال سوم راهنمایی و کتاب ریاضی ۲ دبیرستان با مؤلفه‌های یک بردار روی محورهای مختصات و نیز نمایش یک بردار بر حسب مؤلفه‌ها و بردارهای یک‌به‌یک و نیز محاسبه‌های برداری به کمک بردارهای یک‌به‌یک آشنا شدید. در این جا با نحوه‌ی استفاده از آن‌ها در مبحث‌های فیزیک آشنا می‌شوید. مرور این مبحث، از کتاب ریاضی ۲ شما را در حل مسأله‌های فیزیکی یاری می‌دهد.

مؤلفه‌های یک بردار روی محورهای مختصات

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که در محاسبه‌ها می‌توان به جای دو بردار، مثلاً بردارهای \vec{A} و \vec{B} در شکل ۲-۹- برای آن‌ها، یعنی بردار \vec{C} را جایگزین کرد.

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}$$

$$C^2 = A^2 + B^2$$



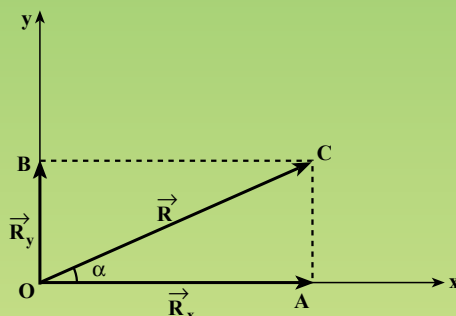
شکل ۲-۹- بردار \vec{C} برآیند بردارهای \vec{A} و \vec{B} است.

به‌طور وارون و هر جا که مناسب باشد، می‌توان به جای بردار \vec{C} ، دو بردار \vec{A} و \vec{B} را به کار برد. در این صورت، به بردارهای \vec{A} و \vec{B} ، مؤلفه‌های بردار \vec{C} در امتداد محورهای x و y گفته می‌شود.

معمولاً مؤلفه‌ی یک بردار روی یک محور را با نام آن بردار و زیرنویس نام

محور، مشخص می‌کند؛ مثلاً مؤلفه‌ی بردار \vec{C} در راستای محور x را \vec{C}_x و مؤلفه‌ی آن در راستای محور y را \vec{C}_y می‌نامیم.

برای تعیین مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور x و y به روش زیر عمل می‌کنیم. مطابق شکل ۱-۲ از انتهای بردار \vec{R} ، خط‌هایی موازی هر یک از دو محور Ox و Oy رسم می‌کنیم تا محورها را در نقطه‌های A و B قطع کنند. بردارهای \vec{OA} و \vec{OB} مؤلفه‌های بردار \vec{R} روی دو محورند که آن‌ها را \vec{R}_x و \vec{R}_y می‌نامیم.



شکل ۱-۲

اگر زاویه‌ی \vec{R} با محور x برابر α باشد، اندازه‌ی مؤلفه‌های آن روی دو محور به روش زیر محاسبه می‌شود.

$$\cos \alpha = \frac{R_x}{R}$$

$$R_x = R \cos \alpha \quad (2-2)$$

$$\sin \alpha = \frac{R_y}{R}$$

$$R_y = R \sin \alpha \quad (3-2)$$

مثال ۱: بردار \vec{A} به بزرگی ۵ واحد با محور x زاویه‌ی 37° درجه می‌سازد. اندازه‌ی مؤلفه‌های آن را روی محورهای x و y به دست آورید.
حل: با استفاده از رابطه‌های ۲-۲ و ۳-۲ داریم:

$$A_x = A \cos \alpha$$

$$A_x = 5 \cos 37^\circ$$

$$A_x = 5 \times 0.8 = 4 \text{ واحد}$$

$$A_y = A \sin \alpha$$

$$A_y = 5 \sin 37^\circ$$

$$A_y = 5 \times 0.6 = 3 \text{ واحد}$$

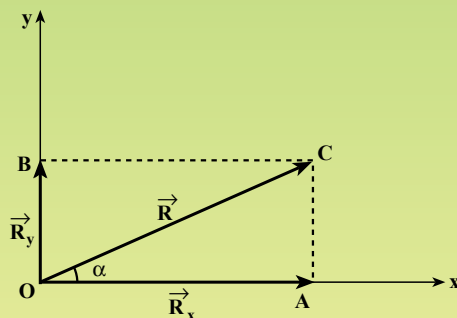
به طور وارون، بامعلوم بودن اندازه‌ی مؤلفه‌های یک بردار روی دو محور x و y ، می‌توان اندازه و جهت بردار را معلوم کرد. جهت هر بردار را با تعیین زاویه‌ی آن بردار با جهت محور x مشخص می‌کنیم.

مثال ۲: بزرگی مؤلفه‌های بردار \vec{R} روی محورهای x و y مطابق شکل ۲-۱۰ به ترتیب برابر ۸ و $13/9$ واحد است. بزرگی این بردار و زاویه‌ی آن با محور x (جهت بردار \vec{R}) را تعیین کنید.

حل: با استفاده از شکل ۲-۱۱ در مثلث قائم‌الزاویه‌ی OAC ، داریم:

$$R^2 = R_x^2 + R_y^2 \quad (2-4)$$

$$R^2 = (8)^2 + (13/9)^2 \rightarrow R = 16 \text{ واحد}$$



شکل ۲-۱۱

اگر در شکل ۲-۱۱ تانژانت زاویه‌ی α را حساب کنیم، نتیجه می‌شود:

$$\tan \alpha = \frac{R_y}{R_x} \quad (2-5)$$

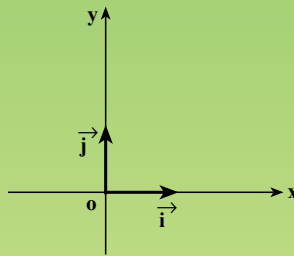
$$\tan \alpha = \frac{13/9}{8} \approx 1/73$$

$$\alpha \approx 6^\circ$$

نمایش یک بردار برحسب بردارهای یکه

در کتاب‌های ریاضی سال سوم راهنمایی و ریاضی ۲ دبیرستان خواندید که با انتخاب بردارهای یکه \vec{i} و \vec{j} به ترتیب روی محورهای x و y (شکل ۲-۱۲) می‌توان یک بردار را برحسب بردارهای یکه نمایش داد. بردار یکه در راستای هر محور، برداری است به طول واحد و در جهت همان محور.

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



شکل ۲-۱۲

اگر اندازه‌ی مؤلفه‌های بردار \vec{A} روی محور x و y به ترتیب برابر A_x و A_y باشد، نمایش این بردار به کمک بردارهای یکه به صورت رابطه‌ی زیر است.

$$\vec{A} = A_x \vec{i} + A_y \vec{j} \quad (۲-۶)$$

مثال ۳: بردار \vec{A} را در مثال ۱ برحسب بردارهای یکه نشان دهید.

حل: از حل مثال ۱ نتیجه شد که $A_x = ۴$ و $A_y = ۳$ واحد است. با استفاده

از رابطه‌ی (۲-۶) داریم:

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

$$\vec{A} = ۴ \vec{i} + ۳ \vec{j}$$

محاسبه‌های برداری به کمک بردارهای یکه

نمایش بردارها برحسب بردارهای یکه به ما کمک می‌کند تا محاسبه‌های برداری

— مثلاً محاسبه‌ی برابری چند بردار یا تفاضل دو بردار — را به سادگی انجام دهیم.

مثال ۴: برابند دو نیروی $\vec{F}_1 = 5\vec{i} - 2\vec{j}$ و $\vec{F}_2 = 3\vec{i} + 8\vec{j}$ نیوتونی برابر چند نیوتون است و با محور x چه زاویه ای می سازد؟
حل: با توجه به این که مؤلفه های بردارها روی یک محور، هم راستا هستند و برابند آنها برابر جمع جبری آنهاست، داریم:

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

$$\vec{F} = (F_{1x} \ F_{1y}) \vec{i} + (F_{2x} \ F_{2y}) \vec{j}$$

$$\vec{F} = (5 \ 3) \vec{i} + (-2 \ 8) \vec{j}$$

$$\vec{F} = 8\vec{i} + 6\vec{j}$$

با استفاده از رابطه های ۴-۲ و ۵-۲ داریم:

$$F^2 = F_x^2 + F_y^2$$

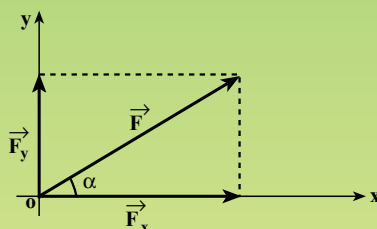
$$F^2 = 64 + 36$$

$$F = 10 \text{ N}$$

$$\tan \alpha = \frac{F_y}{F_x}$$

$$\tan \alpha = \frac{6}{8} = \frac{3}{4}$$

$$\alpha = 37^\circ$$



شکل ۲-۱۳

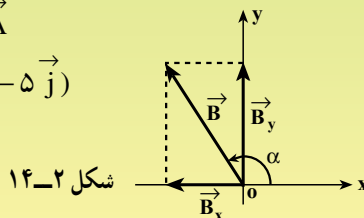
مثال ۵: اگر $\vec{A} = 2\vec{i} - 5\vec{j}$ واحد و $\vec{R} = -3\vec{i} + 4\vec{j}$ واحد و $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$ باشد، بردار \vec{B} با محور x چه زاویه ای می سازد؟

$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B} \rightarrow \vec{B} = \vec{R} - \vec{A}$$

$$\vec{B} = (-3\vec{i} + 4\vec{j}) - (2\vec{i} - 5\vec{j})$$

$$\vec{B} = -5\vec{i} + 9\vec{j}$$

حل:



شکل ۲-۱۴

$$\tan \alpha = \frac{B_y}{B_x}$$

با استفاده از رابطه ی ۵-۲ داریم:

$$\tan \alpha = \frac{9}{-5} = -1.8$$

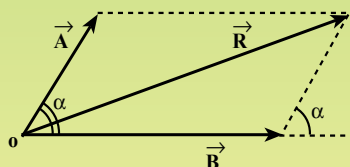
$$\alpha = 112^\circ$$

توجه کنید که مؤلفه‌ی B_y مثبت و در جهت محور y و مؤلفه‌ی B_x منفی و در خلاف جهت محور x است. در نتیجه، انتهای بردار \vec{B} در ربع دوم دستگاه مختصات قرار دارد.

محاسبه‌ی برآیند دو بردار به روش متوازی‌الاضلاع

محاسبه‌ی برآیند بردارها به روش متوازی‌الاضلاع، روش ساده‌ای است برای محاسبه‌ی اندازه‌ی برآیند و نیز مشخص کردن جهت برآیند دو بردار که در یک صفحه قرار دارند. این نوع محاسبه، در فیزیک کاربرد فراوان دارد.

این روش، در واقع همان روش ترسیمی (چند ضلعی) است. همان‌گونه که شکل ۱۵-۲ نشان می‌دهد، ابتدا دو بردار را از یک نقطه رسم می‌کنیم. این دو بردار را دو ضلع یک متوازی‌الاضلاع می‌گیریم و متوازی‌الاضلاع را با رسم دو ضلع دیگر آن کامل می‌کنیم. آن قطر متوازی‌الاضلاع که از محل تلاقی دو بردار می‌گذرد، نشان‌دهنده‌ی برآیند دو بردار است.



شکل ۱۵-۲- برآیند دو بردار، منطبق بر قطر متوازی‌الاضلاع است که روی دو بردار ساخته می‌شود.

اگر زاویه‌ی بین دو بردار برابر α باشد، اندازه‌ی برآیند از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \vec{R} &= \vec{A} + \vec{B} \\ R^2 &= A^2 + B^2 + 2A \cdot B \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (7-2)$$

مثال ۶: برابری دو بردار به بزرگی ۳ و ۵ واحد را که با یکدیگر زاویه‌ی ۶۰° درجه می‌سازند، محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲-۷ داریم:

$$R^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \alpha$$

$$R^2 = 9 + 25 - 2 \times 3 \times 5 \cos 60^\circ$$

$$R^2 = 49$$

$$R = 7 \text{ واحد}$$

در حالت خاصی که دو بردار \vec{A} و \vec{B} هم‌اندازه باشند، رابطه‌ی ۲-۷ به صورت زیر ساده می‌شود.

$$A = B \rightarrow R^2 = 2A^2(1 - \cos \alpha)$$

در درس ریاضی دیده‌اید که « $1 - \cos \alpha = 2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$ » است. در نتیجه، خواهیم داشت:

$$R^2 = 4A^2 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$R = 2A \cos \frac{\alpha}{2} \quad (2-8)$$

مثال ۷: سرعت جسمی در دو لحظه‌ی $t_1 = 2s$ و $t_2 = 5s$ به ترتیب و بر حسب

$\frac{m}{s}$ به صورت $\vec{V}_1 = 14\vec{i} + 7\vec{j}$ و $\vec{V}_2 = 26\vec{i} + 16\vec{j}$ مشخص شده است. شتاب

متوسط این جسم در بازه‌ی زمانی $t = t_2 - t_1$ چند $\frac{m}{s^2}$ است؟

حل: در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندید که شتاب متوسط برابر تغییرات

سرعت جسم در واحد زمان است. تغییرات سرعت در یک بازه‌ی زمانی، برابر تفاضل

بردارهای سرعت جسم در شروع و پایان آن بازه است؛ بنابراین، داریم:

$$\vec{V} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$$

$$\vec{V} = (26\vec{i} + 16\vec{j}) - (14\vec{i} + 7\vec{j})$$

$$\vec{V} = 12\vec{i} + 9\vec{j}$$

با توجه به تعریف شتاب متوسط داریم :

$$\vec{a} = \frac{\vec{V}}{t}$$

$$\vec{a} = \frac{12\vec{i} - 9\vec{j}}{5-2}$$

$$\vec{a} = 4\vec{i} - 3\vec{j}$$

با استفاده از رابطه ی ۲-۴ نتیجه می شود :

$$\bar{a} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$

$$\bar{a} = \sqrt{16 + 9}$$

$$\bar{a} = 5 \text{ m/s}^2$$

اکنون به مثال‌های دیگری از نیروهای الکتریکی توجه کنید.

مثال ۴-۲

سه ذره‌ی باردار، مطابق شکل ۱۶-۲ در سه رأس مثلث متساوی‌الاضلاعی به ضلع ۶ cm ثابت شده‌اند. بزرگی نیروی الکتریکی وارد بر بار q_3 را محاسبه کنید.
حل: نیروهای وارد بر بار q_3 و برآیند این نیروها در شکل ۱۷-۲ نشان داده شده است. با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ داریم:

$$F_{13} = 9 \times 10^9 \times \frac{2/5 \times 10^{-8} \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{13} = 5 \text{ N} \quad \text{رانشی}$$

$$F_{23} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-8} \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{23} = 8 \text{ N} \quad \text{رانشی}$$

اکنون با استفاده از رابطه‌ی ۷-۲، برآیند دو نیرو را حساب می‌کنیم.

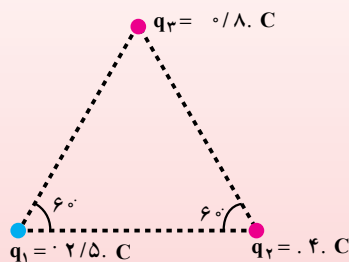
$$\vec{F}_T = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$$

$$F_T^2 = F_{13}^2 + F_{23}^2 - 2F_{13} \cdot F_{23} \cdot \cos \alpha$$

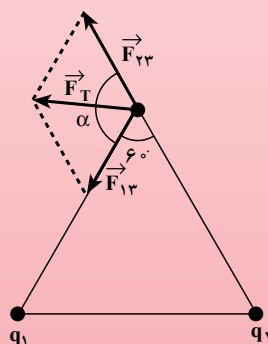
$$\alpha = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$$

$$F_T^2 = 25 + 64 - 2 \times 5 \times 8 \times \cos 120^\circ$$

$$F_T^2 = 49 \rightarrow F_T = 7 \text{ N}$$



شکل ۱۶-۲



شکل ۱۷-۲

تمرین ۲-۲

نیروهای وارد بر بارهای الکتریکی q_1 و q_2 را در مثال ۴-۲ محاسبه کنید.

مثال ۵-۲

مطابق شکل ۱۸-۲ چهار بار الکتریکی در رأس‌های مربعی به ضلع ۶cm قرار دارند.
نیروی الکتریکی وارد بر بار الکتریکی q_1 را محاسبه کنید.
حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱-۲ داریم:

$$F_{21} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

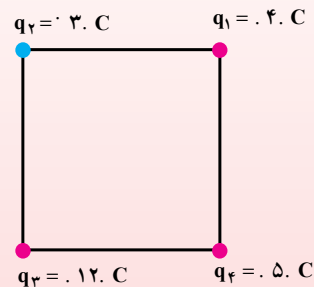
$$F_{21} = 30 \text{ N رایشی}$$

$$F_{31} = 9 \times 10^9 \times \frac{12 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 2 \times 10^{-4}}$$

$$F_{31} = 60 \text{ N رایشی}$$

$$F_{41} = 9 \times 10^9 \times \frac{5 \times 4 \times 10^{-12}}{36 \times 10^{-4}}$$

$$F_{41} = 50 \text{ N رایشی}$$



شکل ۱۸-۲

با انتخاب محورهای مختصات مطابق شکل ۱۹-۲ و استفاده از رابطه‌های

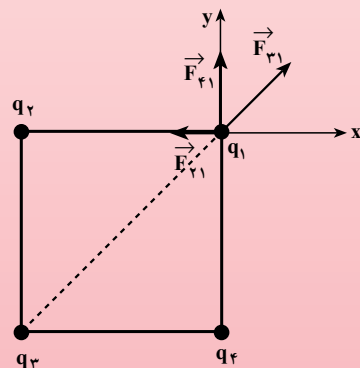
۲-۲ و ۳-۲ و ۶-۲ داریم:

$$\vec{F}_{21} = -30 \vec{i}$$

$$\vec{F}_{31} = (60 \cos 45^\circ) (\vec{i} + \vec{j})$$

$$\vec{F}_{31} \approx 42 (\vec{i} + \vec{j})$$

$$\vec{F}_{41} = 50 \vec{j}$$



شکل ۱۹-۲

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41}$$

$$\vec{F}_T = (-30 + 42) \vec{i} + (42 + 50) \vec{j}$$

$$\vec{F}_T = 12 \vec{i} + 92 \vec{j}$$

$$F_T = \sqrt{12^2 + 92^2} \approx 92.7 \text{ N}$$

تمرین ۲-۳

نیروی الکتریکی وارد بر q_4 را در مثال ۲-۵ محاسبه کنید.

رابطه ۱-۲ برای محاسبه‌ی نیروی الکتریکی بین دو ذره‌ی باردار به کار می‌رود. محاسبه‌ی نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار به چگونگی آرایش (یا توزیع) بار در دو جسم بستگی دارد و محاسبه‌ی آن نیازمند ریاضیات پیشرفته‌تری است. در این کتاب، همواره نیروهای بین دو ذره‌ی باردار را محاسبه می‌کنیم. روشن است که اگر فاصله‌ی جسم باردار از ذره‌ی باردار (یا جسم باردار دیگر) آن قدر زیاد باشد که ابعاد جسم در مقابل فاصله‌ی بین آن‌ها قابل چشم‌پوشی باشد، می‌توان جسم را مانند یک ذره‌ی باردار در نظر گرفت و از رابطه‌ی ۱-۲ برای محاسبه‌ی نیروی الکتریکی استفاده کرد.

فعالیت ۱-۲

اکنون که با قانون کولن و محاسبه‌ی نیروی الکتریکی آشنا شده‌اید، شایسته است



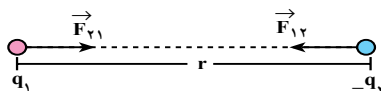
آزمایش‌های کولن و چگونگی کار او را بیش‌تر بشناسید. در سال ۱۷۸۰ میلادی شارل کولن، دانشمند فرانسوی، با استفاده از وسیله‌ای که «ترازوی پیچشی» نام دارد، آزمایش‌هایی انجام داد. نتیجه‌ی آن‌ها به بیان قانون کولن منجر شد. در مورد آزمایش‌های کولن تحقیق کنید و شرح آزمایش‌ها و نتیجه‌گیری‌های او را به کلاس گزارش دهید.

شکل ۲-۲۰- ترازوی پیچشی کولن

۲-۲- میدان الکتریکی

در بخش ۱-۲ دیدید که دو بار الکتریکی q_1 و q_2 که در فاصله‌ی r از یک‌دیگر واقع‌اند (شکل ۲-۲۱)، بر هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. اگر دو آهن‌ربا در فاصله‌ی کمی از یک‌دیگر قرار گیرند، بر هم نیرو وارد می‌کنند. زمین و

خورشید نیز با وجود آن که میلیون‌ها کیلومتر از یک‌دیگر دورند، بر هم نیروی جاذبه‌ی گرانشی وارد می‌کنند.

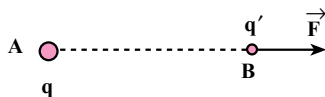


شکل ۲۱-۲ دو بار الکتریکی از فاصله‌ی r بر هم نیرو وارد می‌کنند.

فعالیت ۲-۲

- ۱- یک آونگ الکتریکی بسازید و آن را از نقطه‌ای بیاویزید.
- ۲- آونگ را به روش القای الکتریکی یا تماس با جسم باردار دیگری باردار کنید.
- ۳- به یک میله‌ی پلاستیکی (یا شیشه‌ای) به کمک مالش با پارچه پشمی (یا ابریشمی) بار الکتریکی بدهید.
- ۴- میله را بدون تماس با آونگ از جهت‌های مختلف به آونگ نزدیک کنید و نتیجه‌ی آنچه را که مشاهده می‌کنید، به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید کره‌ی باردار کوچکی با بار q مطابق شکل ۲۲-۲ در نقطه‌ی A قرار دارد. اگر ذره‌ای با بار الکتریکی q' را در نقطه‌ی B قرار دهیم، از طرف بار q بر آن نیروی \vec{F} وارد می‌شود (می‌دانید که بار q' نیز بر بار q نیرو وارد می‌کند که واکنش نیروی \vec{F} است اما در شکل نشان داده نشده است).

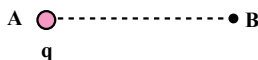


شکل ۲۲-۲



شکل ۲۳-۲

اکنون به این پرسش و نیز پاسخ آن بپردازیم: «اگر کره‌ی باردار q را از نقطه‌ی A برداریم (شکل ۲-۲۳) آیا در نقطه‌ی B بر بار q' نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟ پاسخ شما چیست؟ آیا قبول دارید که وجود بار q در نقطه‌ی A باعث می‌شود که بر بار q' در نقطه‌ی B نیروی الکتریکی وارد شود؟ آیا می‌توانیم بگوییم که وقتی بار q را در نقطه‌ی A قرار می‌دهیم، در نقطه‌ی B خاصیتی ایجاد می‌شود که اگر بار q در A نباشد، این خاصیت نیز در B وجود نخواهد داشت؟ آیا وجود بار q در نقطه‌ی A ، این خاصیت را فقط در نقطه‌ی B ایجاد کرده است یا اگر بار q' را در هر نقطه‌ی دیگری در مجاورت نقطه‌ی A قرار دهیم، باز هم بر آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟ مثلاً در فعالیتی که انجام دادید، اگر آونگ الکتریکی باردار را در هر نقطه‌ای مجاور میله‌ی باردار قرار دهید، آیا به آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود؟



شکل ۲-۲۴

با توجه به آنچه گفته شد، یک بار الکتریکی در هر نقطه از فضای اطراف خود، خاصیتی ایجاد می‌کند که به آن میدان الکتریکی می‌گویند. اگر یک بار الکتریکی را در نقطه‌ای از میدان الکتریکی قرار دهیم، از طرف میدان بر آن نیروی الکتریکی وارد می‌شود. میدان الکتریکی به طور کمی در بخش ۲-۳ تعریف شده است.

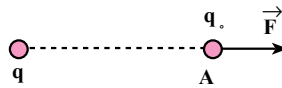
۲-۳- تعریف کمی میدان الکتریکی

میدان الکتریکی به طور کمی را به کمک نیرویی که میدان بر یک بار الکتریکی واقع در میدان وارد می‌کند، به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

نیروی وارد بر یکای بار الکتریکی مثبت را در هر نقطه، میدان الکتریکی در آن نقطه می‌نامیم.

اگر بار الکتریکی نقطه‌ای q مطابق شکل ۲-۲۵ در میدان الکتریکی حاصل از بار q قرار گیرد، از طرف میدان حاصل از بار q بر آن نیروی \vec{F} وارد می‌شود. بر اساس تعریف بالا، میدان بار q در محل قرار گرفتن بار q که آن را با نماد \vec{E} نشان می‌دهیم، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (۲-۹)$$



شکل ۲-۲۵

میدان الکتریکی کمیتی برداری است و در محاسبه‌ها باید به این نکته توجه کرد. یکای میدان الکتریکی، نیوتون بر کولن ($\frac{N}{C}$) نام دارد.

مثال ۲-۶

بر بار الکتریکی $C. ۰/۲$ در یک نقطه از میدان بار q ، نیروی $۵ \times ۱۰^{-۲} N$ وارد می‌شود. اندازه‌ی میدان الکتریکی را در این نقطه محاسبه کنید.

حل: از رابطه‌ی ۲-۹ می‌توان اندازه‌ی میدان الکتریکی را محاسبه کرد.

$$E = \frac{F}{q_0}$$

$$E = \frac{۵ \times ۱۰^{-۲}}{۲ \times ۱۰^{-۷}}$$

$$E = ۲/۵ \times ۱۰^۵ \frac{N}{C}$$

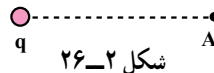
۲-۴- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره‌ی باردار

می‌خواهیم میدان الکتریکی حاصل از بار ذره‌ای q را در نقطه‌ی A که به فاصله‌ی r از بار q است، محاسبه کنیم (شکل ۲-۲۶). برای این محاسبه از رابطه‌ی ۲-۹ استفاده می‌کنیم. اگر بار ذره‌ای q_0 در نقطه‌ی A قرار گیرد، از طرف بار q به آن نیروی \vec{F} وارد می‌شود. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی F را محاسبه می‌کنیم و با جای‌گذاری در رابطه‌ی ۲-۹، بزرگی میدان الکتریکی بار q را در نقطه‌ی A به دست می‌آوریم.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_0}{r^2}$$

$$E = \frac{F}{q_0}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$



شکل ۲-۲۶

(۲-۱۰)

رابطه‌ی ۲-۱۰ عامل‌های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از بار ذره‌ای q را مشخص

می‌کند. بنابراین رابطه، میدان با اندازه‌ی بار q نسبت مستقیم و با مجذور فاصله از آن، نسبت وارون دارد.

برای مشخص کردن جهت بردار میدان در یک نقطه — مثلاً نقطه‌ی A در شکل ۲-۲۶، فرض می‌کنیم که بار الکتریکی مثبتی را در آن نقطه قرار داده‌ایم. میدان در آن نقطه، در جهت نیروی وارد بر این بار فرضی خواهد بود. بنابراین، میدان الکتریکی در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت واقع در آن نقطه است.

مثال ۲-۷

بزرگی میدان الکتریکی بار ذره‌ای C. ۲- را در نقطه‌ی M به فاصله‌ی الف) ۲ mm و ب) ۲۰ cm از این بار الکتریکی محاسبه کنید و بردار میدان را در این نقطه برای یک حالت رسم کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۲-۱۰ اندازه‌ی میدان را در نقطه‌های خواسته شده، به دست می‌آوریم:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad \text{الف)}$$

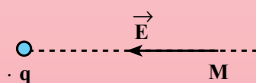
$$E_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-6}}$$

$$E_1 = 4/5 \times 10^9 \frac{N}{C} \quad \text{ب)}$$

$$E_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-2}}$$

$$E_2 = 4/5 \times 10^5 \frac{N}{C}$$

برای نشان دادن میدان، فرض می‌کنیم بار مثبتی در نقطه‌ی M، در ۲ میلی‌متری بار q واقع باشد. چون بار q منفی است، بار مثبت فرضی را جذب می‌کند. میدان بار q در جهت همین نیروست که در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۷ — میدان بار منفی q در نقطه‌ی M

همان‌طور که مثال‌های ۲-۶ و ۲-۷ نشان می‌دهند در محاسبه‌ی اندازه‌ی میدان الکتریکی، علامت بار را در رابطه‌ی ۲-۹ یا ۲-۱۰ وارد نمی‌کنیم و جهت میدان در هر نقطه را به کمک جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت فرضی واقع در آن نقطه، تعیین می‌کنیم.

میدان الکتریکی حاصل از مجموعه‌ی ذره‌های باردار: اگر در یک ناحیه از فضا چند ذره‌ی باردار قرار داشته باشند، در هر نقطه یک میدان الکتریکی وجود دارد. این میدان، بر ایندها می‌تابد که هر ذره‌ی باردار در غیاب سایر بارهای الکتریکی در آن نقطه ایجاد می‌کند.

مثال ۲-۸

دو بار الکتریکی ذره‌ای $q_1 = 4 \text{ C}$ و $q_2 = -6 \text{ C}$ در فاصله‌ی 8 cm از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به دست آورید.

الف - در وسط خط واصل دو ذره‌ی باردار،

ب - در نقطه‌ای به فاصله‌ی 2 cm از بار q_2 و 10 cm از بار q_1 و روی خط واصل دوبار.

حل: در غیاب هر یک از دو ذره، میدان حاصل از بار دیگر را محاسبه می‌کنیم. میدان حاصل از مجموعه‌ی دوبار، بر ایندها می‌تابد دو میدان خواهد بود.

الف - اگر بار مثبتی را در نقطه‌ی A قرار دهیم، بار q_1 آن را می‌راند و بار q_2 آن را می‌ریاید. بنابراین، \vec{E}_1 و \vec{E}_2 در نقطه‌ی A هم جهت و به سوی بار q_2 هستند (شکل ۲-۲۸ الف و ب).

با استفاده از رابطه‌ی ۲-۱۰ داریم:

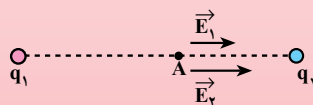
$$E = k \frac{q}{r^2}$$

$$E_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{16 \times 10^{-4}} \text{ N/C}$$

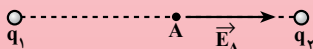
$$E_1 = 2/25 \times 10^7 \text{ N/C}$$

$$E_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6}}{16 \times 10^{-4}} \text{ N/C}$$

$$E_2 = 3/375 \times 10^7 \text{ N/C}$$



الف



ب

شکل ۲-۲۸

چون \vec{E}_1 و \vec{E}_2 هم جهت اند، اندازه‌ی برآیند آن‌ها برابر مجموع اندازه‌ی آن‌هاست.
توجه داشته باشید که در نقطه‌ی A تنها میدان \vec{E}_A وجود دارد.

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

$$E_A = E_1 + E_2$$

$$E_A = 5/625 \times 10^7 \frac{N}{C}$$

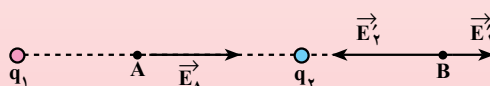
ب- اگر بار الکتریکی مثبتی در نقطه‌ی B قرار گیرد، بار q_1 آن را می‌راند و بار q_2 آن را می‌رباید. در نتیجه، \vec{E}'_2 به طرف بار q_2 و \vec{E}'_1 در خلاف جهت \vec{E}'_2 است (شکل ۲۹-۲ الف و ب).

$$E'_1 = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{10^{-2}}$$

$$E'_1 = 3/6 \times 10^6 \frac{N}{C}$$

$$E'_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{6 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-4}}$$

$$E'_2 = 135 \times 10^6 \frac{N}{C}$$



الف



ب

شکل ۲۹-۲

چون \vec{E}'_1 و \vec{E}'_2 در خلاف جهت یکدیگرند، برآیند آن‌ها برابر تفاضل اندازه‌های E'_1 و E'_2 است.

$$\vec{E}_B = \vec{E}'_2 - \vec{E}'_1$$

$$E_B = E'_2 - E'_1$$

$$E_B = 131/4 \times 10^6 \frac{N}{C}$$

مثال ۹-۲

دو بار الکتریکی ذره‌ای C ، $q_1 = -q_2 = 5 \times 10^{-9} \text{ C}$ در فاصله‌ی 8 cm از یک‌دیگر ثابت شده‌اند. میدان الکتریکی را روی عمود منصف خطی که دو ذره را به یک‌دیگر وصل می‌کند و به فاصله‌ی 3 cm از وسط خط واصل دو ذره، به دست آورید. به مجموعه‌ی این دو بار الکتریکی، دو قطبی الکتریکی گفته می‌شود.
 حل: میدان الکتریکی حاصل از این دو بار، در نقطه‌ی مذکور هم‌اندازه‌اند (شکل ۲-۳).

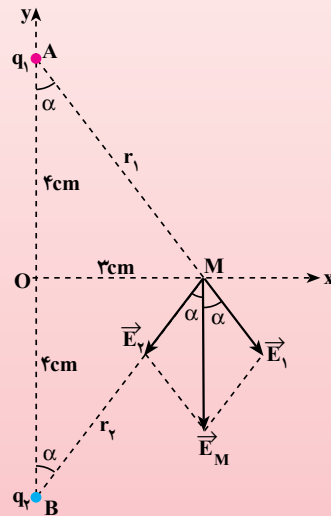
$$r_1 = r_2 = \sqrt{16 + 9} = 5 \text{ cm}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۲-۱ داریم:

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

$$E_1 = E_2 = 9 \times 10^9 \times \frac{5 \times 10^{-9}}{(5 \times 10^{-2})^2} \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E_1 = 1/8 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$



شکل ۲-۳

چون \vec{E}_1 و \vec{E}_2 هم‌اندازه‌اند، با استفاده از رابطه‌ی ۲-۸ داریم:

$$E_1 = E_2$$

$$E_M = 2E_1 \cos \frac{\gamma}{2} = 2E_1 \cos \alpha$$

با استفاده از مثلث قائم‌الزاویه‌ی AOM اندازه‌ی $\cos \alpha$ را حساب می‌کنیم:

$$\cos \alpha = \frac{OA}{AM} = \frac{3}{5} = 0.6$$

$$E_M = 2 \times 10^{-8} \times 10^9 \times 0.8$$

$$E_M = 2 / 88 \times 10^9 \frac{N}{C}$$

شکل ۲-۳ نشان می‌دهد که میدان الکتریکی روی عمود منصف دو قطبی، موازی محور دو قطبی (خط واصل دو ذره ی باردار) و در خلاف جهت محور y است؛ یعنی، مؤلفه‌های \vec{E}_1 و \vec{E}_2 در امتداد محور x یک‌دیگر را خنثی می‌کنند.

تمرین ۲-۴

میدان الکتریکی حاصل از دو قطبی را در مثال ۲-۹ در نقطه‌ای روی محور دو قطبی و به فاصله‌ی ۵ cm از مرکز دو قطبی (نقطه‌ی O در شکل ۲-۳) به دست آورید.

۲-۵- تجسم میدان الکتریکی

میدان الکتریکی را در اطراف یک جسم باردار با خط‌هایی نشان می‌دهیم که به آن‌ها خط‌های میدان الکتریکی می‌گویند.

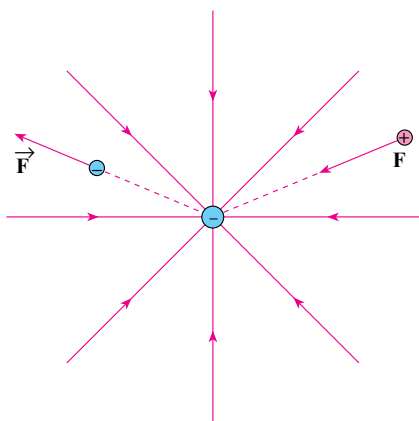
این خط‌ها دارای ویژگی‌های زیرند:

۱- خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار مثبت واقع در آن نقطه‌اند. در نتیجه، جهت این خط‌ها از بار مثبت رو به خارج و به سوی بار منفی است. (بر بار منفی، نیرو در خلاف جهت میدان وارد می‌شود.)

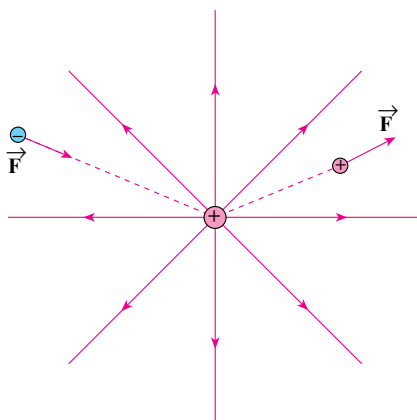
۲- خط میدان در هر نقطه، جهت میدان را در آن نقطه نشان می‌دهد و میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن هم جهت است.

۳- در هر ناحیه که میدان قوی‌تر باشد، خط‌های میدان به یک‌دیگر نزدیک‌تر و فشرده‌ترند.

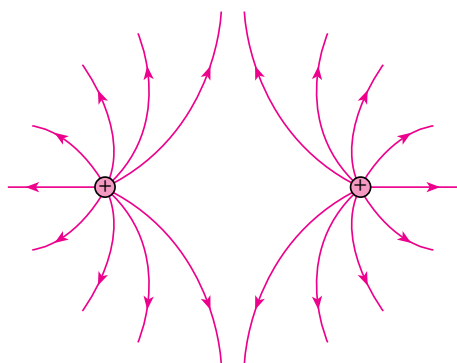
۴- خط‌های میدان یک‌دیگر را قطع نمی‌کنند، یعنی از هر نقطه فقط یک خط میدان می‌گذرد. به بیان دیگر، در هر نقطه‌ی فضا فقط یک میدان الکتریکی وجود دارد که همان میدان الکتریکی برایند است. در شکل ۲-۳۱ خط‌های میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



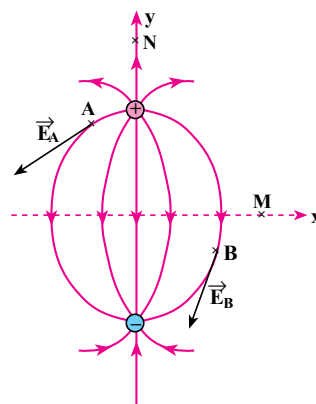
ب) بار منفی منفرد



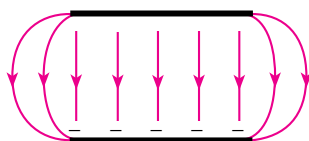
الف) بار مثبت منفرد



ت) دو بار الکتریکی مثبت و هم اندازه



پ) دو قطبی الکتریکی



ث) میدان بین دو صفحه‌ی رسانای موازی با بارهای هم اندازه (میدان یکنواخت)

شکل ۳۱-۲ - میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار

تمرین ۲-۵

میدان الکتریکی حاصل از بارهای مثبت و منفی و برابند آن‌ها را در نقطه‌های M و N در شکل ۳۱-۲ پ رسم کرده و با نتیجه‌ی مثال ۲-۹ و تمرین ۲-۴ مقایسه کنید.

فعالیت ۳-۲

- ۱- میدان الکتریکی را در اطراف دو بار الکتریکی منفی و هم اندازه رسم کنید.
- ۲- با توجه به ویژگی های خط های میدان الکتریکی، خط های میدان را در اطراف دو بار الکتریکی نقطه ای مثبت q_1 و منفی q_2 با فرض $|q_1| = |q_2|$ ، رسم کنید.
- ۳- بردار میدان الکتریکی را در چند نقطه روی شکلی که در مرحله ی ۲ رسم کرده اید، نشان دهید.
- ۴- نیروی وارد بر بار الکتریکی مثبت q' و نیز بار منفی q'' را که روی یک خط میدان واقع اند روی شکل مرحله ی ۲ رسم کنید.
- ۵- با توجه به تعریف میدان الکتریکی و ویژگی خط های میدان و با رجوع به شکل ۳۱-۲ ث برای میدان الکتریکی یکنواخت، تعریفی بیان کنید.

۶-۲- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی

اگر بار الکتریکی q در میدان الکتریکی \vec{E} قرار گیرد، از طرف میدان بر آن نیرو وارد می شود. این نیرو از رابطه ی ۹-۲ به دست می آید.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (۱۱-۲)$$

اگر q مثبت باشد، \vec{F} و \vec{E} هم جهت اند اما اگر q منفی باشد، \vec{F} در خلاف جهت \vec{E} خواهد

بود.

مثال ۱۰-۲

ذره ای به جرم $2g$ و بار الکتریکی C ۲۰ را در میدان الکتریکی خارجی $\frac{N}{C} 4 \times 10^4$ قرار می دهیم. شتاب حاصل از نیروی الکتریکی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه ی ۱۱-۲ داریم:

$$F = qE$$

$$F = 2 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^4$$

$$F = 8 \times 10^{-2} \text{ N}$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$a = \frac{8 \times 10^{-2}}{2 \times 10^{-3}}$$

$$a = 40 \text{ m/s}^2$$

مثال‌های حل شده نشان می‌دهند که میدان الکتریکی در یک نقطه، به عامل‌های مختلفی بستگی دارد. اندازه‌ی بار الکتریکی، نحوه‌ی توزیع بار الکتریکی و فاصله‌ی نقطه‌ی مورد نظر از جسم باردار، از جمله‌ی این عامل‌ها هستند.

۷-۲- توزیع بار الکتریکی در یک جسم

الف – جسم نارسانا: وقتی به یک جسم نارسانا بار الکتریکی داده می‌شود، بار در محل داده شده به جسم باقی می‌ماند و در جسم جابه‌جا نمی‌شود.

ب – جسم رسانا: بر خلاف جسم نارسانا، وقتی به یک جسم رسانا بار الکتریکی داده می‌شود، آن بار الکتریکی در محل داده شده ساکن نمی‌ماند و در جسم رسانا توزیع می‌شود. برای پی‌بردن به چگونگی توزیع بار در جسم رسانا، آزمایش ۲-۳ را انجام دهید.

آزمایش ۲-۳

هدف: نحوه‌ی توزیع بار در جسم رسانا

وسایله‌های آزمایش: ظرف فلزی دردار با پایه‌ی نارسانا (شکل ۲-۳۲ الف)، گوی فلزی، نخ، الکتروسکوپ، چسب نواری، واندوگراف و یا میله‌ی پلاستیکی و پارچه‌ی پشمی.

شرح آزمایش:

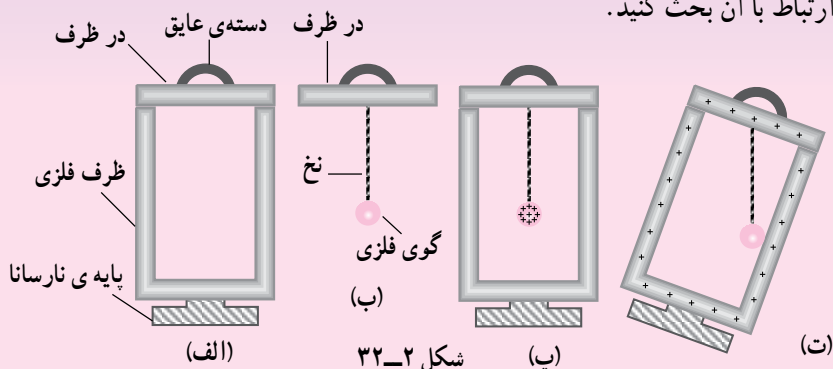
- ۱- به کمک چسب نواری یک سر نخ را به گوی فلزی و سر دیگر آن را به در ظرف وصل کنید به طوری که طول نخ باقیمانده از عمق ظرف کم‌تر باشد (شکل ۲-۳۲ ب).
- ۲- گوی فلزی را توسط واندوگراف یا روش القا و یا روش‌های دیگر باردار

کنید و از باردار شدن آن پس از نزدیک کردن به کلاهک یک الکتروسکوپ بدون بار مطمئن شوید. (در این جا بار گوی فلزی را مثبت فرض کرده ایم).

۳- بدون آن که گوی باردار با دست شما یا بدنه ی ظرف تماس یابد در ظرف را به آرامی بر روی ظرف قرار دهید (شکل ۲-۳۲ پ).

۴- پایه ی نارسانای ظرف را بگیرید و آن را به نحوی کج کنید تا گوی فلزی باردار برای لحظه ای کوتاه با درون ظرف تماس یابد (شکل ۲-۳۲ ت).

۵- در ظرف را برداشته و گلوله و همچنین ظرف را دوباره به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک کنید. نتیجه ی مشاهده ی خود را به کلاس گزارش کرده و در ارتباط با آن بحث کنید.



آزمایش هایی مانند آنچه شما انجام دادید، نشان می دهد که بار الکتریکی درون جسم رسانا باقی نمی ماند. تمام بار الکتریکی داده شده به جسم رسانا به سطح خارجی آن می رود و در آن جا توزیع می شود.

فعالیت ۴-۲

در جسم رسانا، الکترون های آزاد می توانند جابه جا شوند. با بحث در گروه خود برای پرسش زیر، پاسخ مناسبی تهیه کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.

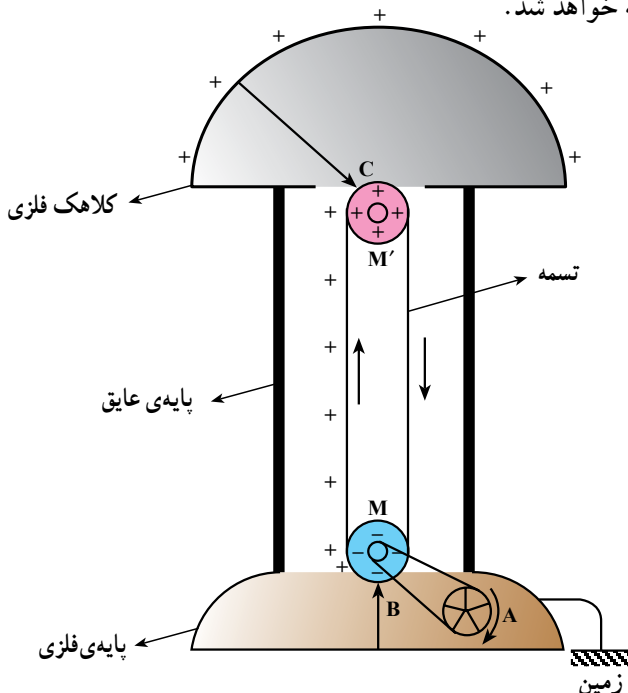
با توجه به این که در جسم جامد بارهای الکتریکی مثبت جابه جا نمی شوند، در این باره توضیح دهید: وقتی به یک جسم رسانا بار الکتریکی مثبت یا منفی داده می شود، این بارهای الکتریکی چگونه در جسم جابه جا شده و به سطح خارجی آن می روند؟

مطالعه‌ی آزاد

مولد وان دوگراف

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

در نمونه‌ی ساده‌ی مولد وان دوگراف، غلتک M توسط موتور A می‌چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می‌شود. غلتک M از جنس پلی‌تن و M' از جنس پرسپکس است. شانه‌ی فلزی B به پایه‌ی فلزی متصل است. در اثر مالش تسمه با غلتک‌ها، غلتک M بار منفی و غلتک M' بار مثبت پیدا می‌کند. غلتک M که بار منفی دارد، در شانه‌ی فلزی B (که به زمین اتصال دارد)، بار مثبت القا می‌کند. بار مثبت توسط شانه‌ی B روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می‌شود. این بارهای مثبت، توسط تسمه که عایق است به کمک شانه‌ی فلزی C به کلاهک منتقل شده و به سطح خارجی کلاهک می‌روند. به این ترتیب، بار الکتریکی مثبت روی سطح خارجی کلاهک انباشته می‌شود. اگر جای غلتک‌های M و M' با هم عوض شود، بار منفی در سطح خارجی کلاهک انباشته خواهد شد.



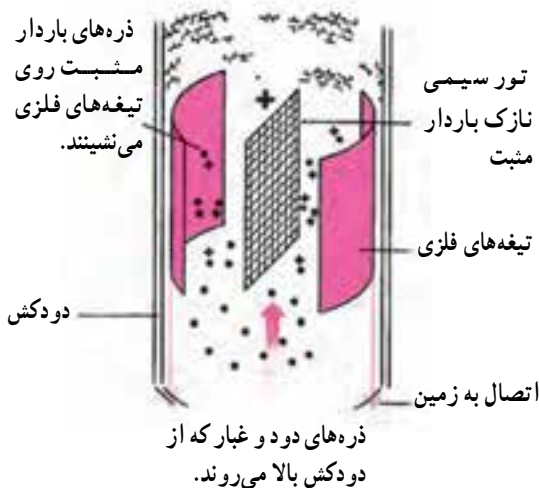
شکل ۲-۳۳

رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی

رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی، دود و غبار را از گازهای زایدی که از دودکش کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها بالا می‌رود، جدا می‌سازد. شکل زیر چگونگی کار یک رسوب دهنده را نشان می‌دهد. توری سیمی را به مقدار زیاد باردار می‌کنند، به گونه‌ای که تخلیه‌ی الکتریکی پیوسته‌ای بین توری و تیغه‌های فلزی متصل به زمین روی دهد. 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.

سپس ذره‌های باردار غبار از تور سیمی دفع شده و به سوی تیغه‌های متصل به زمین رانده می‌شوند و در آنجا رسوب می‌کنند. پس از مدتی این تیغه‌ها را با زدن ضربه می‌تکانند تا ذره‌های غبار و دود از دودکش پایین بریزد و در آنجا این ذره‌ها را جمع می‌کنند.

دودکش این کارخانه در هر دو عکس مورد بهره‌برداری است ولی در عکس پایین دستگاه رسوب دهنده‌ی الکتروستاتیکی کار می‌کند.



شکل ۲-۳۴

چگالی سطحی بار الکتریکی: دیدیم که بار الکتریکی داده شده به یک جسم رسانا، در سطح خارجی آن توزیع می‌شود. بنا به تعریف، بار الکتریکی موجود در واحد سطح جسم را چگالی سطحی بار الکتریکی می‌نامند.

اگر بار الکتریکی جسم برابر q و مساحت سطحی که بار روی آن توزیع شده A باشد، چگالی سطحی بار - که با نماد σ (سیگما) نشان داده می‌شود - از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (۱۲-۲)$$

در S.I. بار الکتریکی بر حسب کولن و مساحت بر حسب مترمربع است. در نتیجه، یکای چگالی سطحی بار، کولن بر مترمربع خواهد بود.

مثال ۱۲-۲

الف - به یک کره‌ی رسانا به قطر ۲ cm بار الکتریکی C ، ۱۲۵ داده شده است. چگالی سطحی بار کره را حساب کنید.

ب - اگر همین بار به کره‌ای به قطر ۲ m داده شود، چگالی سطحی بار آن چه قدر می‌شود؟

حل:

الف - مساحت سطح خارجی کره‌ای به شعاع R از رابطه‌ی $A = 4\pi R^2$ به دست می‌آید.

$$A = 4\pi R^2$$

$$R = \frac{d}{2} = 1\text{ cm} = 10^{-2}\text{ m}$$

$$A = 4\pi \times 10^{-4}\text{ m}^2 = 1.256 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

با استفاده از رابطه‌ی ۱۲-۲ داریم:

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

$$\sigma = \frac{125 \times 10^{-6}}{1.256 \times 10^{-3}} \approx 10^{-1} \frac{C}{m^2} = 10^{-1} \frac{C}{m^2}$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

ب -

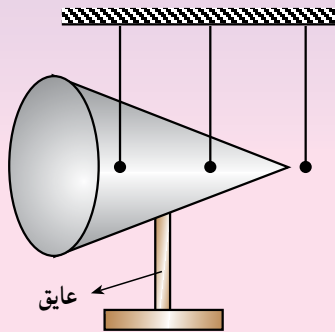
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

$$\sigma_2 = 10^{-1} \frac{C}{m^2}$$

آزمایش ۴-۲

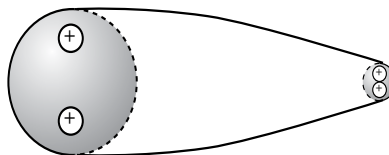
وسایله‌های آزمایش: مولد وان دوگراف یا دستگاه مشابه دیگر، مخروط فلزی روی پایه‌ی نارسانا، چند آونگ الکتریکی.

شرح آزمایش: مطابق شکل زیر، چند آونگ الکتریکی را در اطراف مخروط فلزی و در تماس با آن قرار دهید. با اتصال وان دوگراف به مخروط، به آن بار الکتریکی بدهید. انحراف آونگ‌ها را مشاهده کرده و با هم مقایسه کنید.



شکل ۳۵-۲

در جسمی مانند کره که سطح خارجی آن متقارن است، چگالی سطحی بار در همه‌جای آن یکسان است اما در جسم‌هایی که سطح خارجی متقارن ندارند، چگالی سطحی بار در همه‌جای سطح خارجی یکسان نیست. تجربه نشان می‌دهد که در مکان‌های برجسته و نوک‌تیز جسم رسانا، چگالی سطحی بار از سایر مکان‌های دیگر جسم بیش‌تر است. یعنی، فاصله‌ی بارهای داده شده به جسم، در مکان‌های نوک‌تیز کم‌تر از فاصله‌ی آن‌ها در مکان‌های پهن است. شکل ۳۶-۲ به‌گونه‌ای طرح‌وار نشان دهنده‌ی این مطلب است.



شکل ۳۶-۲

۲-۸- انرژی پتانسیل الکتریکی

در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه با انرژی پتانسیل گرانشی آشنا شدید و دیدید که با صرف انرژی و انجام کار، می‌توان جسمی به جرم m را از سطح زمین تا ارتفاع h بالا برد. انرژی‌ای که صرف بالا بردن جسم (با سرعت ثابت) شده است، به صورت انرژی پتانسیل گرانشی ($U = mgh$) در آن ذخیره می‌شود. با انرژی پتانسیل کشسانی نیز آشنا شدید و دیدید که وقتی فنری را به آرامی فشرده می‌کنیم یا می‌کشیم، کار انجام شده به صورت انرژی پتانسیل کشسانی در فنر ذخیره می‌شود. در این جا می‌خواهیم با انرژی پتانسیل الکتریکی بیش‌تر آشنا شویم.

در بخش ۲-۱ دیدید که دو ذره‌ی باردار بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. همان‌طور که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم، وقتی دو ذره‌ی باردار را که بار هم‌نام دارند با سرعت ثابت به یک‌دیگر نزدیک می‌کنیم، برای غلبه بر نیروی رانشی آن‌ها باید کار انجام دهیم و یا اگر بخواهیم دو ذره‌ی باردار را که بار غیرهم‌نام دارند با سرعت ثابت از هم دور کنیم، باز هم باید کار انجام دهیم. کار انجام شده به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بارهای الکتریکی ذخیره می‌شود.

مثال ۲-۱۲

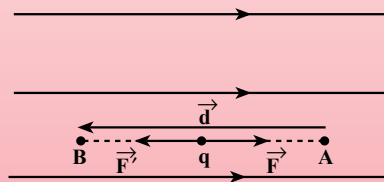
ذره‌ای با بار الکتریکی مثبت q را با سرعت ثابت در میدان الکتریکی یکنواخت (یعنی میدانی که بردار میدان در همه‌جای آن یکسان است) \vec{E} ، در خلاف جهت میدان و به موازات خط‌های میدان به اندازه‌ی d جابه‌جا می‌کنیم. برای این جابه‌جایی، چه مقدار کار باید انجام دهیم؟

حل: میدان الکتریکی بر بار مثبت q ، نیرویی برابر $F = qE$ و در جهت میدان وارد می‌کند. برای آن‌که ذره‌ی q را با سرعت ثابت در خلاف جهت میدان جابه‌جا کنیم، باید به آن نیرویی برابر $F' = qE$ و در خلاف جهت میدان - یعنی در جهت جابه‌جایی - وارد کنیم (شکل ۲-۳۷). بنابراین، زاویه‌ی بین نیرویی که ما وارد می‌کنیم (یعنی نیروی \vec{F}') و جابه‌جایی (\vec{d}) برابر صفر است. کاری که ما انجام می‌دهیم، برابر است با:

$$W = F' \cdot d \cdot \cos \alpha$$

$$W = q \cdot E \cdot d \cdot \cos(0^\circ)$$

$$W = q \cdot E \cdot d$$



شکل ۲-۳۷

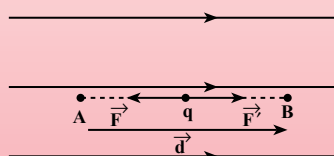
در این جا، کاری که ما انجام می دهیم مثبت است و انرژی مصرفی ما به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی، در بار الکتریکی q ذخیره می شود. هرچه اندازه ی جابه جایی بیش تر باشد، کار و انرژی مصرفی ما بیش تر می شود و در نتیجه، افزایش انرژی پتانسیل الکتریکی بار q ، بیش تر می شود. درست مانند وقتی که یک جسم را روی زمین، از یک نقطه به نقطه ی بالاتری می بریم و انرژی پتانسیل گرانشی آن افزایش می یابد. اگر بار الکتریکی q را در نقطه ی B (شکل ۳۸-۲) رها کنیم، در جهت خط های میدان به حرکت در می آید و انرژی پتانسیل الکتریکی آن به انرژی جنبشی تبدیل می شود. مانند وقتی که یک جسم را از نقطه ی بالای زمین رها می کنیم و جسم به پایین حرکت می کند. در این حالت، انرژی پتانسیل گرانشی آن کاهش می یابد و به انرژی جنبشی تبدیل می شود.

مثال ۳-۲

بار الکتریکی منفی q را در میدان الکتریکی یکنواختی به بزرگی E با سرعت ثابت و در جهت میدان به اندازه ی d جابه جا می کنیم. کاری را که در این جابه جایی انجام می شود، محاسبه کنید.

حل: میدان الکتریکی، نیرویی به اندازه ی $F = q.E$ در خلاف جهت میدان به بار الکتریکی منفی وارد می کند. در نتیجه، برای جابه جایی بار q با سرعت ثابت باید نیروی $F' = q.E$ در جهت میدان، یعنی در جهت جابه جایی، به آن وارد کنیم (شکل ۳۸-۲). کار انجام شده توسط ما در این جابه جایی برابر است با:

$$W = F'.d \cdot \cos \alpha \rightarrow W = q.E.d$$



شکل ۳۸-۲

در این مثال نیز کار انجام شده توسط ما مثبت است و انرژی مصرفی به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در بار q ذخیره می شود. اگر بار q را رها کنیم، در خلاف جهت میدان شروع به حرکت می کند. در این حال، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می یابد و به انرژی جنبشی تبدیل می شود. از مثال های ۱۲-۲ و ۱۳-۲ چنین نتیجه می گیریم که تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یک بار الکتریکی وقتی آن را در یک میدان الکتریکی جابه جا می کنیم، برابر انرژی ای است که برای جابه جایی

آن بار الکتریکی صرف می‌شود.

$$U = W \quad (۱۳-۲)$$

اگر کاری که ما برای جابه‌جایی بار الکتریکی (با سرعت ثابت) انجام می‌دهیم مثبت باشد ($W > 0$)، انرژی پتانسیل بار، افزایش می‌یابد؛ یعنی، $U > 0$ و $U_2 > U_1$ می‌شود. در صورتی که کار انجام شده توسط ما منفی باشد ($W < 0$)، انرژی پتانسیل بار الکتریکی کاهش می‌یابد؛ یعنی، $U < 0$ و $U_2 < U_1$ است.

۹-۲- اختلاف پتانسیل الکتریکی

در بخش ۲-۸ دیدید که بار الکتریکی در میدان الکتریکی، دارای انرژی پتانسیل الکتریکی است. در یک نقطه‌ی میدان، اندازه‌ی انرژی پتانسیل الکتریکی باری واقع در آن نقطه، به اندازه‌ی بار الکتریکی بستگی دارد. هرچه اندازه‌ی بار الکتریکی بیش‌تر باشد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز بیش‌تر می‌شود. در مبحث الکتریسته، معمولاً به‌غیر از انرژی پتانسیل، مفهوم دیگری نیز تعریف می‌شود که کاربرد عملی آن بیش‌تر است و به آن پتانسیل الکتریکی می‌گویند. با این کمیت در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه آشنا شدید و دیدید که اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو نقطه عامل شارش بار الکتریکی بین آن دو نقطه است. هم‌چنین، در همان کتاب دیدید که اگر دو ظرف آب به یک‌دیگر مربوط شوند، آب از ظرفی که انرژی پتانسیل گرانشی یکای جرم آن بیش‌تر است، به ظرف دیگر شارش می‌کند. در الکتریسته نیز عامل شارش بار الکتریکی به کمک اختلاف انرژی پتانسیل الکتریکی بار در دو نقطه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

اختلاف پتانسیل الکتریکی دو نقطه، برابر تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی یکای بار الکتریکی مثبت است، وقتی یکای بار از نقطه‌ی اول تا نقطه‌ی دوم جابه‌جا می‌شود. بنابراین، اگر انرژی پتانسیل الکتریکی بار مثبت q در یک نقطه‌ی میدان برابر U_1 و در نقطه‌ی دیگر برابر U_2 باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین این دو نقطه، که با نماد V نشان داده می‌شود، از رابطه‌ی ۱۴-۲ به‌دست می‌آید:

$$U = U_2 - U_1 \quad \text{و} \quad V = V_2 - V_1$$

با توجه به تعریف اختلاف پتانسیل الکتریکی، داریم:

$$V = \frac{U}{q} \quad (۱۴-۲)$$

در این رابطه، U بر حسب ژول (J)، q بر حسب کولن (C) و V بر حسب ولت (V) است.

در بخش ۲-۸ دیدید که اگر بار الکتریکی مثبت در جهت میدان الکتریکی حرکت کند، انرژی پتانسیل الکتریکی آن کاهش می‌یابد. تغییر پتانسیل الکتریکی به تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بستگی دارد (رابطه ی ۲-۱۴)؛ بنابراین، نتیجه می‌گیریم که هرگاه بار الکتریکی مثبت در جهت میدان الکتریکی جابه‌جا شود، از پتانسیل الکتریکی بیش‌تر به پتانسیل الکتریکی کم‌تر رفته است. شما با انواع پیل (قوه) که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا رادیو از آن‌ها استفاده می‌شود و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. پیل‌ها معمولاً $\frac{1}{5}$ ولتی، $\frac{4}{5}$ ولتی یا ۹ ولتی‌اند. باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ ولتی یا بیش‌تراند. هر پیل یا باتری دو پایانه دارد که یکی مثبت و دیگری منفی است. وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایانه‌های منفی و مثبت آن برابر ۱۲ ولت است. اگر پتانسیل پایانه‌ی منفی را با V_- و پتانسیل پایانه‌ی مثبت را با V_+ نشان دهیم، داریم:

$$V_+ - V_- = 12V$$

$$V_+ = 12V + V_-$$

بنابراین، پتانسیل پایانه‌ی مثبت به اندازه‌ی ۱۲ ولت از پتانسیل پایانه‌ی منفی آن بیش‌تر است. مثلاً اگر پتانسیل پایانه‌ی منفی را برابر $4V -$ یا $4V$ فرض کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت به ترتیب برابر $8V$ یا $16V$ خواهد شد. ممکن است پتانسیل پایانه‌ی منفی را برابر صفر بگیریم، در این صورت، پتانسیل پایانه‌ی مثبت برابر $12V$ می‌شود. معمولاً (به‌خصوص در مهندسی برق) پتانسیل زمین را برابر صفر می‌گیرند و پتانسیل نقطه‌های دیگر را نسبت به زمین می‌سنجند. در این صورت، پتانسیل هر جسم رسانا که به زمین وصل شود، برابر صفر می‌شود. مثلاً اگر پایانه‌ی منفی باتری را به زمین وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی مثبت آن برابر ۱۲ ولت می‌شود. در هر حال، نکته‌ی مهم، اختلاف پتانسیل بین دو نقطه است که در محاسبه‌ها وارد می‌شود.

تمرین ۲-۶

اگر پایانه‌ی مثبت یک باتری ۱۲ ولتی را به زمین وصل کنیم، پتانسیل پایانه‌ی منفی آن چند ولت خواهد شد؟

مثال ۲-۱۴

اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری یک خودرو برابر $12V$ است. اگر

بار الکتریکی ۱/۵ کولن از پایانه‌ی مثبت تا منفی باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟
 حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱۴-۲ داریم:

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

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

$$U = 1/5 \times (-12) = -18J$$

بنابراین، انرژی پتانسیل الکتریکی این بار به اندازه‌ی ۱۸J کاهش یافته است.

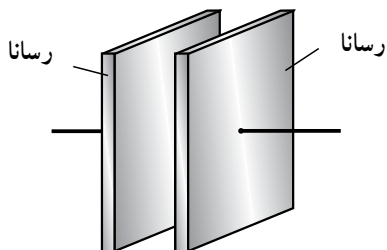
تمرین ۷-۲

اگر بار الکتریکی جابه‌جا شده در مثال ۱۴-۲ منفی باشد، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چه اندازه و چگونه تغییر می‌کند؟

۲-۱-۰ خازن

خازن یک قطعه‌ی الکتریکی است که می‌تواند مقداری بار الکتریکی و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند و هر زمان که لازم باشد، آن را در مدار تخلیه کند. هر خازن از دو رسانا که به یک‌دیگر اتصال الکتریکی ندارند، تشکیل می‌شود.

خازن را به شکل‌های مختلف و برای مصرف‌های متفاوتی می‌سازند. در مدار لامپ‌های مهتابی (فلوئورسنت)، بلندگو، دلقوی ماشین، رادیو، تلویزیون، رایانه و ... از خازن استفاده می‌شود. برای آشنا شدن با چگونگی عمل خازن در مدار، ساده‌ترین شکل خازن را بررسی می‌کنیم. به این خازن، **خازن تخت** یا **مسطح** گفته می‌شود. رساناهای خازن



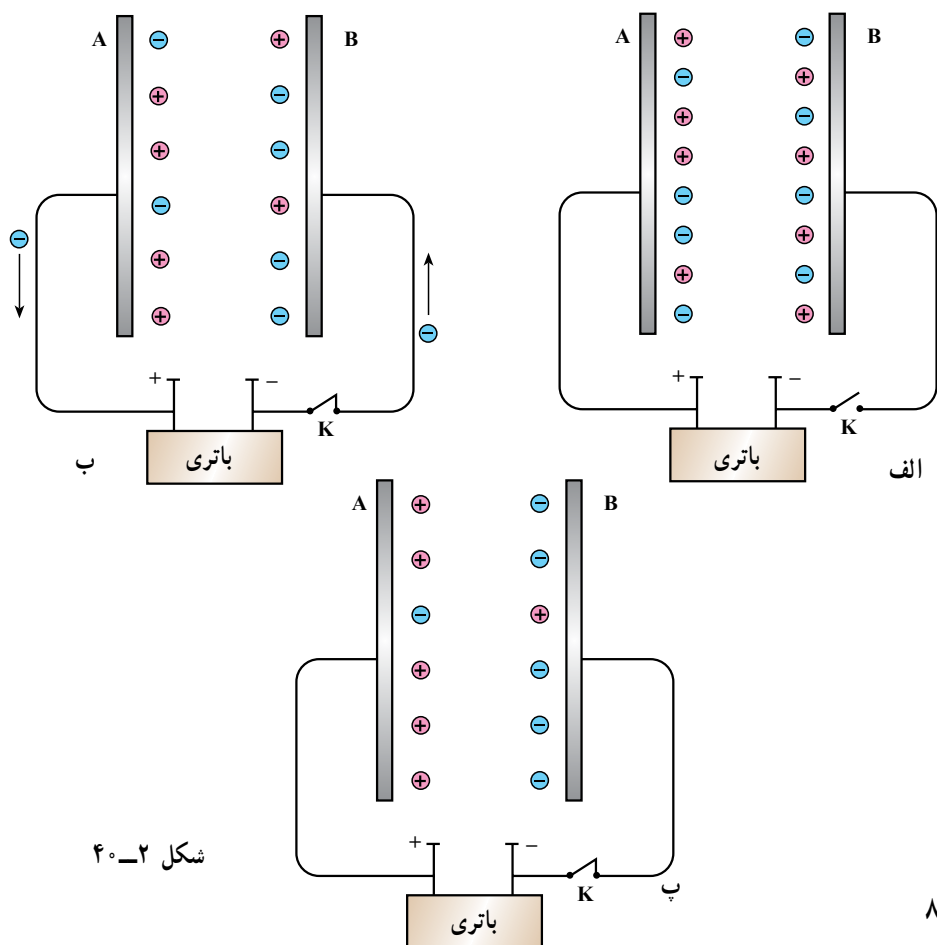
تخت، دو صفحه‌ی فلزی موازی یک‌دیگرند. به همین دلیل به این خازن، **خازن با صفحه‌های موازی** نیز گفته می‌شود. خازن تخت را در مدارها با نماد «—|—|—» نشان می‌دهیم.

شکل ۲-۳۹- خازن تخت

ذخیره‌ی بار الکتریکی در خازن : وقتی به یک خازن مقداری بار الکتریکی داده شود، می‌گوییم

در خازن بار الکتریکی ذخیره شده است. برای ذخیره‌ی بار الکتریکی در خازن، به مولدی مانند یک باتری نیاز است. ابتدا دو صفحه‌ی خازن را مطابق شکل ۲-۴ الف با سیم‌های رابط و یک کلید به پایانه‌های مولد وصل می‌کنیم. با بستن کلید، باتری بار الکتریکی « $-q$ » را روی صفحه‌ی متصل به پایانه‌ی منفی انباشته می‌کند. بار « $-q$ »، بار الکتریکی « q » را روی صفحه‌ی مقابل القا می‌کند. بارهای منفی رانده شده از این صفحه، به مولد برمی‌گردند. برای روشن شدن موضوع به ساز و کار ذخیره‌ی بار در خازن می‌پردازیم.

همان‌گونه که در شکل ۲-۴ الف به صورت طرح وار نشان داده شده است، در هر یک از صفحه‌های خازن، بارهای مثبت و منفی وجود دارد. وقتی کلید (K) را وصل می‌کنیم، به علت وجود اختلاف پتانسیل الکتریکی بین هر پایانه، با صفحه‌ی رسانای متصل به آن، بارهای الکتریکی شروع به جابه‌جا شدن می‌کنند (شکل ۲-۴ ب). چون در رساناهای فلزی الکترون‌های آزاد می‌توانند جابه‌جا



شکل ۲-۴

شوند، باتری با مصرف کردن انرژی هر دو صفحه را باردار می‌کند. از پایانه‌ی منفی، تعدادی الکترون به صفحه‌ی B منتقل می‌شود؛ در حالی که پایانه‌ی مثبت باتری از صفحه‌ی A الکترون می‌گیرد. جابه‌جایی بارهای الکتریکی آن‌قدر ادامه می‌یابد تا پتانسیل الکتریکی هر یک از صفحه‌های خازن با پتانسیل پایانه‌ی متصل به آن برابر شود. به این ترتیب، اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی خازن (که به آن اختلاف پتانسیل دو سر خازن می‌گوییم) با اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های باتری برابر می‌شود (شکل ۲-۴۰ پ).

$$V_A = V \quad \text{و} \quad V_B = V_-$$

$$V_A - V_B = V - V_- \quad (15-2)$$

در نتیجه، هر یک از صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شود. روی صفحه‌ی A بار q و روی صفحه‌ی B، بار $-q$ انباشته می‌شود. در این حالت، می‌گوییم که بار الکتریکی q در خازن ذخیره شده است. در واقع، باتری با صرف انرژی، بار q را در خازن ذخیره کرده است. انرژی‌ای که باتری مصرف کرده، به‌صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن ذخیره شده است. اکنون، خازن دارای بار الکتریکی و انرژی است.

۱۱-۲- ظرفیت خازن

آزمایش نشان می‌دهد که هرچه اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های مولد بیش‌تر باشد، بار ذخیره‌شده در خازن نیز بیش‌تر می‌شود. به عبارتی نسبت بار الکتریکی خازن (q) به اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی آن (V)، یعنی نسبت $\frac{q}{V}$ ، در آزمایش‌های مختلف ثابت می‌ماند. این نسبت را که به اندازه‌ی بار الکتریکی خازن و نیز به اختلاف پتانسیل دو سر آن بستگی ندارد، با نماد «C» نشان می‌دهیم و به آن ظرفیت خازن می‌گوییم. بنابراین، ظرفیت خازن برابر نسبت بار ذخیره‌شده در آن به اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی آن است.

$$C = \frac{q}{V} \quad (16-2)$$

به پاس خدمات مایکل فارادی، دانشمند انگلیسی، یکای ظرفیت فاراد نامیده شده است. در رابطه‌ی ۱۶-۲ بار الکتریکی بر حسب کولن، اختلاف پتانسیل بر حسب ولت و ظرفیت بر حسب فاراد (F) است. فاراد یکای بسیار بزرگی است و ظرفیت خازن‌های تخت از حدود چند میکروفاراد تجاوز نمی‌کند.

مثال ۱۵-۲

صفحه‌های خازن تختی را به پایانه‌های مولدی به اختلاف پتانسیل ۲۴۷ وصل می‌کنیم. اگر بار $C = ۱۲۰$ روی هر صفحه‌ی خازن ذخیره شود، ظرفیت خازن را محاسبه کنید. اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل ۳۶ ولت وصل کنیم، بار الکتریکی ذخیره شده در آن چه اندازه می‌شود؟
حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱۶-۲ داریم:

$$C = \frac{q}{V}$$

$$C = \frac{۱/۲ \times ۱۰^{-۴}}{۲۴} \quad \text{با استفاده از این رابطه، داریم:}$$

$$C = ۵ \times ۱۰^{-۶} \text{ F} = ۵. \text{ F}$$

رابطه‌ی (۲-۱۶) را می‌توان به صورت $q = C.V$ نوشت. با استفاده از این

$$q = ۵ \times ۳۶ = ۱۸۰. \text{ C} \quad \text{رابطه، داریم:}$$

۱۲-۲- عامل‌های مؤثر بر ظرفیت خازن تخت

ظرفیت خازن به بار الکتریکی خازن و اختلاف پتانسیل دو سر آن بستگی ندارد. ظرفیت خازن تخت از مشخصات ساختمانی خازن است و به عامل‌های زیر بستگی دارد.
۱- با مساحت سطح مشترک صفحه‌های خازن که روبروی یک‌دیگر قرار دارند، نسبت مستقیم دارد.

$$C \propto A$$

۲- با فاصله‌ی دو صفحه از یک‌دیگر نسبت وارون دارد.

$$C \propto \frac{1}{d}$$

اگر بین دو صفحه‌ی خازن خلأ باشد، ظرفیت خازن تخت از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (۱۷-۲)$$

در رابطه‌ی ۱۷-۲، ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ است. در این رابطه، A بر حسب

مترمربع، d بر حسب متر و C بر حسب فاراد (F) است.

اگر یک دی‌الکتریک (نارسانا) مانند شیشه یا پارافین فضای بین دو صفحه‌ی خازن تختی را

پُر کند، ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. در این صورت، ظرفیت خازن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید :

$$C = k \cdot \frac{A}{d} \quad (۱۸-۲)$$

در رابطه‌ی ۱۸-۲، k ضریبی بدون یکاست که به آن ثابت دی‌الکتریک گفته می‌شود. ثابت دی‌الکتریک به جنس دی‌الکتریک بستگی دارد. اگر بین دو صفحه خلأ باشد، $k = ۱$ است. k برای سایر دی‌الکتریک‌ها بزرگ‌تر از یک است ($k > ۱$). ثابت دی‌الکتریک برخی از ماده‌ها در جدول ۱-۲ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود ثابت دی‌الکتریک هوا تقریباً برابر ۱ است.

جدول ۱-۲- ثابت دی‌الکتریک دی‌الکتریک‌های متداول

ثابت دی‌الکتریک	دی‌الکتریک
	دی‌الکتریک‌های جامد
۱۰ - ۶	شیشه
۵/۶ - ۶/۶	میکا
۲/۱ - ۲/۳	کاغذ پارافینی
۲/۱ - ۲/۵	پارافین (در $C ۲۰$)
	دی‌الکتریک‌های مایع
۲۵	الکل
۲ - ۲/۲	روغن
۸۰ - ۸۳	آب
	دی‌الکتریک‌های گازی
۱/۰۰۰۹۷	دی اکسید کربن
۱/۰۰۰۶۰	هوا
۱/۰۰۰۲۶	هیدروژن

مثال ۱۷-۲

هر یک از صفحه‌های خازن تختی، به شکل مستطیلی به طول 6 cm و عرض 2 cm است که بین آن‌ها از دی الکتریکی به ضخامت $1/5\text{ mm}$ و ثابت دی الکتریک

10^9 پُر شده است. ظرفیت این خازن را محاسبه کنید. $\frac{C}{\text{N.m}^2} = 9 \times 10^{-12}$

حل: با استفاده از رابطه‌ی ۱۸-۲ داریم:

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

$$C = 10 \times 9 \times 10^{-12} \times \frac{20 \times 60 \times 10^{-4}}{1/5 \times 10^{-3}}$$

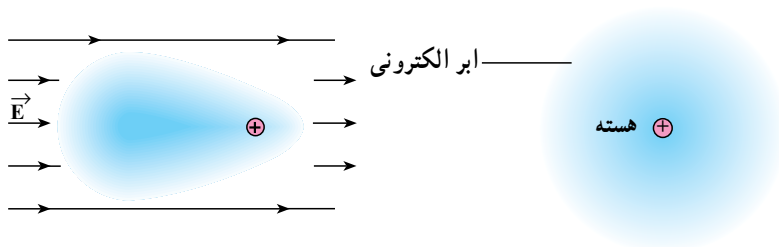
$$C = 7/2 \times 10^{-9} \text{ F} = 7/2 \text{ nF}$$

فروشکست

دیدیم که اگر اختلاف پتانسیل دو سر خازن را افزایش دهیم، بار ذخیره‌شده در خازن نیز افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که اگر بار الکتریکی خازن از مقدار معینی بیش‌تر شود، یک میدان الکتریکی بسیار قوی بین دو صفحه ایجاد می‌شود. این میدان الکتریکی باعث می‌شود که دی الکتریک بین دو صفحه به‌طور موقت رسانا شود. در نتیجه، با ایجاد جرقه بین دو صفحه، خازن تخلیه می‌شود. این پدیده را **فروشکست دی الکتریک** می‌نامند. پدیده‌ی فروشکست باعث تغییر ماهیت یا سوراخ‌شدن دی الکتریک جامد و سوختن خازن می‌شود.

بررسی میکروسکوپی نقش دی الکتریک: در بخش ۱۲-۲ دیدیم که قراردادن دی الکتریک بین صفحه‌های یک خازن تخت، باعث افزایش ظرفیت آن می‌شود. اما دی الکتریک چگونه ظرفیت خازن را افزایش می‌دهد؟

وقتی یک دی الکتریک در میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، تأثیر میدان الکتریکی بر اتم باعث می‌شود که ابر الکترونی در خلاف جهت میدان و هسته در جهت میدان جابه‌جا شوند (چرا؟). در نتیجه، مرکز مؤثر بار مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند. در این حالت، می‌گوییم که اتم در میدان الکتریکی قطبیده شده است.



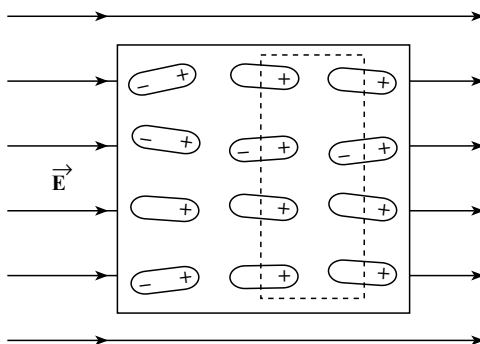
ب- در حضور میدان الکتریکی، مرکز مؤثر بارهای مثبت و منفی از هم جدا شده‌اند.

الف- در غیاب میدان الکتریکی، مرکز مؤثر بارهای مثبت و منفی بر هم منطبق‌اند.

شکل ۲-۴۱

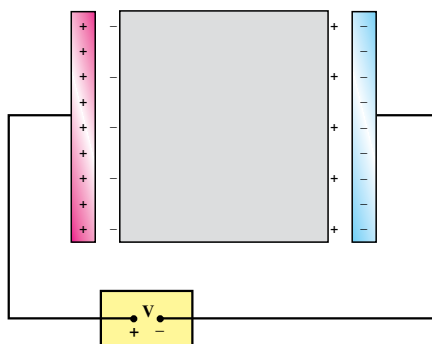
در شکل ۲-۴۱ الف- یک اتم در غیاب میدان الکتریکی و ب- همان اتم در حضور میدان الکتریکی \vec{E} به‌طور طرح‌وار نشان داده شده است. مولکول‌های دی‌الکتریک‌ها در میدان الکتریکی قطبیده می‌شوند.

همان‌طور که در شکل ۲-۴۲ نشان داده شده است، درون دی‌الکتریک، بارهای الکتریکی یک‌دیگر را خنثی می‌کنند.



شکل ۲-۴۲ دی‌الکتریک در میدان الکتریکی

ولی در مجاورت صفحه‌های خازن، در سطح دی الکتریک بارهای غیر هم‌نام با بار صفحه‌ها ایجاد می‌شود (شکل ۲-۴۳). نیروی ربایشی بین این بارهای الکتریکی باعث می‌شود که با ولتاژ ثابت، بار خازن نسبت به وقتی که دی الکتریک ندارد، افزایش یابد و این به معنای افزایش ظرفیت خازن است.



شکل ۲-۴۳

فناوری

انواع خازن‌ها: غالباً خازن‌ها را براساس دی الکتریک آن‌ها دسته‌بندی می‌کنند؛ مثلاً خازن کاغذی، الکترولیتی، سرامیکی، میکا و... . خازن‌ها بسیار متنوع‌اند؛ زیرا برای کاربردهای مختلفی ساخته می‌شوند. در این جا با چند نمونه خازن آشنا می‌شوید.



شکل ۲-۴۴

خازن‌های کاغذی: این خازن‌ها از دو ورقه قلع یا آلومینیوم تشکیل شده‌اند که بین آن‌ها دو ورقه کاغذ ظریف و نازک آغشته به روغن جا داده می‌شود. این ورق‌ها را

لوله می کنند و به صورت یک استوانه ی فشرده در می آورند و آن را در محفظه ی پلاستیکی یا پوشش مومی قرار می دهند. ظرفیت این نوع خازن ها از 1 nF تا $1\text{ }\mu\text{F}$ است.

خازن های میکا: بین ورقه های فلزی نازک قلعی، ورقه های نازک میکا قرار می دهند و ورقه های قلع را یک در میان به یک دیگر وصل می کنند. همه ی ورقه ها در محفظه ی فیبر استخوانی قرار می گیرند. ظرفیت این خازن ها حدود 50° تا 500° پیکوفاراد است.

خازن های سرامیکی: دی الکتریک این خازن ها سرامیک است که با استفاده از انواع سیلیکات ها در دمای بالا تهیه می شود. ثابت دی الکتریک این خازن ها بالا و در حدود 1000° است. خازن های سرامیکی به شکل عدس تهیه می شوند و حجم آن ها کم است. صفحه های رسانای آن ها نیز با ذوب نقره در دو طرف سرامیک تهیه می شود. ظرفیت این خازن ها حدود ده ها نانوفاراد (nF) است.

خازن های الکترولیتی: این نوع خازن ها از صفحه های آلومینیومی تشکیل شده اند که در میان آن ها الکترولیت هایی از انواع مختلف فسفات یا کربنات قرار می دهند. در بین صفحه ها ماده ای اسفنجی است که الکترولیت را به خود جذب می کند. ظرفیت این خازن ها بالاست و حدود $1000^\circ\text{ }\mu\text{F}$ می رسد.

خازن های متغیر: دی الکتریک این خازن ها معمولاً هوا است. در ساختمان آن ها دو نوع صفحه ی فلزی، یک دسته ثابت و دسته ی دیگر متغیر به کار رفته است که هر دو دسته، روی یک محور قرار گرفته اند. ولی صفحه های متغیر روی این محور می چرخند. صفحه ها به شکل نیم دایره اند و با چرخیدن صفحه های متغیر، مساحت خازن کم و زیاد می شود. این نوع خازن در گیرنده های رادیویی به کار می رود.



شکل ۲- ۴۵

۲-۱۳- انرژی خازن

در بخش ۱-۸ دیدیم که وقتی دو بار الکتریکی (هم نام یا غیرهم نام) در مجاورت یکدیگر قرار گیرند، مجموعه‌ی بارها دارای انرژی پتانسیل الکتریکی می‌شوند. خازن پر شده نیز به همین علت دارای انرژی پتانسیل الکتریکی است. در واقع، انرژی‌ای که مولد برای پُر کردن خازن مصرف می‌کند، به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن ذخیره می‌شود. این انرژی را خازن در هنگام تخلیه در یک مدار، پس می‌دهد. انرژی ذخیره شده در خازن را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$U = \frac{1}{2} q V = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{q^2}{2C} \quad (2-19)$$

مثال ۲-۱۷

خازنی به ظرفیت $6\mu\text{F}$ را به ولتاژ 200V وصل می‌کنیم. بار الکتریکی و انرژی ذخیره شده در خازن را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از رابطه‌های ۲-۱۶ و ۲-۱۹ داریم:

$$q = CV$$

$$q = 6 \times 10^{-6} \times 200$$

$$q = 1/2 \times 10^{-3} \text{C} = 1/2 \text{mC}$$

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

$$U = \frac{1}{2} \times 1/2 \times 10^{-3} \times 200 = 0.12 \text{J}$$

۲-۱۴- به هم بستن خازن‌ها

در مدارهای الکتریکی، گاهی لازم می‌شود که از ظرفیت معینی استفاده کنیم اما آن را در اختیار نداریم. در این گونه موارد می‌توانیم خازن‌ها را به یکدیگر ببندیم و ظرفیت موردنظر را به دست آوریم. همچنین می‌توان یک خازن را جایگزین چند خازن در یک مدار کرد. به این خازن، خازن معادل و به ظرفیت آن، ظرفیت معادل می‌گوییم. ظرفیت معادل چند خازن، ظرفیت خازنی است که اگر به جای آن خازن‌ها در مدار قرار گیرد و به همان ولتاژی که به دو سر مجموعه‌ی خازن‌ها وصل است، متصل شود، انرژی الکتریکی ذخیره شده در آن برابر انرژی‌ای باشد که در مجموعه‌ی خازن‌ها ذخیره شده است.

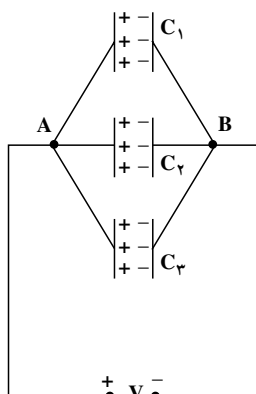
در حالت ساده، خازن‌ها ممکن است به طور موازی یا متوالی به یک‌دیگر وصل شده باشند. حالت‌های پیچیده‌تر را به کمک این دو حالت ساده می‌توان بررسی کرد.

الف — به هم بستن موازی خازن‌ها: اگر خازن‌های C_1 و C_2 و ... را مطابق شکل ۴۶-۲ به یک‌دیگر وصل کنیم، می‌گوییم خازن‌ها را به طور موازی به هم وصل کرده‌ایم. اگر ولتاژ V را به دو سر مجموعه وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر هر خازن برابر V می‌شود. بار الکتریکی هر یک از خازن‌ها برابر است با:

$$q_1 = C_1 V$$

$$q_2 = C_2 V$$

$$q_3 = C_3 V$$



شکل ۴۶-۲

بار الکتریکی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها برابر $q = q_1 + q_2 + q_3$ است. اگر خازن معادل به ظرفیت C_T را به همین ولتاژ وصل کنیم، بار ذخیره شده در آن $q = C_T V$ می‌شود. در نتیجه، داریم:

$$q = C_T V$$

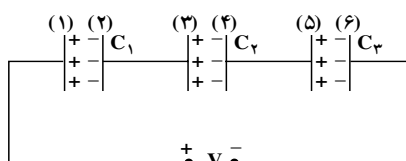
$$q_1 + q_2 + q_3 = C_T V$$

$$(C_1 + C_2 + C_3) V = C_T V$$

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 \quad (۲۰-۲)$$

بنابراین، ظرفیت خازن معادل مجموعه‌ای از خازن‌ها که به طور موازی به یک‌دیگر وصل شده‌اند، برابر مجموع ظرفیت خازن‌هاست و ظرفیت خازن معادل از ظرفیت هر یک از خازن‌ها بیش‌تر است.

ب — به هم بستن متوالی خازن‌ها: در شکل



شکل ۴۷-۲

۴۷-۲ سه خازن به طور متوالی به یک‌دیگر وصل شده‌اند. وقتی خازن‌ها به طور متوالی به یک ولتاژ وصل می‌شوند، هیچ کدام از آن‌ها به طور مستقل به ولتاژ V وصل نیستند. اگر روی صفحه‌ی ۱ بار $+q$

انباشته شود، بار $-q$ روی صفحه‌ی ۲ القا می‌گردد. مجموع بار صفحه‌های ۲ و ۳ برابر صفر است (چرا؟)؛ بنابراین، بار $+q$ روی صفحه‌ی ۳ انباشته می‌شود و به همین ترتیب، بار هر خازن برابر q می‌شود. بار ذخیره شده روی مجموعه‌ی خازن‌ها نیز برابر q است. اگر ولتاژ خازن‌ها به ترتیب V_1 و V_2 و V_3 باشد، ولتاژ دو سر مدار برابر مجموع ولتاژ دو سر خازن‌هاست.

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

اگر به جای V_1 و V_2 و V_3 مساوی آن‌ها را از رابطه‌های $V_1 = \frac{q}{C_1}$ و $V_2 = \frac{q}{C_2}$ و $V_3 = \frac{q}{C_3}$ قرار دهیم، نتیجه می‌شود:

$$V = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

اگر ظرفیت خازن معادل باشد، وقتی به ولتاژ V وصل شود، بار آن برابر q می‌شود و در نتیجه، $V = \frac{q}{C_T}$ است. با قرار دادن V به جای V نتیجه می‌شود:

$$\frac{q}{C_T} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} \quad \text{و یا:}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (2-21)$$

بنابراین، وقتی خازن‌ها به طور متوالی به یک‌دیگر وصل می‌شوند، بار هر یک از خازن‌ها برابر با بار خازن معادل آن‌ها و وارون ظرفیت معادل، برابر مجموع وارون ظرفیت خازن‌هاست و ظرفیت معادل از کوچک‌ترین ظرفیت نیز کوچک‌تر است.

مثال ۲-۱۸

به دو سر مجموعه‌ی سه خازن به ظرفیت‌های $6\mu F$ ، $3\mu F$ و $2\mu F$ که به طور متوالی به یک‌دیگر وصل‌اند، اختلاف پتانسیل $150V$ را وصل می‌کنیم. الف - ظرفیت خازن معادل، ب - بار الکتریکی هر خازن و پ - ولتاژ دو سر هر خازن را حساب کنید.

حل: الف - با استفاده از رابطه‌ی ۲-۲۱ داریم:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1+2+3}{6}$$

$$C_T = 1\mu F$$

ب- بار الکتریکی هر خازن، برابر با بار خازن معادل آن هاست.

$$q = CV$$

$$q = 1 \times 150 = 150 \mu C$$

$$q_1 = q_2 = q_3 = q = 150 \mu C$$

پ- با استفاده از رابطه ی $q = CV$ داریم:

$$V = \frac{q}{C}$$

$$V_1 = \frac{150}{6} = 25V$$

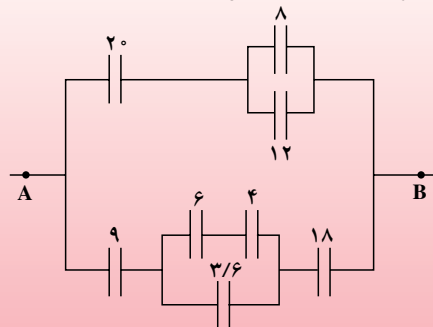
$$V_2 = \frac{150}{3} = 50V$$

$$V_3 = \frac{150}{2} = 75V$$

ممکن است در یک مدار، خازن ها به صورت پیچیده تری به یک دیگر وصل شده باشند. با استفاده از محاسبه ی ظرفیت خازن های موازی و متوالی، می توان مدار را ساده کرد و در نهایت ظرفیت معادل را به دست آورد.

مثال ۲-۱۹

ظرفیت معادل بین دو نقطه ی A و B را در شکل ۲-۴۸ محاسبه کنید. ظرفیت هر خازن بر حسب میکرو فاراد روی شکل داده شده است.

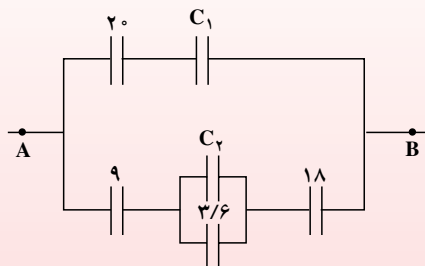


شکل ۲-۴۸

حل: دو خازن $8\mu\text{F}$ و $12\mu\text{F}$ با یکدیگر موازی و خازن $4\mu\text{F}$ با $6\mu\text{F}$ به طور متوالی به یکدیگر وصل شده‌اند. اگر به جای آن‌ها خازن معادل آن‌ها را قرار دهیم، مدار به صورت شکل ۴۹-۲ ساده می‌شود.

$$C_1 = 12 + 8 = 20\mu\text{F}$$

$$C_2 = \frac{6 \times 4}{6 + 4} = 2.4\mu\text{F}$$

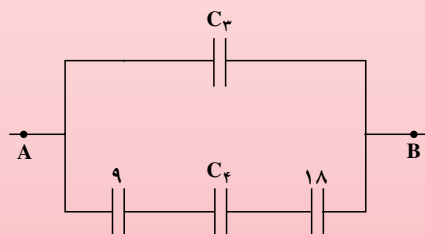


شکل ۴۹-۲

اکنون خازن‌های 20 میکروفارادی با یکدیگر متوالی‌اند و خازن C_2 با خازن $3/6$ میکروفارادی موازی است. مدار به صورت شکل ۵۰-۲ ساده می‌شود.

$$C_3 = \frac{20}{2} = 10\mu\text{F}$$

$$C_4 = 2.4 + 3 + 6 = 6\mu\text{F}$$



شکل ۵۰-۲

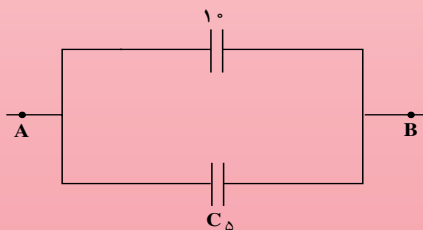
اگر خازن معادل سه خازن $9\mu\text{F}$ ، C_4 و $18\mu\text{F}$ را که متوالی‌اند را با C_5 نشان دهیم، مدار به صورت شکل ۵۱-۲ ساده می‌شود.

$$\frac{1}{C_5} = \frac{1}{9} + \frac{1}{6} + \frac{1}{18}$$

$$\frac{1}{C_5} = \frac{2 + 3 + 1}{18}$$

$$C_5 = \frac{18}{6} = 3\mu\text{F}$$

$$C_T = 10 + 3 = 13\mu\text{F}$$



شکل ۵۱-۲

مثال ۲-۲۰

دو خازن به ظرفیت $C_1 = 2\mu F$ و C_2 را به یکدیگر وصل می‌کنیم و ولتاژ $100V$ را به دو سر مجموعه‌ی آن‌ها می‌بندیم. اگر انرژی ذخیره شده در مجموعه‌ی خازن‌ها برابر 25 میلی ژول شود، تعیین کنید که خازن‌ها چگونه به یکدیگر وصل شده‌اند. ظرفیت C_2 را نیز محاسبه کنید.

حل: اگر ظرفیت معادل دو خازن برابر C_T باشد، داریم:

$$U = \frac{1}{2} C_T V^2$$

$$25 \times 10^{-3} = \frac{1}{2} C_T \times 10^4$$

$$C_T = 5 \times 10^{-6} F = 5\mu F$$

چون ظرفیت معادل از C_1 بزرگ‌تر است، دو خازن به‌طور موازی به یکدیگر وصل شده‌اند.

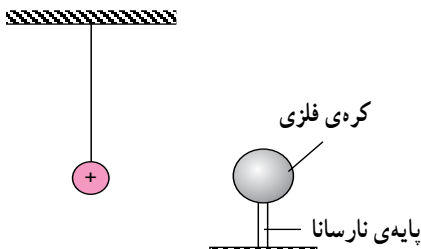
$$C_T = C_1 + C_2$$

$$5 = 2 + C_2$$

$$C_2 = 3\mu F$$

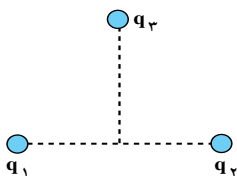
تمرین‌های فصل دوم

۱- یک کره‌ی فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه‌ی نارسانایی قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می‌کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می‌افتد.



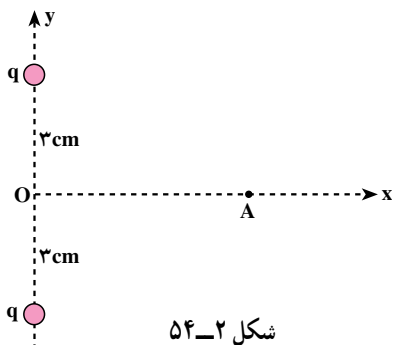
شکل ۲-۵۲

۲- بارهای الکتریکی نقطه‌ای $q_1 = -4\mu C$ و $q_2 = -3\mu C$ مطابق شکل در فاصله‌ی 8cm از یکدیگر ثابت شده‌اند. بار نقطه‌ای $q_3 = -5\mu C$ را در نقطه‌ای که فاصله‌ی آن از هر یک از دو بار الکتریکی قبلی برابر 5cm است، قرار می‌دهیم. نیروی الکتریکی وارد بر بار q_3 را محاسبه کنید.



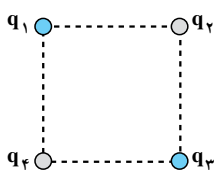
شکل ۲-۵۳

۳- توضیح دهید که چرا خط‌های میدان الکتریکی یکنواخت، به صورت خط‌های راست و موازی با فاصله‌های مساوی با یکدیگرند.



شکل ۵۴-۲

۴- دو بار الکتریکی نقطه‌ای هم نام $q = +5\mu C$ مطابق شکل ۵۴-۲ به فاصله‌ی ۶ cm از یکدیگر قرار دارند. جهت و اندازه‌ی میدان الکتریکی را در نقطه‌ی A واقع بر عمود منصف خط واصل دو بار، در فاصله‌ی ۴ cm از نقطه‌ی O (وسط خط واصل دو بار) مشخص کنید.



شکل ۵۵-۲

۵- سه ذره‌ی باردار q_1 ، q_2 و q_3 مطابق شکل ۵۵-۲ در سه رأس مربعی ثابت شده‌اند. اگر $q_1 = q_3 = -5\mu C$ باشد، نوع و اندازه‌ی بار q_2 را طوری تعیین کنید که بار q_4 در حال تعادل باشد.

۶- در یک میدان الکتریکی یکنواخت به بزرگی $\frac{N}{C} \times 10^4$ که

جهت آن قائم و رو به پایین است، ذره‌ی باردارى به جرم ۲ g معلق و به حال سکون قرار دارد. اگر $g = 10 \frac{N}{kg}$ باشد، اندازه و نوع بار الکتریکی ذره را مشخص کنید.



شکل ۵۶-۲

۷- غلظت الکترون‌ها در ارتفاعات مختلف جو زمین متفاوت است. وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای اطراف زمین باردار می‌شود (شکل ۵۶-۲). این بارها ممکن است موجب آسیب رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شود. فرض کنید ماهواره‌ی امید اثر عبور از یکی از لایه‌های جو دارای بار الکتریکی $q = 2 \times 10^{-9} C$ شود. این ماهواره مکعبی به ابعاد $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ است. چگالی سطحی بار

الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود.)

۸- بار $q = +5\mu\text{C}$ را با سرعت ثابت در میدان الکتریکی یکنواخت $\frac{N}{C} \times 10^5$ مطابق شکل

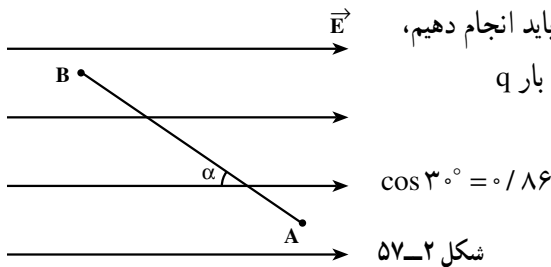
۵۷-۲ از نقطه‌ی A تا B جابه‌جا می‌کنیم. اگر $AB = 2\text{m}$ و $\alpha = 30^\circ$ درجه باشد :

الف - نیروی الکتریکی وارد بر بار q ،

ب - کاری که برای این جابه‌جایی باید انجام دهیم،

پ - تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار q

را حساب کنید.



$$\cos 30^\circ = 0.86$$

شکل ۵۷-۲

۹- دو صفحه‌ی رسانا با فاصله‌ی 2cm را موازی یک‌دیگر قرار می‌دهیم و آن‌ها را به اختلاف

پتانسیل 100V وصل می‌کنیم. در نتیجه، یکی از صفحه‌ها به‌طور منفی و دیگری به‌طور مثبت باردار

می‌شوند و میان دو صفحه میدان الکتریکی یکنواختی بوجود می‌آید. اندازه‌ی این میدان الکتریکی را

حساب کنید و توضیح دهید که کدام یک از دو صفحه پتانسیل الکتریکی بیش‌تری دارند.

۱۰- در یک میدان الکتریکی، بار $q = +2\mu\text{C}$ از نقطه‌ی A تا B جابه‌جا می‌شود. اگر انرژی

پتانسیل آن در نقطه‌های A و B به‌ترتیب $-4 \times 10^{-5}\text{J}$ و $5 \times 10^{-5}\text{J}$ باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی

میان دو نقطه $(V_B - V_A)$ را محاسبه کنید.

۱۱- بار الکتریکی $q = -4\mu\text{C}$ از نقطه‌ای با پتانسیل الکتریکی $V_1 = -40\text{V}$ تا نقطه‌ای با

پتانسیل $V_2 = -10\text{V}$ آزادانه جابه‌جا می‌شود. الف - انرژی پتانسیل الکتریکی بار q چه اندازه و

چگونه تغییر می‌کند؟ ب - توضیح دهید که تغییر انرژی پتانسیل بار q (با توجه به قانون پایستگی

انرژی) به چه انرژی‌ای تبدیل می‌شود؟

۱۲- دو صفحه‌ی رسانا به فاصله‌ی یک سانتی‌متر از هم و موازی یک‌دیگر واقع‌اند. اختلاف

پتانسیل میان دو صفحه برابر 1000V است. یک ذره به بار $+1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ و جرم $1.6 \times 10^{-27}\text{kg}$

(یک پروتون) از مجاور صفحه‌ی مثبت و از حال سکون به طرف صفحه‌ی منفی شتاب می‌گیرد. انرژی

پتانسیل الکتریکی این ذره وقتی به صفحه‌ی روبرو می‌رسد، افزایش می‌یابد یا کاهش؟ اندازه‌ی تغییرات

این انرژی را حساب کنید. سرعت ذره در لحظه‌ی رسیدن به این صفحه چه قدر است؟

۱۳- اختلاف پتانسیل بین دو صفحه‌ی یک خازن را از 28V به 40V وlt افزایش می‌دهیم.

اگر با این کار 15mC میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

۱۴- دو صفحه‌ی مربعی شکل به ضلع ۱۶cm در فاصله‌ی ۲mm از یک‌دیگر قرار دارند. فضای بین دو صفحه از پارافین با ضریب دی‌الکتریکی $۲/۵$ پر شده است. ظرفیت خازن حاصل چه اندازه است؟

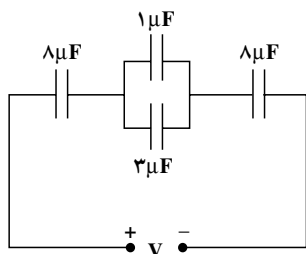
۱۵- خازنی به ظرفیت $C_1 = ۵\mu\text{F}$ با اختلاف پتانسیل ۱۲۰°V و خازنی به ظرفیت $C_2 = ۱۰\mu\text{F}$ با اختلاف پتانسیل ۷۵°V ولت پر شده‌اند. اگر این خازن‌های پر را از مدار اصلی آن‌ها جدا و صفحه‌های هم‌نام آن‌ها را به هم وصل کنیم، الف - اختلاف پتانسیل بین دو صفحه و بار ذخیره شده در هر خازن چه اندازه می‌شود؟

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

۱۶- ظرفیت خازنی ۱۲ میکروفاراد و بارالکتریکی آن q است. ۸J انرژی باید مصرف کنیم تا $+۳\text{mC}$ بار الکتریکی را از صفحه‌ی منفی جدا کرده و به صفحه‌ی مثبت منتقل کنیم. q را محاسبه کنید.

۱۷- در مدار شکل ۵۸-۲ اختلاف پتانسیل در سر

مدار برابر ۱۰V است.



شکل ۵۸-۲

الف - ظرفیت معادل مدار

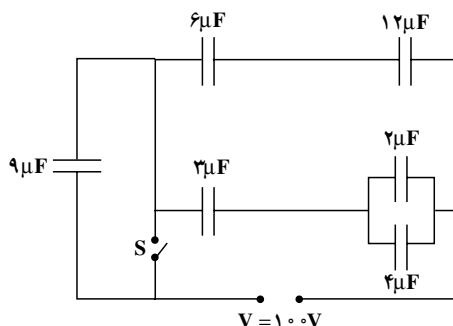
ب - بار الکتریکی و اختلاف پتانسیل دو سر هر یک

از خازن‌ها را حساب کنید.

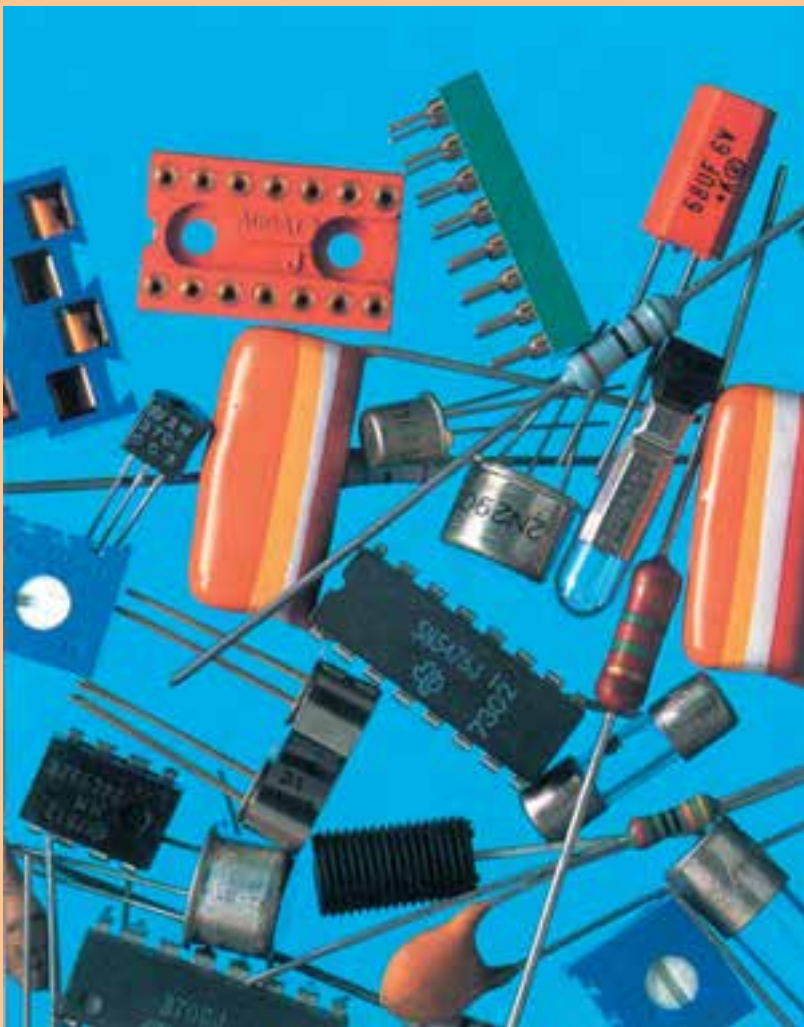
۱۸- در شکل ۵۹-۲، انرژی ذخیره شده

در مجموعه‌ی خازن‌ها را در حالتی که الف - کلید

S باز و ب - کلید S بسته است، حساب کنید.



شکل ۵۹-۲



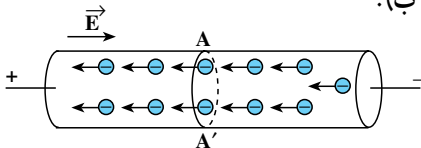
شکل بالا تعدادی از قطعات مورد استفاده در مدارهای الکتریکی و الکترونیکی را نشان می‌دهد.

جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

در فصل دوم، مفهوم‌های بار الکتریکی، میدان الکتریکی و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از میدان الکتریکی را معرفی کردیم و به بررسی پاره‌ای از ویژگی‌های بار الکتریکی ساکن پرداختیم. در این فصل آثار ناشی از حرکت بارهای الکتریکی – یعنی پدیده‌ی شارش بار – در مواد رسانا را بررسی خواهیم کرد و خواهیم دید که شارش بار در رسانا سبب انتقال انرژی در آن می‌شود. این انرژی به انرژی‌های دیگر نظیر انرژی درونی، انرژی مکانیکی و انواع دیگر انرژی تبدیل می‌شود.

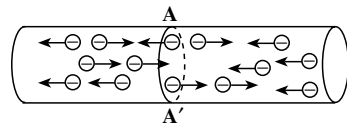
۱-۳- جریان الکتریکی

در فیزیک ۱ دیدیم که رسانایی فلزها به دلیل وجود الکترون‌های آزاد است که در داخل آن‌ها با سرعت‌های متفاوت به طور کاتوره‌ای در حرکت‌اند. تا زمانی که اختلاف پتانسیل الکتریکی به دو سر رسانا اعمال نشده باشد، الکترون‌های آزادی که در بازه‌ی زمانی Δt از مقطع AA' (شکل ۱-۳ الف) از راست به چپ در حرکت‌اند، با الکترون‌های آزادی که در همان بازه‌ی زمانی از همان مقطع از چپ به راست حرکت می‌کنند، برابرند؛ یعنی، به طور متوسط بار خالصی که از مقطع AA' یا هر مقطع عرضی دیگر رسانا می‌گذرد، در یک بازه‌ی زمانی صفر است. هنگامی که دو سر رسانا را به باتری وصل و به این وسیله به دو سر آن اختلاف پتانسیل اعمال می‌کنیم، یک میدان الکتریکی در داخل رسانا ایجاد می‌شود. این میدان به الکترون‌های آزاد درون رسانا نیرو وارد می‌کند و آن‌ها را به خلاف جهت میدان سوق می‌دهد (چرا؟) (شکل ۱-۳ ب).



وقتی در دو سر رسانا اختلاف پتانسیلی اعمال می‌شود، شارش بار خالص از مقطع AA' صفر نیست.

ب



وقتی در دو سر رسانا اختلاف پتانسیل وجود ندارد، شارش بار خالص از مقطع AA' صفر است.

الف

شکل ۱-۳

در این حالت، بار خالصی که از هر مقطع عبور می کند صفر نیست و می گوئیم در رسانا شارش بار وجود دارد. به عبارت دیگر، در آن جریان الکتریکی برقرار شده است.

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که جریان الکتریکی در خلاف جهت شارش الکترون ها است یعنی جریان الکتریکی در جهت میدان الکتریکی است و چون پتانسیل در جهت میدان کاهش می یابد، جهت جریان الکتریکی از پتانسیل بیش تر به پتانسیل کم تر است.

بار شارش شده در واحد زمان را **شدت جریان متوسط** گویند. اگر در بازه ی Δt بار Δq در رسانا شارش کرده باشد، شدت جریان متوسط از رابطه ی زیر به دست می آید :

$$\bar{I} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (۱-۳)$$

همان طور که می دانید، یکای شدت جریان، آمپر نام دارد.

اگر در تمام بازه های زمانی شدت جریان متوسط ثابت بماند، جریان را **مستقیم** می نامند. در این صورت، شدت جریان لحظه ای با شدت جریان متوسط برابر می شود. در این حالت، رابطه ی (۱-۳) به صورت زیر نوشته می شود :

$$I = \frac{q}{t} \quad (۲-۳)$$

در این رابطه، q بار شارش شده در مدت t برحسب کولن و t برحسب ثانیه و I ، شدت جریان برحسب آمپر است.

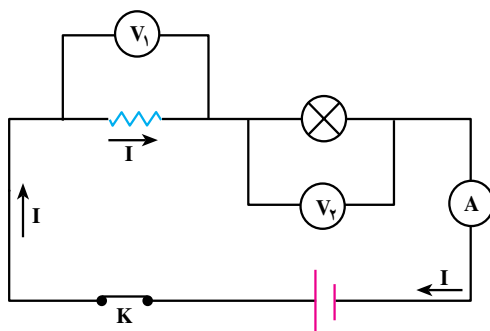
در رابطه ی $q=It$ اگر I برحسب آمپر و t برحسب ساعت باشد، مقدار بار برحسب آمپر ساعت به دست می آید.

فعالیت ۱-۳

بار ذخیره شده در باتری های اتومبیل را معمولاً با آمپر ساعت مشخص می کنند. منظور از این اصطلاح پیشینه ی بار الکتریکی است که در باتری ذخیره می شود. اگر بار الکتریکی باتری یک اتومبیل ۶۰ آمپر ساعت باشد و در مدت ۱۰ ساعت از آن جریان بگیریم، شدت جریان متوسط را برآورد کنید.

برای آن که جریان الکتریکی برقرار شود، باید بار در یک مسیر بسته شارش کند. این مسیر بسته را **مدار الکتریکی** می نامیم. مدارهای الکتریکی ای که در این فصل بررسی می کنیم، شامل رساناهای فلزی (سیم یا لامپ رشته ای)، منبع تأمین انرژی الکتریکی (باتری یا پیل یا منبع تغذیه)، کلید قطع و

وصل، وسیله‌های اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل (آمپرسنج و ولت‌سنج) است. این قطعه‌ها را اجزای مدار الکتریکی می‌نامند و برای رسم هر یک نمادی را به‌طور قراردادی به‌کار می‌برند. شما در کتاب فیزیک ۱ با این نمادها آشنا شده‌اید. شکل ۲-۳ یک مدار الکتریکی و طرز قرار گرفتن آمپرسنج و ولت‌سنج را در این مدار نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳

۲-۳- قانون اهم

همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدید، بنا به قانون اهم نسبت اختلاف پتانسیل دو سر رسانای فلزی به شدت جریانی که از آن می‌گذرد، در دمای ثابت، مقدار ثابتی است. این نسبت را مقاومت الکتریکی رسانا می‌نامند و یکای آن اهم با نماد Ω است.

$$\frac{V}{I} = R \quad (۲-۳)$$

مقاومت را با وسیله‌ای به نام اهم‌سنج اندازه می‌گیرند. این وسیله همراه با ولت‌سنج و آمپرسنج یک دستگاه را تشکیل می‌دهند که آوومتر (AVOmetre) برای آمپر، V برای ولت و O برای اهم نامیده می‌شود.

۳-۳- عوامل مؤثر در مقاومت رساناهای فلزی

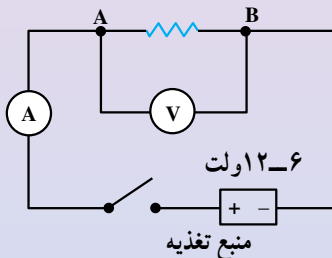
مقاومت یک رسانای فلزی در دمای ثابت به طول، سطح مقطع و جنس آن بستگی دارد. برای بررسی رابطه‌ی مقاومت رسانا با عوامل یاد شده آزمایش ۱-۳ را انجام دهید.

آزمایش ۳-۱

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

۱- در مداری مطابق شکل ۳-۳ بین دو نقطه‌ی A و B قطعه‌ای با طول معین (مثلاً ۱/۵ متر) از سیم تنگستن یا نیکروم را قرار دهید. پس از بستن کلید، اختلاف پتانسیل دو سر سیم و شدت جریانی را که از مدار می‌گذرد، اندازه بگیرید و با استفاده از قانون اهم ($\frac{V}{I} = R$)، مقاومت قطعه سیم را به دست آورید.

در آزمایشی دیگر، از همان سیم تنگستن قطعه‌ای به طول $\frac{1}{4}$ یا $\frac{1}{3}$ طول قبلی را بین دو نقطه‌ی A و B قرار دهید و با اندازه‌گیری V و I مقاومت قطعه‌ی اخیر را به دست آورید. نتیجه را در جدول ثبت کنید.



شکل ۳-۳

۲- آزمایش را با دو قطعه سیم هم طول و با سطح مقطع یکسان یکی از جنس تنگستن و دیگری از جنس نیکروم تکرار کنید و نتیجه را در جدول بنویسید.
- این بار با انجام دادن دو آزمایش با سیم‌های هم طول از یک جنس ولی با سطح مقطع‌های متفاوت، به همان ترتیب، مقاومت هر یک از سیم‌ها را به دست آورید و ارقام را در جدول ثبت کنید.

شماره‌ی آزمایش	جنس سیم	طول سیم l	سطح مقطع سیم A	I	V	$\frac{V}{I} = R$

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

آزمایش ۳-۱ نشان می‌دهد که اگر سطح مقطع سیم در تمام طول آن یکسان باشد، رابطه‌ی مقاومت سیم با سایر ویژگی‌های آن به‌صورت زیر است.

$$R \propto \frac{l}{A} \quad (۳-۴)$$

در این رابطه، ρ مربوط به جنس سیم است و مقاومت ویژه‌ی رسانا نام دارد. مقاومت ویژه‌ی هر فلز، مقاومت قطعه‌ای از آن فلز است به طول یک متر و به سطح مقطع یک مترمربع. l طول سیم برحسب متر و A سطح مقطع سیم برحسب مترمربع است.

تمرین ۳-۱

طول و قطر سیم مسی A دو برابر طول و قطر سیم مسی B است. مقاومت سیم A چند برابر مقاومت سیم B است؟

مقاومت ویژه‌ی پاره‌ای از رساناها – مانند نقره و مس – کم و پاره‌ای دیگر – مانند تنگستن و آهن – نسبتاً زیاد است.

فعالیت ۳-۲

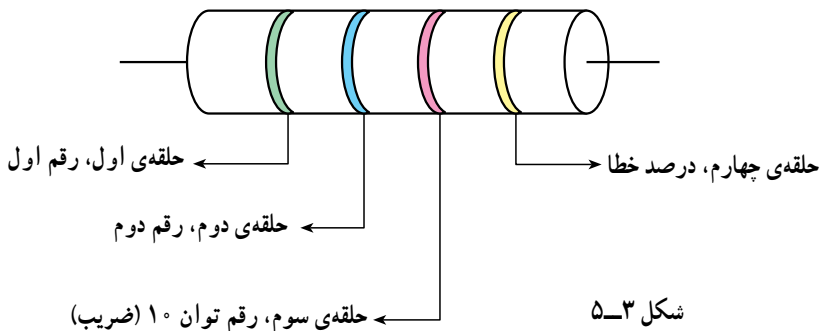
آزمایشی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه‌ی فلز طراحی کنید و توضیح دهید که چگونه می‌توانید دقت اندازه‌گیری را افزایش دهید.

کُدگذاری مقاومت‌ها: مقاومت‌های الکتریکی را برای مصرف‌های مختلف می‌سازند. کارخانه‌های سازنده برای سهولت در تولید، مقاومت‌های خاصی را به‌عنوان استاندارد انتخاب می‌کنند و می‌سازند و با حلقه‌های رنگی که در روی آن‌ها اندازه مقاومت‌ها را مشخص می‌کنند، به هر رنگ عدد خاصی را نسبت می‌دهند. در انتها نیز با یک حلقه‌ی طلایی یا نقره‌ای درصد خطا را مشخص می‌کنند. در این نوع مقاومت‌ها اغلب از کربن هم استفاده می‌شود؛ به این دلیل آن‌ها را **مقاومت کربنی** نیز می‌گویند.



شکل ۳-۴

در روی مقاومت کربنی چهار حلقه‌ی رنگی مشاهده می‌شود (شکل ۳-۵). حلقه‌ی طلایی یا نقره‌ای را سمت راست قرار می‌دهیم و حلقه‌ها را از سمت چپ به ترتیب رقم اول و رقم دوم و سوم نام‌گذاری می‌کنیم. هر رنگ معرف عددی است؛ این اعداد در جدول ۳-۱ آورده شده‌اند. حلقه‌ی اول از سمت چپ رقم اول و حلقه‌ی دوم، رقم دوم مقاومت را نشان می‌دهد. رقم سوم ضریب مقاومت به صورت 10^n است که n در ستون چهارم جدول ۳-۱ داده شده است. حلقه‌ی چهارم درصد خطا را در تعیین مقاومت مشخص می‌کند. به عنوان مثال فرض کنید حلقه‌ی اول قرمز و حلقه‌ی دوم بنفش و حلقه‌ی سوم سیاه است. قرمز معرف عدد ۲ و بنفش معرف عدد ۷ است. تا این‌جا مشخص می‌شود که دو رقم اول مقدار مقاومت مورد نظر ۲۷ است. چون حلقه‌ی سوم سیاه است، $n = 0$ و اندازه‌ی مقاومت 27Ω است.



شکل ۳-۵

به جدول زیر توجه کنید. (حفظ کردن ارقام این جدول ضرورت ندارد.)

جدول ۱-۳

رنگ حلقه	حلقه‌ی اول رقم اول	حلقه‌ی دوم رقم دوم	حلقه‌ی سوم عدد n در ۱۰^n
سیاه	۰	۰	۰
قهوه‌ای	۱	۱	۱
قرمز	۲	۲	۲
نارنجی	۳	۳	۳
زرد	۴	۴	۴
سبز	۵	۵	۵
آبی	۶	۶	۶
بنفش	۷	۷	۷
خاکستری	۸	۸	—
سفید	۹	۹	—

مثال ۱-۳

اندازه‌ی مقاومت زیر چند اهم است؟

حل: با توجه به جدول ۱-۳، رنگ سبز عدد ۵ و رنگ آبی عدد ۶ را نشان می‌دهد

و چون قرمز معرف ۲ است:

$$R = \overline{ab} \times 10^n \rightarrow \text{رقم سوم}$$

\swarrow رقم اول
 \nwarrow رقم دوم



$$R = 56 \times 10^2 = 5600 \Omega$$

شکل ۱-۳-۶

آزمایش ۲-۳

وسیله‌های آزمایش: اهم‌متر، تعدادی مقاومت مختلف

به کمک اعضای گروه خود ابتدا با استفاده از جدول و سپس با به کارگیری اهم‌متر مقاومت ده نمونه از مقاومت‌هایی را که در آزمایشگاه در اختیار شماست، به دست آورید و نتیجه را در جدول قرار دهید.

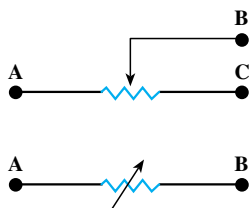
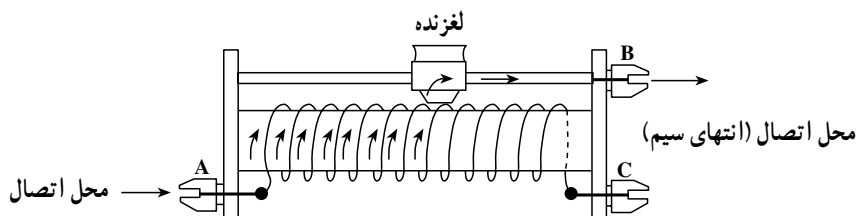
ΔR	R از روی رنگ‌ها	R با استفاده از اهم‌سنج	ردیف

مقاومت‌های کربنی معمولاً با توان کم – بین ۱ تا ۲ وات – کار می‌کنند. اندازه‌های استاندارد آن‌ها نیز عمدتاً به صورت زیر است.

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

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

استفاده از مقاومت متغیر برای کنترل جریان: معمولاً در آزمایشگاه برای تنظیم و کنترل جریان از یک مقاومت متغیر استفاده می‌کنند. این وسیله رُئوستا نام دارد. در شکل ۳-۷ یک رُئوستا را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که می‌بینید، این وسیله از یک سیم دراز با مقاومت ویژه نسبتاً زیاد (تنگستن) تشکیل می‌شود. این سیم روی استوانه‌ای نارسانا پیچیده شده است. با استفاده از یک دکمه‌ی لغزنده که روی ریلی در بالای استوانه قرار دارد و انتهای آن با سیم در تماس است، می‌توان قسمت‌های دلخواه از سیم را در مسیر جریان قرار داده و مقاومت را به دلخواه تغییر داد. به این ترتیب، می‌توان جریان را در مدار کنترل کرد. رُئوستا به صورت‌های دیگری از جمله به شکل دایره‌ای ساخته می‌شود. در این صورت، لغزنده به صورت عقربه‌ای در مرکز دایره قرار می‌گیرد. برای استفاده



شکل ۷-۳

از رئوس تا ابتدا آن را با بیشترین مقدار مقاومت در مدار قرار می‌دهند. سپس با لغزنده، مقاومت مناسب را برای جریان مورد نظر تنظیم می‌کنند.

از جعبه‌ی مقاومت نیز می‌توان به عنوان مقاومت متغیر استفاده کرد. ساختمان این جعبه به گونه‌ای است که با برداشتن فیش مربوط به هریک از مقاومت‌ها، آن مقاومت در مسیر جریان برق قرار می‌گیرد.



شکل ۸-۳



شکل ۹-۳

۴-۳ اثر دما بر مقاومت رساناهای فلزی

تجربه نشان می‌دهد که مقاومت ویژه ی رساناها به دمای آن‌ها بستگی دارد. در رساناهای فلزی افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه و در نتیجه، افزایش مقاومت رسانا می‌شود. اگر افزایش دما زیاد نباشد، رابطه‌ی مقاومت ویژه با افزایش دما به صورت زیر است.

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (5-3)$$

ρ_0 مقاومت ویژه در دمای θ_0 و ρ_T مقاومت ویژه در دمای $\theta_T = \theta_0 + \Delta T$ است. α ضریب دمایی مقاومت ویژه برحسب K^{-1} (بر کلوین) است.

با استفاده از رابطه‌های ۴-۳ و ۵-۳، رابطه‌ی زیر برای مقاومت رسانا به دست می‌آید:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (6-3)$$

جدول ۲-۳ ضریب دمایی و مقاومت ویژه را در دمای $20^\circ C$ برای چند فلز نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳

ضریب دمایی K^{-1}	مقاومت ویژه Ωm	رسانا
۰/۰۰۶۱	$1/59 \times 10^{-8}$	نقره
۰/۰۰۶۸	$1/68 \times 10^{-8}$	مس
۰/۰۰۴۲۹	$2/65 \times 10^{-8}$	آلومینیم
۰/۰۰۴۵	$5/6 \times 10^{-8}$	تنگستن
۰/۰۰۶۵۱	$9/7 \times 10^{-8}$	آهن
۰/۰۰۰۴	100×10^{-8}	آلیاژ کرم و نیکل

مثال ۲-۳

مقاومت سیم مسی به طول $6/28m$ و به قطر $4/^\circ$ میلی‌متر را با استفاده از جدول ۲-۳ در دمای $20^\circ C$ محاسبه کنید.

حل: مساحت مقطع سیم از رابطه‌ی $A = \pi r^2$ به دست می‌آید؛ بنابر رابطه‌ی ۴-۳ می‌توان نوشت:

$$R = \frac{l}{A} = \frac{l}{\pi r^2}$$

$$R = 1/68 \times 10^{-8} \frac{6/28}{3/14(0/2 \times 10^{-3})^2} =$$

$$R = 0/84 \Omega \quad \text{مقاومت سیم}$$

مثال ۳-۳

مقاومت سیمی از آلیاژ کرم و نیکل در دمای 2°C برابر 10Ω است. مقاومت این قطعه در دمای 100°C چه اندازه است؟
حل: بنا به رابطه ی ۳-۶ می توان نوشت:

$$R_T = R_1(1 + \alpha \Delta T)$$

مقاومت در دمای 100°C برابر است با:

$$R_T = 10(1 + 0/0004 \times 80) = 10(1/032) = 10/32 \Omega$$

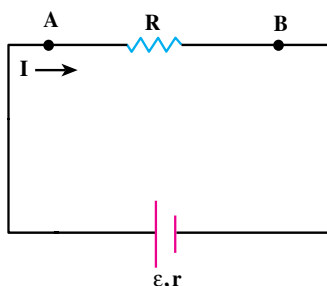
افت پتانسیل در مقاومت: دیدیم که با اعمال اختلاف پتانسیل در دو سر یک رسانا، در درون آن یک میدان الکتریکی برقرار می گردد. این میدان باعث شارش بار می شود. جهت میدان الکتریکی در داخل رسانا از پایانه ی مثبت باتری به طرف پایانه ی منفی آن است.

در فصل قبل، دیدیم که پتانسیل در جهت میدان کاهش می یابد؛ یعنی، وقتی از پایانه ی مثبت باتری به طرف پایانه ی منفی آن می رویم، پتانسیل الکتریکی کاهش می یابد، در این صورت، می گویند که در رسانا افت پتانسیل ایجاد شده است. اگر مقاومت الکتریکی رسانا کوچک باشد، بر طبق قانون اهم این افت پتانسیل ناچیز است؛ مثلاً در بستن مدار از سیم های رابط با مقاومت کم استفاده می کنیم تا بتوانیم از افت پتانسیل در آن ها صرف نظر کنیم ولی هنگامی که یک قطعه با مقاومت قابل توجه در مدار قرار دارد - مانند مقاومت R در شکل ۳-۱ - افت

پتانسیل قابل ملاحظه است و مقدار آن طبق رابطه ی ۳-۳ برابر می شود با:

$$\Delta V = V_B - V_A = IR \quad (3-7)$$

در این رابطه I جریانی است که از مقاومت R می گذرد.



شکل ۳-۱

۳-۵- محاسبه‌ی انرژی الکتریکی مصرف شده در یک مقاومت

در فصل قبل، دیدیم هنگامی که بار مثبت q در جهت میدان الکتریکی یکنواخت حرکت می‌کند، انرژی پتانسیل آن به اندازه‌ی $q\Delta V$ کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، اگر بار q از مقاومت R در شکل ۳-۱ عبور کند، انرژی پتانسیل الکتریکی آن به اندازه‌ی $\Delta U = q\Delta V$ کاهش می‌یابد. این کاهش انرژی صرف افزایش انرژی جنبشی بارها می‌شود. در اثر برخورد آن‌ها با اتم‌ها، این انرژی به اتم‌های رسانا منتقل می‌شود و انرژی درونی رسانا را افزایش می‌دهد. در نتیجه، رسانا در اثر عبور جریان گرم می‌شود. در یک لامپ، بخشی از انرژی پتانسیل الکتریکی به انرژی نورانی و در موتور الکتریکی به انرژی مکانیکی و انرژی درونی تبدیل می‌شود.

اکنون اگر جریان ثابت I در مدت t ثانیه در سیمی به مقاومت R برقرار باشد، بنابراین چه گفته شد، انرژی پتانسیل الکتریکی U که به انرژی درونی رسانا تبدیل می‌شود از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$U = qV \quad (۳-۸)$$

در این رابطه، V اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت R و U انرژی است که بار هنگام عبور از سیم از دست می‌دهد. با جای‌گذاری به جای q و V ، داریم:

$$U = (It)(RI) = RI^2t \quad (۳-۹)$$

مثال ۳-۴

مقاومت سیم گرم‌کن یک اتوی برقی 50Ω و جریانی که از آن می‌گذرد ۴ آمپر است. در مدت ۱۵ دقیقه، چند ژول و چند کیلووات ساعت انرژی الکتریکی در آن مصرف می‌شود؟

حل: بنابر رابطه‌ی ۳-۹ می‌توان نوشت:

$$U = RI^2t \Rightarrow U = 50 \times 16 \times 900$$

$$U = 72 \times 10^4 \text{ ژول}$$

$$U = \frac{72 \times 10^4}{36 \times 10^5} = 0.2 \text{ کیلووات ساعت}$$

فعالیت ۳-۳

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوان درستی رابطه‌ی $U = RI^2t$ را تحقیق کرد.

تمرین ۲-۳

در دو سرب یک سیم نیکروم (آلیاژ کرم و نیکل) به طول ۵ متر و سطح مقطع $\frac{1}{4}$ میلی‌متر مربع، اختلاف پتانسیل ۲۰۰ ولت را برقرار کرده‌ایم. در هر نیم‌ساعت چند کیلوژول انرژی الکتریکی در این سیم به انرژی درونی تبدیل می‌شود؟ مقاومت ویژه‌ی نیکروم $1 \times 10^{-6} \Omega m$ است.

توان الکتریکی مصرف‌شده در یک مقاومت: در فیزیک ۲ و آزمایشگاه خواندید که توان از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید و یکای آن ژول بر ثانیه است که وات نامیده می‌شود.

$$P = \frac{U}{t} \quad (۱۰-۳)$$

بنابر رابطه‌ی ۳-۸ داریم:

$$P = \frac{qV}{t} = VI \quad (۱۱-۳)$$

با استفاده از رابطه‌ی ۳-۳، رابطه‌ی ۳-۱۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (۱۲-۳)$$

$$P = RI^2 \quad (۱۳-۳)$$

فعالیت ۴-۳

با یک اهم‌متر، مقاومت رشته‌ی سیم داخل لامپ ۱۰۰ واتی را اندازه‌گیری کنید.



شکل ۳-۱۱

سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱۲-۳ و با داشتن مشخصات روی لامپ مقاومت آن را محاسبه کنید. نتیجه‌ی محاسبه را با مقدار اندازه‌گیری مقایسه کنید و نتیجه را پس از بحث گروهی گزارش دهید.

فعالیت ۵-۳

با استفاده از نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از فعالیت ۴-۳، دمای رشته‌ی سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشته سیم لامپ از جنس تنگستن است. ضریب دمایی آن را با مراجعه به جدول ۱-۳ به‌دست آورید).

مثال ۵-۳

بر روی یک بخاری برقی رقم‌های ۲۲۰V و ۱۵۰۰W ثبت شده است. الف - این بخاری هنگامی که به ولتاژ ۲۲۰ ولت وصل است، در هر دقیقه چه مقدار انرژی الکتریکی برحسب کیلووات ساعت مصرف می‌کند؟ ب - مقاومت سیم گرم‌کن آن چند اهم است؟

حل: الف - بنا به رابطه‌ی ۱۰-۳ داریم:

$$U = Pt \Rightarrow U = 1500 \times 60 = 9 \times 10^4 \text{ J}$$

$$U = \frac{9 \times 10^4}{3/6 \times 10^6} = \frac{9}{3/6 \times 10^2} = \frac{1}{40} = 0.025 \text{ kWh}$$

ب - با استفاده از رابطه‌ی ۱۲-۳

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow 1500 = \frac{220 \times 220}{R}$$

$$R = \frac{22 \times 22}{15} = 32/26 \Omega$$

آثار تخریبی الکتریسیته بر بدن انسان

بررسی آثار الکتریسیته بر بدن انسان از دو جنبه اهمیت دارد. نخست آن که در بسیاری از موارد در اثر بی‌احتیاطی و یا حادثه‌های پیش‌بینی نشده، افرادی در معرض شوک الکتریکی قرار می‌گیرند، و دیگر اینکه برای برخی از بیماری‌ها می‌توان از شوک الکتریکی به‌عنوان یکی از راه‌های معالجه بهره جست.

تجربه نشان داده است که آثار تخریبی با شدت جریان الکتریکی متناسب است نه با ولتاژ. می‌دانیم که شدت جریان الکتریکی با ولتاژ نسبت مستقیم و با مقاومت الکتریکی نسبت عکس دارد.

در بیشتر موارد در حوادث برق‌گرفتگی، تماس بدن با منبع ولتاژ کامل نیست، و مقاومت الکتریکی زیاد منطقه‌ی تماس باعث می‌شود که شدت جریانی که شارش می‌کند بسیار کوچک باشد. ولی اگر شخصی بر زمین خیس و یا در آب ایستاده باشد و بین نقطه‌ای از بدن او با منبع ولتاژ تماس خوبی برقرار شود، جریان نسبتاً زیادی از بدن وی عبور خواهد کرد. در این صورت حتی اگر ولتاژ کم هم باشد، جریان می‌تواند آن‌قدر زیاد باشد که موجب مرگ شود. از سوی دیگر اگر مقاومت الکتریکی منطقه‌ی تماس زیاد باشد و مثلاً شخصی بر پایه‌های عایق ایستاده باشد، این خطر وجود ندارد. حتی در ولتاژ زیاد هم که جریان مقدار قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند تنها در محل تماس که مقاومت الکتریکی زیاد است گرمای زیادی ایجاد می‌شود و سوختگی‌های سطحی پوستی روی خواهد داد.

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

تمرین ۳-۳

روی یک لامپ الکتریکی رقم‌های $۲۲۰V$ و $۱۰۰W$ ثبت شده است.
الف) انرژی الکتریکی مصرفی این لامپ هنگامی که به ولتاژ ۲۲۰ ولت متصل است، در مدت ۱۰ ساعت چند کیلووات ساعت است؟
ب) اگر این لامپ به اختلاف پتانسیل ۱۸۰ ولت وصل شود، با فرض ثابت ماندن مقاومت توان مصرفی آن چه قدر می‌شود؟

۳-۶- نیروی محرکه‌ی مولد

بارهای الکتریکی ضمن شارش در مدار، انرژی جنبشی‌ای را که به دست آورده‌اند از دست می‌دهند. کارمولد این است که این انرژی را دوباره تأمین کند. همان‌طور که دیدیم، بارهای الکتریکی در رسانا از پتانسیل بالاتر به پتانسیل پایین‌تر شارش می‌کنند و وارد مولد می‌شوند. مولد با صرف انرژی، بارهای الکتریکی را از پتانسیل پایین‌تر به پتانسیل بالاتر سوق می‌دهد و سبب شارش آن‌ها در مدار می‌شود. بارهای الکتریکی هنگام شارش در رسانا، انرژی خود را از دست می‌دهند. برای این که شارش بار در مدار تداوم یابد، این انرژی باید به وسیله‌ی مولد تأمین شود. همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه خواندید، کارمولد در این مورد نظیر کار تلمبه‌ای است که آب را از سطح زمین یا عمق چاه (پتانسیل گرانشی پایین‌تر) تا ارتفاع معینی (پتانسیل گرانشی بالاتر) بالا می‌برد. با این کار، آب انرژی پتانسیل لازم را برای جریان یافتن و به کار انداختن یک پروانه (توربین) کسب می‌کند. تا زمانی که مولد بتواند انرژی لازم را به بارهای الکتریکی بدهد، شارش و در نتیجه، جریان الکتریکی در مدار ادامه می‌یابد.

انرژی‌ای را که مولد به واحد بار الکتریکی (یعنی یک کولن) می‌دهد تا در مدار شارش کند، نیروی محرکه‌ی مولد نامیده می‌شود. اگر مولد انرژی U را به بار q بدهد تا آن را از پایانه‌ی منفی به پایانه‌ی مثبت منتقل کند، بنا به تعریف نیروی محرکه‌ی مولد - که آن را با نماد \mathcal{E} نشان می‌دهیم - می‌توان نوشت:

$$\mathcal{E} = \frac{U}{q} \quad (۱۴-۳)$$

یکای نیروی محرکه ژول بر کولن ($\frac{J}{C}$) است یا ولت^۱ نامیده می‌شود. در نتیجه، انرژی‌ای که مولد به بار q می‌دهد، برابر $\mathcal{E}q$ است.

۱- واژه‌ی ولت به افتخار الکساندر ولتا، سازنده‌ی اولین پیل الکتریکی، انتخاب شده است.

۳-۷- مدارهای تک حلقه

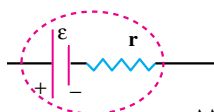
یک مدار الکتریکی ساده‌ی تک حلقه از یک یا چند مولد و یک یا چند مقاومت تشکیل شده است که یکی پس از دیگری به کمک سیم‌های رابط (که بدون مقاومت الکتریکی فرض می‌شوند) به دنبال هم بسته شده‌اند. شدت جریان در تمام قسمت‌های مدار یکسان است.

تمرین ۳-۴

با استفاده از قانون پایستگی بار، توضیح دهید چرا در مدار تک حلقه شدت جریان در همه‌ی قسمت‌های مدار یکسان است؟

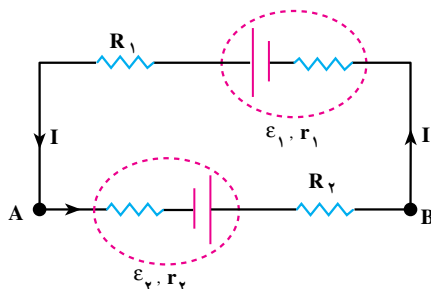
در این بخش، قاعده‌ی کلی برای محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار و محاسبه‌ی شدت جریان مدار را شرح می‌دهیم.

هر مولد دارای مقاومتی است که آن را با نماد (r) نشان می‌دهیم و آن را مقاومت درونی مولد می‌نامیم. در شکل ۳-۱۲ یک مولد به نیروی محرکه‌ی \mathcal{E} و مقاومت درونی r نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲

الف — محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار: شکل ۳-۱۳ یک مدار تک حلقه را نشان می‌دهد. مدار شامل مقاومت‌های R_1 و R_2 و مولدهای \mathcal{E}_1 و \mathcal{E}_2 است.



شکل ۳-۱۳

با توجه به آن چه در بخش های قبل توضیح داده شد، معلوم می شود که تغییر پتانسیل (یعنی کاهش یا افزایش پتانسیل) بین دو نقطه از مدار به جهت جریان و اجزایی که بین آن دو نقطه قرار دارند، بستگی دارد.

در مداری که در شکل ۳-۱۳ می بینید، اگر بار الکتریکی q از نقطه ی A در جهت نشان داده شده حرکت کند، انرژی پتانسیل آن هنگام عبور از باتری به اندازه ی $\varepsilon_1 q$ افزایش و به اندازه ی $IR_1 q$ کاهش می یابد. در عبور از مقاومت R_2 انرژی پتانسیل آن به اندازه ی $IR_2 q$ کاهش می یابد. به همین ترتیب، هنگام عبور از باتری ε_2 افزایش انرژی $\varepsilon_2 q$ و کاهش انرژی $IR_2 q$ را خواهیم داشت. در R_1 انرژی پتانسیل بار q به اندازه ی $IR_1 q$ کاهش می یابد. هنگامی که بار q به نقطه ی A برمی گردد، چون تمام انرژی از دست رفته ی آن توسط باتری ها تأمین شده است، بنا به اصل پایستگی انرژی، باید بار q در این نقطه همان انرژی اولیه را داشته باشد؛ بنابراین،

$$U_A + \varepsilon_2 q - IR_2 q - IR_1 q - IR_1 q + \varepsilon_1 q - IR_1 q = U_A$$

اگر طرفین این رابطه را بر q تقسیم کنیم، رابطه ی زیر به دست می آید.

$$V_A + \varepsilon_2 - IR_2 - IR_1 - IR_1 + \varepsilon_1 - IR_1 = V_A \quad (۱۵-۳)$$

با توجه به رابطه ی ۳-۱۵ دستورالعمل زیر به دست می آید.

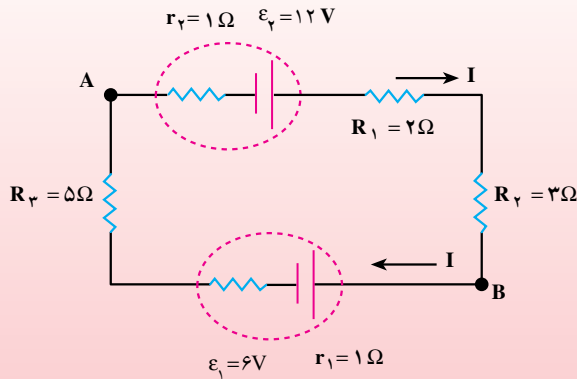
۱- هرگاه روی مدار در جهت جریان از مقاومت R یا r بگذریم، پتانسیل به اندازه ی IR یا Ir کاهش می یابد و اگر در خلاف جهت جریان از مقاومت ها بگذریم، پتانسیل به اندازه ی IR یا Ir افزایش می یابد.

۲- هرگاه برای گذر از مولد (بدون توجه به جهت جریان) از پایانه ی منفی به طرف پایانه ی مثبت بگذریم، پتانسیل به اندازه ی نیروی محرکه ی مولد افزایش می یابد. اگر ضمن گذر از مولد (بدون توجه به جهت جریان) از پایانه ی مثبت به پایانه ی منفی برویم، پتانسیل به اندازه ی نیروی محرکه ی مولد کاهش می یابد.

بنابراین، برای محاسبه ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه از مدار، ابتدا پتانسیل نقطه ی اول (مثلاً V_A) را می نویسیم. آن گاه از این نقطه روی مدار در جهت دلخواه به طرف نقطه ی دوم می رویم و ضمن گذر از هر جزء، تغییر پتانسیل آن جزء را اضافه می کنیم تا به نقطه ی دوم برسیم. حاصل، برابر پتانسیل نقطه ی دوم است.

مثال ۳-۶

در یک مدار تک حلقه مطابق شکل ۳-۱۴ شدت جریان در جهت نشان داده شده 0.5 آمپر است. اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی A و B (یعنی $V_B - V_A$) چه اندازه است؟



شکل ۳-۱۴

حل: اگر در جهت جریان از نقطه‌ی A به سمت نقطه‌ی B جلو رویم، می‌توانیم

بنویسیم:

$$V_A - Ir_r + \epsilon_r - IR_1 - IR_r = V_B$$

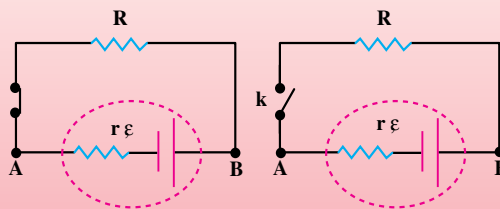
$$-0.5 \times 5 + 12 - 0.5 \times 2 - 0.5 \times 3 = V_B - V_A$$

$$V_B - V_A = 9 \text{ ولت}$$

مثال ۳-۷

در مدار شکل ۳-۱۵ اختلاف پتانسیل دو سر مولد را در دو حالت زیر حساب کنید.
الف) کلید k باز است.

ب) کلید k بسته است و جریان I از مدار می‌گذرد.



شکل ۳-۱۵

حل: الف) در حالتی که کلید باز است، $I = 0$ و داریم:

$$V_A - 0 \times r + \mathcal{E} = V_B$$

$$V_B - V_A = \mathcal{E}$$

ب) اگر از نقطه‌ی A در جهت جریان به سمت B جلو برویم، می‌توانیم بنویسیم:

$$V_A - Ir + \mathcal{E} = V_B$$

$$V_B - V_A = \mathcal{E} - Ir$$

اختلاف پتانسیل دو سر مولد

همان‌طور که در بند الف مثال ۷-۳ دیدید، در حالتی که جریان از مولد نگذرد ($I = 0$) اختلاف پتانسیل دو سر مولد با نیروی محرکه مولد برابر است؛ بنابراین، نیروی محرکه‌ی مولد برابر اختلاف پتانسیل دو سر مولد است وقتی که جریانی از آن نگذرد.

می‌دانیم که ولت‌سنج وسیله‌ای است با مقاومت زیاد؛ بنابراین، اگر پایانه‌های یک مولد را فقط به دو سر یک ولت‌سنج ببندیم، چون عملاً جریانی برقرار نمی‌شود، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد، برابر نیروی محرکه‌ی مولد است. از طرفی، در بند ب مثال ۷-۳ دیدید که وقتی جریان I از مولد می‌گذرد، اختلاف پتانسیل دو سر مولد به اندازه‌ی Ir از نیروی محرکه‌ی مولد کم‌تر است. Ir افت پتانسیل در مولد است.

فعالیت ۷-۳

وقتی باتری اتومبیل فرسوده می‌شود، مقاومت درونی آن افزایش می‌یابد. چرا این باتری نمی‌تواند اتومبیل را روشن کند.

فعالیت ۷-۳

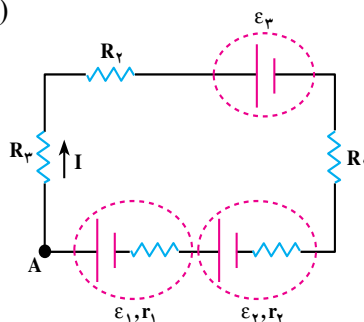
می‌دانیم که نیروی محرکه‌ی یک باتری اتومبیل ۱۲ ولت و نیروی محرکه‌ی هر باتری قلمی ۱/۵ ولت است. به نظر شما، اگر ۸ باتری قلمی را به‌طور متوالی به هم وصل کنیم (یعنی پایانه‌ی مثبت یکی را به‌طور پی‌در پی به پایانه‌ی منفی دیگری وصل کنیم) تا نیروی محرکه‌ی کل آن‌ها ۱۲ ولت شود، آیا با این مجموعه می‌توان اتومبیل را روشن کرد؟ چرا؟

ب — محاسبه‌ی شدت جریان: برای محاسبه‌ی شدت جریان در یک مدار تک حلقه، ابتدا برای جریان جهت دلخواهی انتخاب می‌کنیم و سپس با توجه به دو قاعده‌ای که برای اختلاف پتانسیل گفته شد، از یک نقطه روی مدار شروع می‌کنیم و تغییر پتانسیل دو سر هر یک از اجزای مدار را می‌نویسیم تا دوباره به نقطه‌ی شروع برسیم. از رابطه‌ای که به این ترتیب به دست می‌آید، می‌توان شدت جریان را محاسبه کرد. برای مثال، در مدار شکل ۱۶-۳ برای محاسبه‌ی جریان، ابتدا جریان را در جهت نشان داده شده انتخاب می‌کنیم و سپس از نقطه‌ی A روی مدار در جهت جریان جلو می‌رویم. به این ترتیب، خواهیم داشت:

$$V_A - IR_3 - IR_2 - \varepsilon_3 - IR_1 - Ir_2 - \varepsilon_2 - Ir_1 = V_A$$

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_3 - I(R_3 + R_2 + R_1 + r_2 + r_1)$$

$$I = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{R_3 + R_2 + R_1 + r_2 + r_1}$$



شکل ۱۶-۳

با این روش، اگر جریان به دست آمده مثبت باشد، معلوم می‌شود که جهت انتخاب شده درست است و اگر جریانی که به دست می‌آید منفی باشد، معلوم می‌شود جهت جریان در مدار خلاف جهت انتخاب شده است.

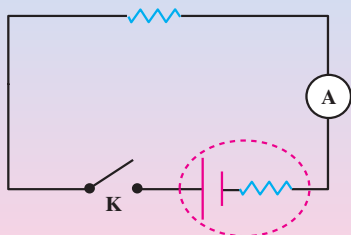
آزمایش ۳-۳

اندازه‌گیری مقاومت درونی مولد

وسایلهای آزمایش: باتری ۹ ولت، ولت‌سنج، آمپرسنج و یک مقاومت، کلید

قطع و وصل.

۱- مدار را مطابق شکل ۱۷-۳ ببندید.



شکل ۱۷-۳

۲- در حالتی که کلید باز است، اختلاف پتانسیل دو سر باتری را با ولت‌سنج اندازه بگیرید.

۳- کلید را وصل کنید و در این حالت، شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر باتری را بخوانید. به کمک این دو آزمایش، با استفاده از رابطه‌ای که در مثال ۳-۷ برای اختلاف پتانسیل دو سر مولد به دست آمد، مقاومت درونی باتری را محاسبه کنید.

توان مولد: با توجه به رابطه‌ی ۳-۱۴ در بخش ۳-۶ اگر جریانی که از مولد می‌گذرد I باشد، داریم:

$$U = \mathcal{E} - I r \quad (۳-۱۶)$$

از آن جا توان تولیدشده به وسیله‌ی مولد از رابطه‌ی ۳-۱۷ به دست می‌آید.

$$P = \frac{U}{t} = \mathcal{E} I - I^2 r \quad (۳-۱۷)$$

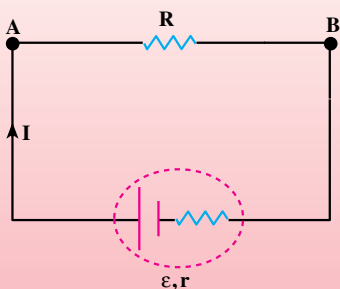
بخشی از این توان تولیدی به دلیل مقاومت درونی مولد، در درون مولد مصرف می‌شود، که بنا به آن چه در مورد توان مصرفی در یک مقاومت دیدیم، این مقدار برابر $I^2 r$ است؛ بنابراین، توان مفید مولد (یا توان خروجی) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$P = \mathcal{E} I - I^2 r \quad (۳-۱۸)$$

مثال ۳-۸

دوسر مقاومت $3/5$ اهمی را به یک باتری به نیروی محرکه‌ی \mathcal{E} و مقاومت درونی 1Ω بسته ایم. شدت جریان در مدار $2A$ شده است.

الف) اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت و توان مصرف شده در آن را حساب کنید.



شکل ۳-۱۸

ب) نیروی محرکه‌ی مولد و توان تولیدی آن چه اندازه است؟

حل: الف) با توجه به شکل ۳-۱۸ می‌توان نوشت:

اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت

$$V_A - IR = V_B \Rightarrow V_A - V_B = IR = 2 \times 3 / 5 = 1.2 \text{ V}$$

$$P = RI^2 \Rightarrow P = 3 / 5 \times 4 = 2.4 \text{ W} \quad \text{توان مصرفی در مقاومت}$$

$$V_A - IR - Ir + \mathcal{E} = V_A \quad \text{ب)}$$

$$-2 \times 3 / 5 - 2 \times 1 + \mathcal{E} = 0 \Rightarrow \mathcal{E} = 1.4 \text{ V} \quad \text{نیروی محرکه‌ی مولد}$$

$$P = \mathcal{E} I \Rightarrow P = 1.4 \times 2 = 2.8 \text{ W} \quad \text{توان تولیدی مولد}$$

تمرین ۳-۵

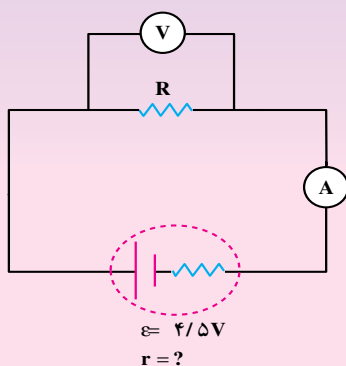
در مدار شکل ۳-۱۹ آمپرسنج $5/4 \text{ A}$ و ولت‌سنج 4 V را نشان می‌دهد.

الف) مقاومت R را محاسبه کنید.

ب) توان مصرف شده در مقاومت R و توان تولیدی مولد را محاسبه کنید.

پ) افت پتانسیل در مولد را محاسبه کنید.

ت) مقاومت درونی مولد را محاسبه کنید.

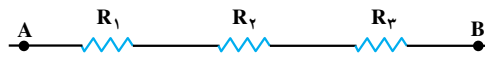


شکل ۳-۱۹

۳-۸- به هم بستن مقاومت‌ها

در مدارهای الکتریکی متداول معمولاً مقاومت‌ها به صورت‌های متفاوت به هم متصل می‌شوند. برخی از این مدارها می‌توانند بسیار پیچیده باشند. در ادامه به بررسی دو نوع ساده‌ی به هم بستن مقاومت‌ها می‌پردازیم. اکثر مدارهای پیچیده را می‌توانیم با استفاده از روابطی که برای دو نوع به هم بستن ساده‌ی زیر به دست می‌آوریم، بررسی کنیم.

الف- به هم بستن متوالی مقاومت‌ها: در این روش، مقاومت‌ها مطابق شکل ۳-۲۰ به هم بسته می‌شوند و در مدار قرار می‌گیرند.



شکل ۳-۲۰

در به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور متوالی، هر مقاومت با مقاومت بعدی در یک سر مشترک است. اگر دو سر A و B را به اختلاف پتانسیل ثابتی ببندیم، جریان I از هر یک از مقاومت‌ها می‌گذرد. با توجه به شکل ۳-۲۰ و روش محاسبه‌ی اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در مدار تک حلقه می‌توان نوشت:

$$V_A - IR_1 - IR_2 - IR_3 = V_B \quad (۳-۱۹)$$

و از آن‌جا خواهیم داشت:

$$V_A - V_B = IR_1 + IR_2 + IR_3 \quad (۳-۲۰)$$

مقاومت معادل هر مجموعه از این مقاومت‌ها مقاومتی است که اگر به‌جای آن‌ها به همان اختلاف پتانسیل $V_A - V_B$ وصل شود، همان شدت جریان از آن عبور کند؛ بنابراین، اگر مقاومت معادل این مجموعه را R بگیریم، خواهیم داشت:

$$V_A - V_B = IR \quad (۳-۲۱)$$

$$IR_1 + IR_2 + IR_3 = IR \quad (۳-۲۲)$$

یا:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (۳-۲۳)$$

بدیهی است که اگر به‌جای سه مقاومت، n مقاومت متوالی داشته باشیم، مقاومت معادل آن‌ها از رابطه‌ی ۳-۲۳ به دست می‌آید.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (۳-۲۳)$$

مثال ۹-۳

مقاومت‌های $R_1 = 2\Omega$ و $R_2 = 4\Omega$ و $R_3 = 1\Omega$ و $R_4 = 3\Omega$ را به‌طور متوالی به هم بسته‌ایم.

الف - مقاومت معادل مجموعه‌ی مقاومت‌ها را حساب کنید. اگر این مجموعه از مقاومت‌ها را به دو سر مولدی به نیروی محرکه‌ی ۶ ولت و مقاومت درونی ناچیز ببندیم، شدت جریان در مدار چه قدر می‌شود؟

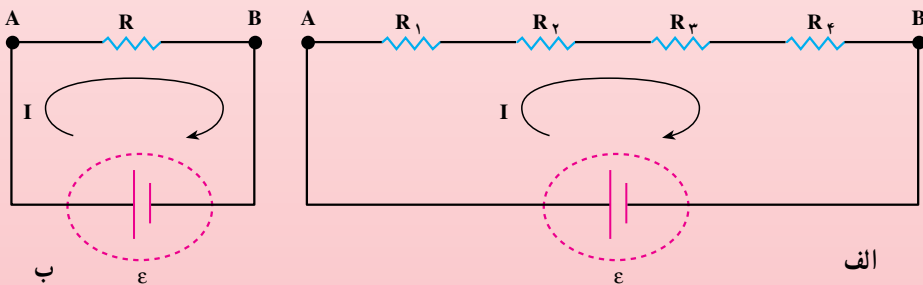
ب - توان مصرفی هر یک از مقاومت‌ها و مجموع توان مصرفی هر مقاومت و توان مصرفی کل را محاسبه و با هم مقایسه کنید.
حل: الف - بنا به رابطه‌ی ۲۳-۳ داریم:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R = 2 + 4 + 1 + 3 = 10\Omega$$

مقاومت معادل

در شکل ۲۱-۳ الف و ب به ترتیب به هم بستن مقاومت‌های متوالی را به باتری و قرار گرفتن مقاومت معادل را به جای آن‌ها مشاهده می‌کنید.



شکل ۲۱-۳

در این حالت، بنا به آنچه در مورد مدارهای تک حلقه گفتیم، شدت جریان مدار

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \Rightarrow I = \frac{6}{10} = 0.6A \text{ است.}$$

ب -

$$P_1 = R_1 I^2 \rightarrow P_1 = 2 \times 0.36 = 0.72W$$

$$P_2 = 4 \times 0.36 = 1.44W$$

$$P_3 = 1 \times 0.36 = 0.36W$$

$$P_4 = 3 \times 0 / 36 = 1 / 0.8 \text{ W}$$

$$P = RI^2 \Rightarrow P = 10 \times 0 / 36 = 3 / 6 \text{ W}$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 0 / 72 + 1 / 44 + 0 / 36 + 1 / 0.8 = 3 / 6 \text{ W}$$

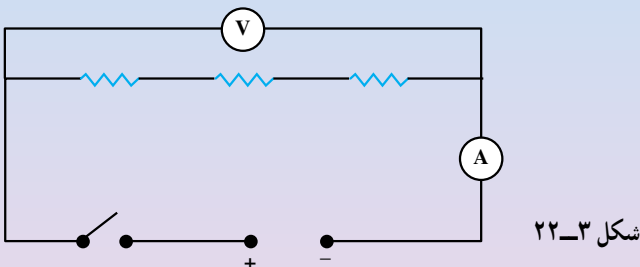
بنابراین توان مصرفی کل برابر مجموع توان مصرفی مقاومت‌هاست.

تمرین ۳-۶

می‌خواهیم تعدادی لامپ ۱۲ ولتی و ۲۶ وات را با برق ۱۸۰ ولت روشن کنیم. چند عدد از این لامپ‌ها را به‌طور متوالی به هم بیندیم تا بدون آن‌که بسوزند، توان مصرفی هر کدام همان ۲۶ وات باشد؟

آزمایش ۳-۴

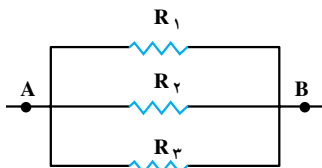
وسایله‌های لازم: چند مقاومت $1/7\Omega$ ، 12Ω ، 10Ω و 15Ω ، سیم رابط، ولت‌سنج، آمپرسنج، کلید قطع و وصل، منبع تغذیه و اهم‌متر.
۱- ابتدا سه یا چهار مقاومت را به‌طور متوالی به هم بیندید و پس از آن با این مقاومت‌ها مدارهای مطابق شکل ۳-۲۲ ترتیب دهید.



شکل ۳-۲۲

۲- با اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه‌ی مقاومت‌ها از رابطه‌ی $R = \frac{V}{I}$ مقاومت معادل را اندازه‌گیری کنید و پس از آن، با استفاده از اهم‌متر، مقاومت معادل مجموعه‌ی مقاومت‌ها را اندازه‌گیری کنید. نتیجه را با آن‌چه از رابطه‌ی $R = \frac{V}{I}$ به‌دست آورده‌اید، مقایسه نمایید.

ب — به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی: شکل ۲۳-۳ سه مقاومت را نشان می‌دهد که بین دو نقطه‌ی A و B به‌طور موازی به هم بسته شده‌اند.

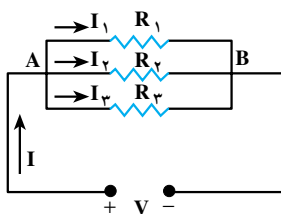


شکل ۲۳-۳

در به هم بستن موازی مقاومت‌ها یک سر همه‌ی مقاومت‌ها به یک نقطه (مثلاً نقطه‌ی A) و سر دیگر همه‌ی آن‌ها نیز به یک نقطه (مثلاً نقطه‌ی B) بسته شده است. در این حالت، اگر دو سر مجموعه مطابق شکل ۲۴-۳ به اختلاف پتانسیل V وصل شود، جریان الکتریکی در هر یک از مقاومت‌ها برقرار می‌گردد. بنابراین پایستگی بار، باید شدت جریان در شاخه‌ی اصلی با مجموع شدت جریان‌هایی که در هر یک از مقاومت‌ها برقرار شده است، برابر باشد.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

(۲۴-۳)



شکل ۲۴-۳

فعالیت ۸-۳

آزمایشی را طراحی کنید که درستی رابطه‌ی ۲۴-۳ را نشان دهد.

در به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی چون یک سر مقاومت‌ها به نقطه‌ی A و سر دیگر به نقطه‌ی B وصل است بنابراین ولتاژ یک سر همه مقاومت‌ها V_A و سر دیگر V_B است. به عبارت دیگر، در این حالت اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت‌های موازی یکسان است؛ بنابراین، براساس قانون اهم می‌توان نوشت:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \text{ و } I_2 = \frac{V}{R_2} \text{ و } I_3 = \frac{V}{R_3} \quad (۲۵-۳)$$

اگر مقاومت معادل این مقاومت‌های موازی را با R نشان دهیم، برای مقاومت معادل آن‌ها نیز داریم:

$$I = \frac{V}{R} \quad (26-3)$$

از رابطه‌های $24-3$ و $25-3$ و $26-3$ نتیجه می‌شود:

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

یا:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (27-3)$$

بنابراین، در به هم بستن مقاومت‌ها به‌طور موازی، وارون مقاومت معادل برابر مجموع وارون مقاومت‌هاست.

تمرین ۷-۳

نشان دهید وقتی دو مقاومت به‌طور موازی به یک‌دیگر وصل شوند، نسبت شدت جریان‌های آن‌ها به نسبت وارون مقاومت‌هاست.

مثال ۱۰-۳

مقاومت‌های $R_1 = 6\Omega$ و $R_2 = 4\Omega$ و $R_3 = 12\Omega$ و $R_4 = 6\Omega$ را به‌طور موازی به هم می‌بندیم و در دو سر آن‌ها اختلاف پتانسیل ۱۵ ولت برقرار می‌کنیم.

الف - مقاومت معادل و شدت جریان کل را به‌دست آورید.

ب - شدت جریان را در هر یک از مقاومت‌ها حساب کنید.

پ - توان مصرفی هر مقاومت و توان مصرفی کل را محاسبه کنید.

حل: الف - برای محاسبه‌ی مقاومت معادل بنا به رابطه‌ی $27-3$ داریم:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{6} + \frac{1}{4} + \frac{1}{12} + \frac{1}{6} = \frac{2+3+1+2}{12} = \frac{8}{12}$$

$$R = \frac{12}{8} = 1.5 \Omega \quad \text{مقاومت معادل}$$

$$\text{شدت جریان کل از رابطه ی } I = \frac{V}{R} \text{ به دست می آید.}$$

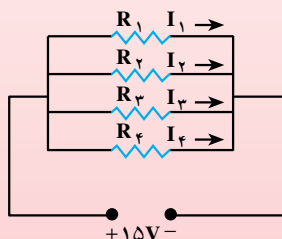
$$I = \frac{15}{1.5} = 10 \text{ A} \quad \text{شدت جریان کل}$$

ب- با توجه به شکل ۲۵-۳ برای محاسبه ی شدت جریان در هر یک از مقاومت ها، می توان نوشت:

$$V = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_4 R_4$$

$$I_1 = \frac{15}{6} = 2.5 \text{ A} \text{ و } I_2 = \frac{15}{4} = 3.75 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{15}{12} = 1.25 \text{ A} \text{ و } I_4 = \frac{15}{6} = 2.5 \text{ A}$$



شکل ۲۵-۳

همان طور که می بینید، شدت جریان به نسبت وارون مقاومت ها توزیع شده است.
بنا به رابطه ی ۱۱-۳ داریم:

$$P = VI$$

$$P_1 = 15 \times 2.5 = 37.5 \text{ W} \text{ و } P_2 = 15 \times 3.75 = 56.25 \text{ W}$$

$$P_3 = 15 \times 1.25 = 18.75 \text{ W} \text{ و } P_4 = 15 \times 2.5 = 37.5 \text{ W}$$

برای محاسبه ی توان کل با استفاده از مقاومت معادل می توان نوشت:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{225}{1.5} = 150 \text{ W}$$

همان طور که پیش تر هم دیدیم، برای محاسبه ی توان کل می توانستیم توان مصرفی در مقاومت ها را با هم جمع کنیم.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 37.5 + 56.25 + 18.75 + 37.5 = 150 \text{ W}$$

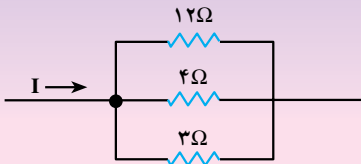
تمرین ۳-۱

در شکل ۳-۲۶ قسمتی از یک مدار را مشاهده می کنید. اگر توان مصرفی در

مقاومت ۱۲ اهمی ۳ وات باشد، شدت جریان

در مقاومت های ۴Ω و ۳Ω و شدت جریان کل

چه قدر است؟



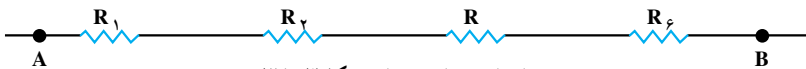
شکل ۳-۲۶

در مواردی ممکن است تعدادی از مقاومت ها به طور متوالی و تعدادی دیگر به صورت موازی به هم بسته شده باشند. در شکل ۳-۲۷ تعدادی مقاومت شامل مقاومت های موازی (R_4 و R_5) و (R_3) را مشاهده می کنید که با سه مقاومت R_1 و R_2 و R_6 به طور متوالی بسته شده اند. در این موارد که مقاومت ها شامل مجموعه ای موازی و متوالی است، برای محاسبه ی مقاومت معادل مجموعه، می توان به جای مقاومت های موازی در هر قسمت معادل آن ها را قرار داد و پس از آن، مقاومت معادل مجموعه ی متوالی را محاسبه کرد.

در شکل ۳-۲۷ اگر مقاومت معادل R_3 و R_4 و R_5 برابر R باشد، به جای مقاومت های شکل می توان مجموعه ی مقاومت های شکل ۳-۲۸ را نشان داد.



شکل ۳-۲۷



جانشانی مقاومت های شکل ۳-۲۷

شکل ۳-۲۸

به همین ترتیب، به جای مقاومت های شکل ۳-۲۸ می توان مقاومت معادل آن ها را مطابق شکل

۳-۲۹ نشان داد.



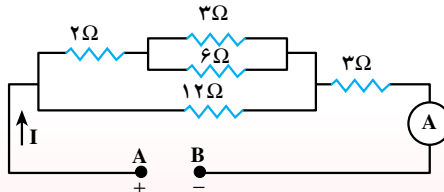
شکل ۳-۲۹

$$R' = R_1 + R_2 + R + R_6$$

R' مقاومت معادل مقاومت های شکل ۳-۲۷ است.

مثال ۳-۱۱

در مدار شکل ۳-۳ اختلاف پتانسیل بین دو نقطه‌ی A و B، ۲۴ ولت است. شدت جریانی را که آمپرسنج (A) نشان می‌دهد، چند آمپر است؟



شکل ۳-۳

حل: برای محاسبه‌ی شدت جریان کل، نخست با اعمال ساده‌سازی‌های نشان داده شده در شکل‌های ۳-۳۱ الف تا ت مدار معادل شکل ۳-۳ را به‌دست می‌آوریم.

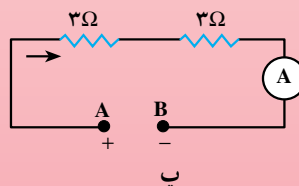
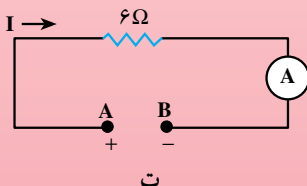
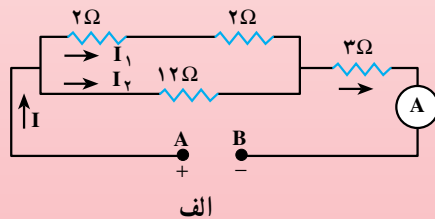
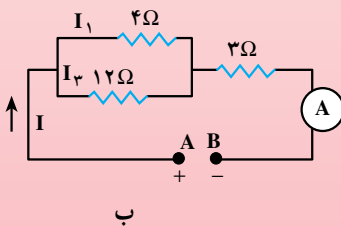
الف - مقاومت معادل دو مقاومت موازی 3Ω و 6Ω برابر 2Ω است.

ب - مقاومت معادل دو مقاومت متوالی 2Ω و 2Ω برابر 4Ω است.

پ - مقاومت معادل دو مقاومت موازی 4Ω و 12Ω برابر 3Ω است.

ت - مقاومت معادل دو مقاومت متوالی 3Ω و 3Ω ، یعنی مقاومت معادل مدار شکل ۳-۳، برابر 6Ω است. در این حالت، شدت جریانی که آمپرسنج نشان می‌دهد،

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{6} = 4A \text{ است.}$$

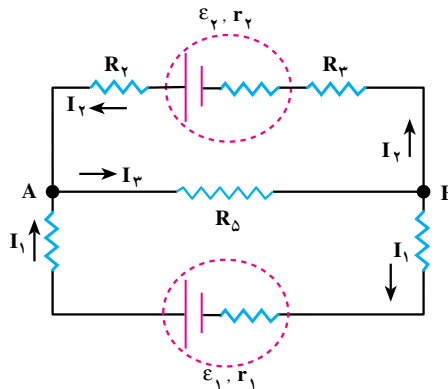


شکل ۳-۳۱

۳-۹- قانون کیرشهف

در مثال‌های ۳-۹، ۳-۱۰ و ۳-۱۱ با استفاده از مقاومت معادل، مدار را ساده کردیم و پاسخ مورد نظر را به دست آوردیم. این روش ساده‌سازی همواره قابل استفاده نیست. به‌ویژه در مدارهایی که شامل باتری‌های متعددی است. این گونه مدارها را می‌توان با به کار بردن قانون‌هایی که در همه‌ی مدارها به کار می‌روند و به قانون‌های کیرشهف معروف‌اند، بررسی کرد. این قانون‌ها عبارت‌اند از:

الف- قانون شدت جریان‌ها: مجموع جریان‌هایی که به هر گره (یعنی نقطه‌ای که اجزای مدار در آن نقطه به هم متصل شده‌اند) می‌رسند، برابر مجموع جریان‌هایی است که از آن نقطه خارج می‌شوند (این قاعده از اصل پایستگی بار نتیجه می‌شود). در شکل ۳-۳۲، I_1 و I_2 به نقطه‌ی A وارد و I_3 از آن نقطه خارج می‌شود یا I_3 به نقطه‌ی B وارد و I_1 و I_2 از آن نقطه خارج می‌شوند. اگر P گره در مدار وجود داشته باشد، این قانون را برای P-۱ گره می‌توان نوشت:



شکل ۳-۳۲

بنا به قانون شدت جریان‌ها

$$I_3 = I_1 + I_2$$

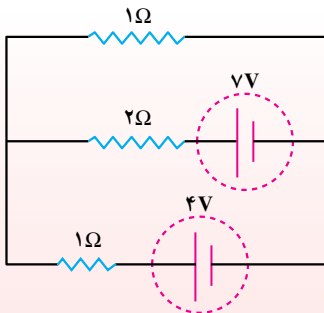
ب- قانون اختلاف پتانسیل‌ها: در هر حلقه یا هر مدار بسته، مجموع جبری اختلاف پتانسیل‌ها صفر است. در به کار بردن این قانون باید نکته‌های زیر را رعایت کرد.

- ۱- همان‌طور که در بخش ۳-۶ در مورد مدار تک حلقه دیدیم، اگر جهت جریان در مدار مشخص نباشد، جهتی را برای جریان انتخاب می‌کنیم و همان روش را برای حلقه‌ی موردنظر به کار می‌بریم.
- ۲- اگر n شاخه در مدار وجود داشته باشد، برای حل مدار به n معادله نیاز داریم و برای نوشتن معادله‌ها به تعداد لازم حلقه در نظر می‌گیریم.

در مثال‌هایی که در ادامه می‌آید، با کاربردهای این قانون‌ها در حل مسئله‌ها آشنا می‌شوید.

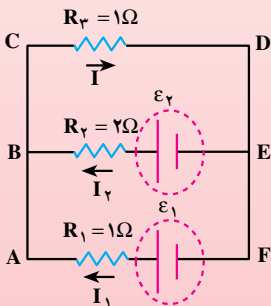
مثال ۱۲-۳

در مدار شکل ۳-۳۳ شدت جریان را در هر یک از مقاومت‌ها حساب کنید (مقاومت درونی مولدها ناچیز است).



شکل ۳-۳۳

حل: ابتدا برای هر شاخه، جریانی در جهت دلخواه مطابق شکل ۳-۳۴ انتخاب می‌کنیم. با توجه به تعریف گره – همان‌طور که در شکل ۳-۳۴ دیده می‌شود – دو گره در این مدار وجود دارد (نقطه‌های B و E).



شکل ۳-۳۴

در این صورت، بنا به قانون شدت جریان‌ها بین شدت جریان‌ها رابطه‌ای به صورت زیر برقرار است.

$$I = I_1 + I_2 \quad (1)$$

بنا به قانون اختلاف پتانسیل‌ها در حلقه‌ی (مسیر بسته) CDEFAC (شامل R_3 و

ϵ_1 و R_1) می‌توان نوشت:

$$-IR_3 - \epsilon_1 - I_1R_1 = 0 \quad (2)$$

در حلقه‌ی CDEBC (شامل R_2 و ϵ_2 و R_3) نیز می‌توان نوشت:

$$-IR_3 - \epsilon_2 - I_2R_2 = 0 \quad (3)$$

از سه معادله ی ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب I_1 و I_2 و I را به دست می آوریم. برای حل کردن این معادله ها، در معادله های ۲ و ۳ به جای I مساوی آن - یعنی $I_1 + I_2$ - را قرار می دهیم. در نتیجه، خواهیم داشت :

$$\begin{cases} -2I_1 - I_2 = 4 \\ -I_1 - 3I_2 = 7 \end{cases}$$

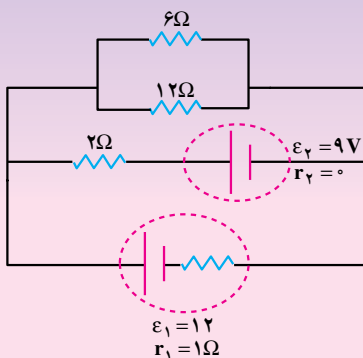
و از آن جا نتیجه می شود :

$$I_2 = 2A \text{ و } I_1 = 1A$$

$$I = I_1 + I_2 = 2 + 1 = 3A$$

تمرین ۳-۹

در مدار شکل ۳-۳۵ شدت جریان را در هر شاخه محاسبه کنید.



شکل ۳-۳۵

مثال ۳-۱۳

در مدار شکل ۳-۳۶ شدت جریان در هر شاخه چند آمپر است؟

حل: در حلقه ی ۱ بنا به قاعده ی پتانسیل ها می توان نوشت :

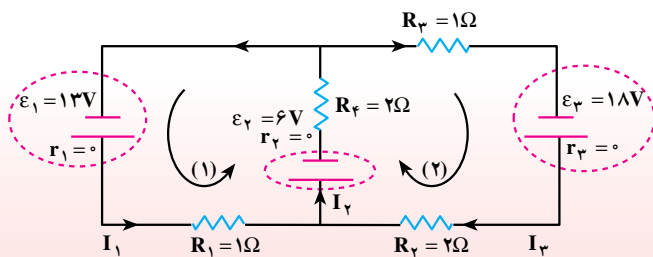
$$-I_1 R_1 - \epsilon_2 - I_2 R_2 + \epsilon_1 = 0$$

در حلقه ی ۲ می توان نوشت :

$$-I_3 R_3 - \epsilon_2 - I_2 R_2 - I_1 R_1 + \epsilon_3 = 0$$

و بنا به قاعده ی شدت جریان ها

$$I_2 = I_1 + I_3$$



شکل ۳-۳۶

یا :

$$\begin{cases} -1 \times I_1 - 6 - 2 \times I_\gamma + 13 = 0 \\ -2 \times I_3 - 6 - 2I_\gamma - 1 \times I_3 + 18 = 0 \end{cases}$$

$$-I_1 - 6 - 2(I_1 + I_3) + 13 = 0 \Rightarrow 3I_1 - 2I_3 + 7 = 0$$

$$-2I_3 - 6 - 2(I_1 + I_3) - I_3 + 18 = 0 \Rightarrow 2I_1 - 5I_3 + 12 = 0$$

از حل دو معادله‌ی اخیر نتیجه می‌شود :

$$I_3 = 2A \text{ و } I_\gamma = 3A \text{ و } I_1 = 1A$$

مثال ۳-۱۴

شکل ۳-۳۷ قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد. $V_A - V_B$ را حساب کنید.

حل: همان‌طور که در شکل ۳-۳۷ دیده می‌شود I_1 و I_γ به نقطه‌ی A نزدیک و

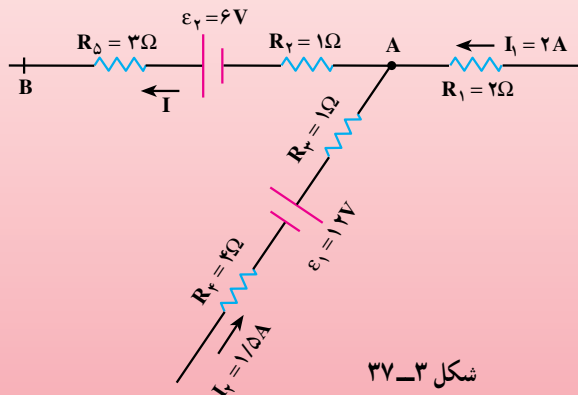
از آن نقطه دور می‌شود بنابراین :

$$I = I_1 + I_\gamma = 2 + 1 = 3 / 5A$$

$$V_A - IR_\gamma + \varepsilon_\gamma - IR_\delta = V_B$$

از طرفی

$$V_A - V_B = 3 / 5 \times 1 - 6 + 3 / 5 \times 3 = 8V$$



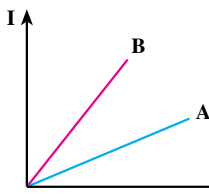
شکل ۳-۳۷

تمرین های فصل سوم

۱- شارش بار در هر مقطع رسانا را هنگام اعمال میدان الکتریکی در دو سر رسانا و موقع عدم حضور میدان مقایسه کنید. تغییر دما در هر یک از این وضعیت ها چه اثری بر آهنگ شارش بار دارد؟
 ۲- مناسب ترین ولت سنج برای اندازه گیری اختلاف پتانسیل در یک مدار چه ویژگی ای باید داشته باشد؟ اگر ولت سنج مناسب نباشد، آن چه اندازه گیری می شود با اندازه ی واقعی چه تفاوتی دارد؟ سؤال بالا را در مورد آمپر سنج مناسب هم بررسی کنید.

۳- قانون اهم رابطه ی مقاومت را با شدت جریان و ولتاژ بیان می کند $R = \frac{V}{I}$. توضیح دهید اگر ولتاژ افزایش یا کاهش یابد مقدار R تغییر می کند؟

۴- اختلاف پتانسیل دو سر باتری اتومبیل های سواری برابر ۱۲ ولت است. اگر ۸ باتری قلمی ۱/۵ ولتی را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه ی آن ها نیز برابر ۱۲ ولت می شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از ۸ باتری قلمی استفاده نمی شود.

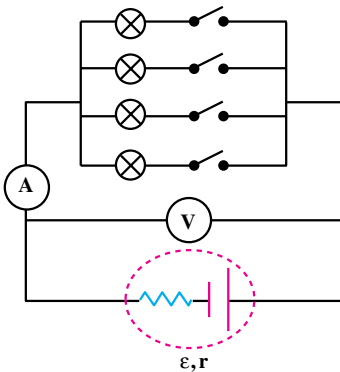


۵- شکل ۳-۳۸ نمودار $I-V$ را برای دو نوع رسانا نشان می دهد. مقاومت کدام یک بیش تر است؟

شکل ۳-۳۸

۶- نمودار تغییرات ولتاژ دوسر مولد را بر حسب شدت جریانی که از آن می گذرد به طور کیفی رسم کنید.

۷- لامپ های یک درخت زینتی، به طور متوالی متصل شده اند. اگر یکی از لامپ ها بسوزد، چه اتفاقی می افتد؟

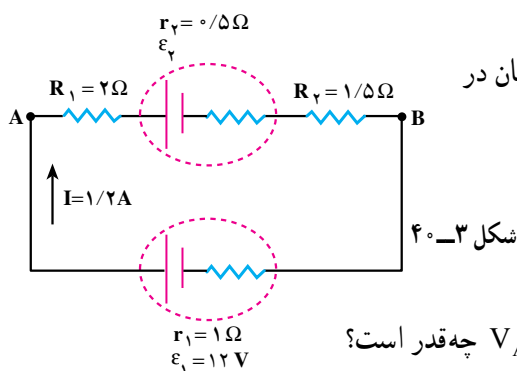


شکل ۳-۳۹

۸- در شکل ۳-۳۹ تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، اعدادی که آمپر سنج و ولت سنج نشان می دهند، چه تغییری می کند؟
 ۹- دو مقاومت مساوی R را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می بندیم و آن ها را هر بار به ولتاژ V وصل می کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متوالی چه قدر است؟

۱۰- سه مقاومت مشابه ۱۲ اهمی را یک بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یک دیگر می بندیم و به اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت وصل می کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می گذرد؟
 ۱۱- دو مقاومت موازی ۶ اهمی و ۱۲ اهمی به طور متوالی به یک مقاومت ۲ اهمی وصل شده است. در این حال، شبکه را به دو سر یک باتری ۳۶ ولتی با مقاومت داخلی ناچیز می بندیم. توان مصرفی را در مقاومت ۶ اهمی محاسبه کنید.

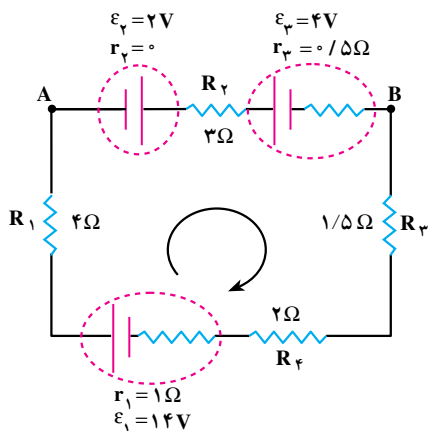
۱۲- از مقاومت های موازی 4Ω ، 6Ω و 12Ω جریان کل $21A$ عبور می کند. جریانی عبوری از مقاومت 6Ω چقدر است؟



۱۳- در مدار شکل ۳-۴۰ شدت جریان در جهت نشان داده شده $1/2$ آمپر است.

الف - نیروی محرکه ی ε_γ و $V_A - V_B$ چه قدر است؟

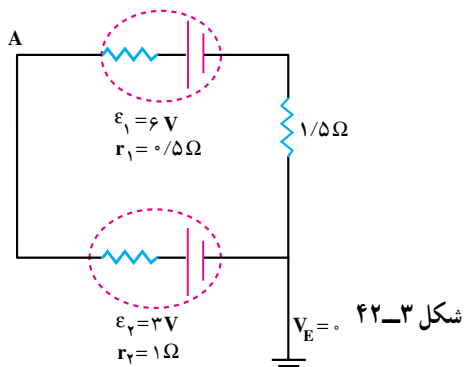
ب - انرژی مصرف شده در R_1 و R_γ را در مدت ۵ ثانیه حساب کنید.



۱۴- در مدار شکل ۳-۴۱، شدت جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه ی A و B را محاسبه کنید.

شکل ۳-۴۱

۱۵- در شکل ۳-۴۲ پتانسیل نقطه ی A را محاسبه کنید.

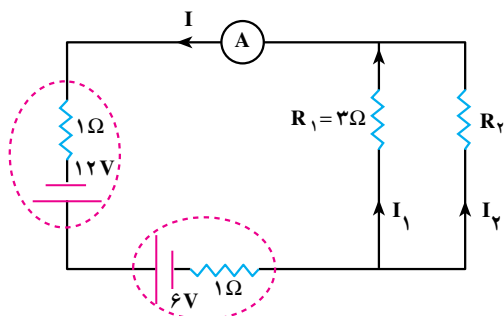


۱۶- شدت جریانی که آمپرسنج در مدار شکل ۳-۴۳ نشان می‌دهد، برابر ۲ آمپر است.

الف - مقاومت R_p

ب - توان مصرفی هر یک از دو

مقاومت را حساب کنید.

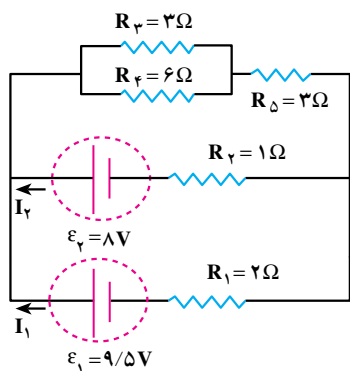


شکل ۳-۴۳

۱۷- در مدار شکل ۳-۴۴، شدت جریان در

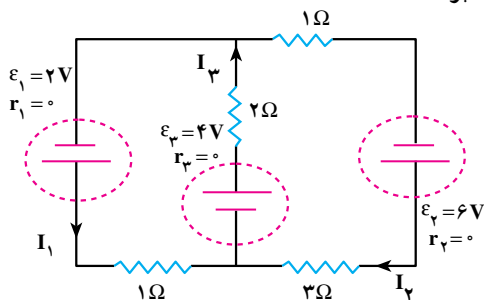
هر باتری و توان مصرفی کل مقاومت‌های R_3 و

R_4 و R_5 را به دست آورید.



شکل ۳-۴۴

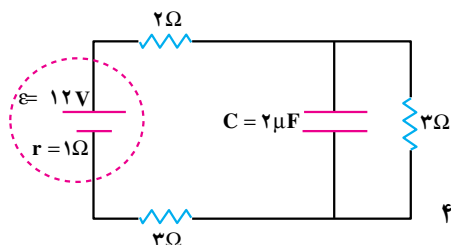
۱۸- در مدار شکل ۳-۴۵ جریان I_1 چند آمپر است؟



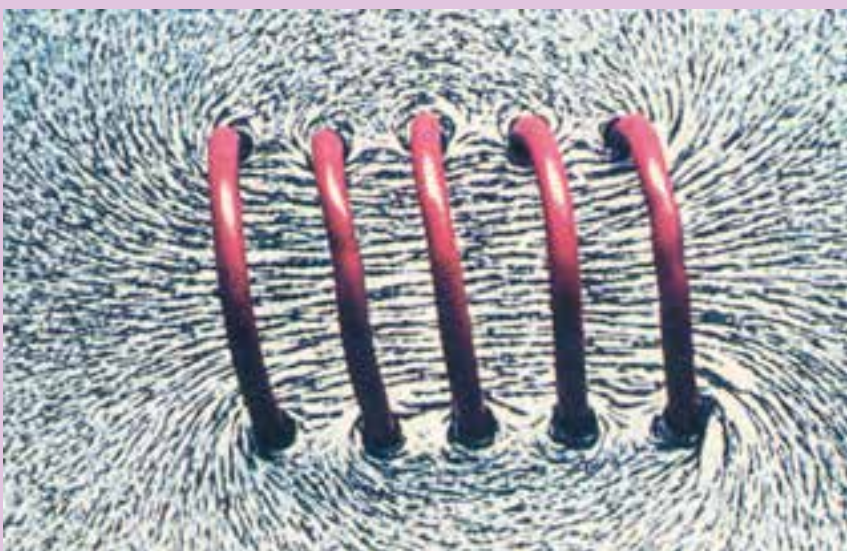
شکل ۳-۴۵

۱۹- در شکل ۳-۴۶، بار الکتریکی و انرژی

ذخیره شده در خازن C را محاسبه کنید.



شکل ۳-۴۶



می‌دانیم آهنرباهای دائم در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند. در این فصل خواهیم دید جریان الکتریکی نیز می‌تواند میدان مغناطیسی تولید کند. شکل بالا یک سیم‌لوله‌ی حامل جریان را نشان می‌دهد که در فضای اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد کرده است و این میدان باعث جهت‌گیری براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی شده است.

مغناطیس

اگر تاکنون با یک اسباب بازی مغناطیسی بازی کرده باشید، یا یک قطب‌نما را به کار برده باشید و با آهنربایی را مثلاً برای نگه داشتن یک برگه‌ی کاغذ روی بدنه‌ی یخچال مورد استفاده قرار داده باشید، احتمالاً از مشاهده‌ی پدیده‌های مربوط به شگفت آمده‌اید. آهنرباها برای بسیاری از ما جذابیت خاصی دارند.

آهنربایی را در دست خود نگه دارید و نزدیک یک جسم آهنی یا فولادی بایستید، آیا احساس نمی‌کنید که دست شما به طرف آن جسم کشیده می‌شود. در هر یک از دستان خود یک آهنربا نگه دارید، حتی وقتی هم که دو آهنربا با هم در تماس نیستند، وجود نیروی مغناطیسی را احساس می‌کنید. اگر یک ماده‌ی غیر مغناطیسی مثل شیشه نیز بین دو آهنربا باشد، باز هم این نیرو وجود دارد. دو آهنربا حتی در خلأ هم به یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. زمین نیز خود یک آهنربای عظیم است، که اثرهای ناشی از آن در پدیده‌های متفاوت دیده می‌شود.



شب هنگام، نور شمالگان (شفق قطبی) در نیم‌کره‌ی شمالی به صورت پرده‌ای نورانی در آسمان دیده می‌شود، ضخامت این پرده‌ی خمیده می‌تواند به ارتفاع چند کیلومتر و به طول چندین هزار کیلومتر باشد.

در این فصل خواهیم دید که جریان‌های الکتریکی نیز اثرهای مغناطیسی دارند. از اثرهای مغناطیسی سیم‌های حامل جریان و مواد مغناطیسی در بسیاری از ماشین‌ها و دستگاه‌هایی که زندگی روزانه‌ی ما را ساده‌تر می‌کنند، استفاده می‌شود.

۴-۱- آهنربا

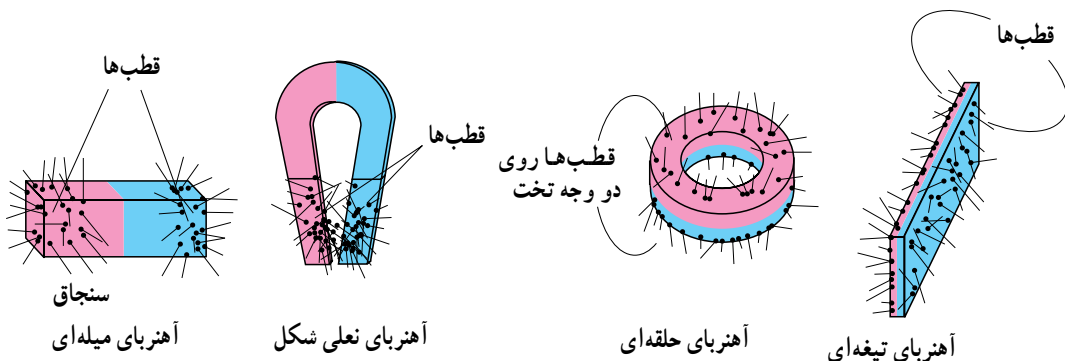
یونانیان باستان، بیش از ۲۵۰۰ سال پیش با پدیده‌ی آهنربایی آشنا بودند. تالس که اغلب از او به‌عنوان پدر علم یونان یاد می‌شود، ماده‌ی کانی مگنتیت (Fe_3O_4) را که آهن را می‌رباید می‌شناخت. همان‌گونه که می‌دانید، ماده‌های دارای این ویژگی را آهنربا می‌نامند. چینی‌های باستان نیز با ویژگی‌های مغناطیسی برخی از سنگ‌های آهنربا آشنایی داشتند و تکه‌هایی از این سنگ‌ها را به‌صورت قطب‌نماهای ساده در دریانوردی به کار می‌بردند.

فعالیت ۱-۴

در گروه خود آنچه را که درباره‌ی آهنرباها و کاربردهای آن‌ها می‌دانید، به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

آهنرباها را با توجه به نوع کاربردی که دارند، به شکل‌های مختلف (میله‌ای، نعلی شکل، تیغه‌ای و ...) می‌سازند.

قطب‌های آهنربا: در آهنربا - به هر شکلی که باشد - دو ناحیه وجود دارد که خاصیت آهنربایی در آن‌ها بیش از قسمت‌های دیگر است. این ناحیه‌ها را قطب‌های آهنربا می‌نامند. قطب‌های آهنرباها به شکل‌های مختلف را در شکل ۱-۴ مشاهده می‌کنید. تجمع سنجاق‌های کوچک مکان قطب‌های آهنربا را نشان می‌دهد.



فعالیت ۲-۴

به کمک براده‌های آهن یا چند سنجاق، قطب‌های هریک از آهنرباهایی را که در اختیار دارید، تعیین کنید.

پیش از این دیده‌اید که عقربه‌ی مغناطیسی همواره در جهت معینی می‌ایستد، به گونه‌ای که یک قطب معین آن مطابق شکل ۲-۴ تقریباً به طرف شمال و قطب دیگر آن به طرف جنوب قرار می‌گیرد. قطبی را که به سوی شمال تمایل دارد (یا به عبارت دیگر شمال‌گرا است) قطب N و قطب جنوب‌گرا را قطب S می‌نامند (شکل ۲-۴). قطب‌های همانم آهنرباها یک‌دیگر را می‌رانند و قطب‌های غیرهمنام یک‌دیگر را می‌ربایند.



شکل ۲-۴- قطب‌نماهایی که ملاحان در دریا و کوهنوردان به هنگام مه‌غلیظ برای تعیین جهت حرکت به کار می‌برند، در واقع یک آهنربای میله‌ای نازک است که بر روی پایه‌ای سوار است و می‌تواند آزادانه بر روی آن بچرخد، و جهت تقریبی شمال را نشان دهد. قطب‌نما را عقربه‌ی مغناطیسی هم می‌نامند.

فعالیت ۳-۴

آزمایشی که اثر قطب‌های آهنربا را بر یک‌دیگر نشان دهد طراحی کنید و انجام دهید.

اگر دو آهنربای نعلی شکل را مطابق شکل ۳-۴ در دو دست خود نگه دارید و سعی کنید آن‌ها را طوری به هم نزدیک کنید که قطب‌های همانم به یک‌دیگر نزدیک شوند، به خوبی می‌توانید نیروی رانش بین قطب‌های همانم را احساس کنید.



شکل ۳-۴

القای خاصیت مغناطیسی: دیدیم که آهنرباها قطعه‌هایی از جنس آهن را می‌ربایند. علاوه بر آهن، ماده‌هایی نظیر نیکل، کبالت و آلیاژهایی که از این سه فلز تشکیل شده‌اند نیز جذب آهنربا می‌شوند. با انجام دادن آزمایش ۱-۴ درمی‌یابید که قطعه‌ی آهنی ربوده شده توسط آهنربا، خود خاصیت آهنربایی پیدا کرده است.

آزمایش ۱-۴

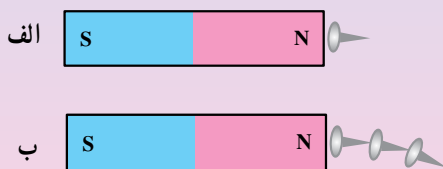
وسایله‌های آزمایش: یک آهنربای میله‌ای، تعدادی میخ آهنی، مقداری براده‌ی آهن (یا سنجاق کوچک).

۱- به کمک براده‌های آهن تحقیق کنید که میخ‌ها خاصیت آهنربایی ندارد.

۲- آهنربا را مطابق شکل ۴-۴ الف به یک انتهای میخ نزدیک کنید. بار دیگر خاصیت آهنربایی میخ را به کمک براده‌های آهن تحقیق کنید.

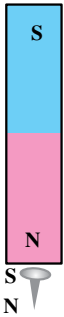
۳- مانند شکل ۴-۴ ب میخ‌های دیگری را با استفاده از ربایش مغناطیسی ایجاد شده پشت سر یک‌دیگر قرار دهید و هر بار وجود یا نبود خاصیت آهنربایی در آخرین میخ را بررسی کنید.

۴- آهنربای میله‌ای را از میخ‌ها دور کنید و بار دیگر خاصیت آهنربایی میخ‌ها را بررسی کنید.



شکل ۴-۴

نتیجه‌ی آزمایش ۱-۴ را می‌توانیم به شرح زیر توجیه کنیم: وقتی که آهنربا در نزدیکی میخ قرار می‌گیرد، در میخ خاصیت مغناطیسی القا می‌شود. اگر قطب N آهنربا را نزدیک به یک سر میخ بیاوریم، مطابق شکل ۴-۵ خاصیت آهنربایی طوری القا می‌شود که آن سر، قطب S و سر دورتر قطب N شود. ربایش بین دو قطب غیرهمنام (N در آهنربا و S در میخ) سبب ربوده شدن میخ به سمت آهنربا می‌شود.



شکل ۴-۵

این پدیده را القای خاصیت مغناطیسی می‌نامند. همان‌طور که با انجام دادن آزمایش ۴-۱ نشان داده‌اید، با دور کردن آهنربای اصلی، خاصیت آهنربایی القا شده نیز از بین می‌رود. علاوه بر این، خاصیت آهنربایی که در اثر القا در یک قطعه آهن، نیکل یا کبالت ایجاد می‌شود، همواره به‌صورتی است که قطعه‌ی یاد شده جذب آهنربای اصلی می‌شود.

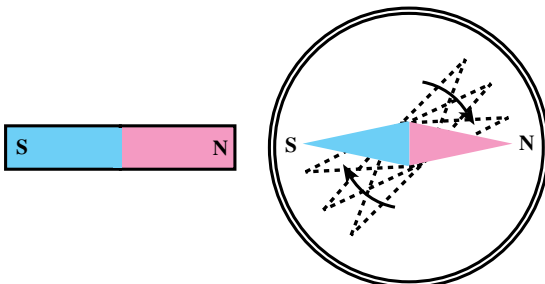
فعالیت ۴-۴

فرض کنید دو میله‌ی کاملاً مشابه یکی از جنس آهن و دیگری آهنربا در اختیار دارید. با بحث در گروه خود، روشی را پیشنهاد کنید که با استفاده از آن بتوانید بدون استفاده از هیچ وسیله‌ی دیگری، میله‌ای را که از جنس آهنرباست مشخص کنید.

۴-۲- میدان مغناطیسی

در فصل دوم با مفهوم میدان الکتریکی آشنا شدید. در آنجا دیدید که در فضای اطراف هر جسمی که بار الکتریکی دارد خاصیتی ایجاد می‌شود که می‌تواند بر هر جسم باردار دیگری که در آن فضا قرار گیرد نیرو وارد کند. هم‌چنین دیدیم که برای توصیف این خاصیت از یک کمیت برداری به نام میدان الکتریکی با نماد \vec{E} استفاده می‌شود.

در فضای اطراف یک آهنربا نیز خاصیتی وجود دارد که در اثر آن در قطعه‌های آهنی خاصیت آهنربایی القا می‌شود و بر قطب‌های آهنرباهای دیگر نیرویی وارد می‌شود. برای مثال هرگاه یکی از قطب‌های آهنربای میله‌ای را به یک عقربه‌ی مغناطیسی که در راستای تقریبی شمال و جنوب جغرافیایی بر روی پایه‌ای قرار دارد، نزدیک کنیم، می‌بینیم که عقربه‌ی مغناطیسی می‌چرخد (شکل ۴-۶).



شکل ۴-۶ اثر آهنربا بر عقربه‌ی مغناطیسی‌ای که در نزدیکی آن قرار دارد.

در این وضع اگر آهنربا را دور کنیم، عقربه دوباره در راستای تقریبی شمال و جنوب محل قرار می‌گیرد. این آزمایش وجود خاصیتی را در محیط اطراف یک آهنربا نشان می‌دهد. خاصیتی را که در اطراف آهنربا ایجاد می‌شود و به موجب آن به عقربه‌ی مغناطیسی نیرو وارد می‌شود میدان مغناطیسی می‌نامند. میدان مغناطیسی را با نماد \vec{B} نمایش می‌دهند.

میدان مغناطیسی کمیتی برداری است و مانند هر کمیت برداری دیگری دارای جهت و بزرگی است. در ادامه‌ی بحث، نخست جهت این بردار و سپس بزرگی و یکای آن را تعریف می‌کنیم.

جهت میدان مغناطیسی: دیدیم هنگامی که یک عقربه‌ی مغناطیسی را در میدان مغناطیسی یک آهنربا قرار می‌دهیم، عقربه می‌چرخد و در جهت معینی می‌ایستد. اگر آهنربا را در امتداد جدیدی قرار دهیم، عقربه‌ی مغناطیسی نیز خواهد چرخید و در جهت دیگری قرار خواهد گرفت. میدان مغناطیسی در هر نقطه بنا به تعریف هم‌راستای عقربه‌ی مغناطیسی است که در آن نقطه به حال تعادل درآمده باشد و سوی آن از S عقربه به N آن است. به این ترتیب، می‌توانیم بگوییم:

هنگامی که آهنربا در نزدیکی عقربه‌ی مغناطیسی قرار می‌گیرد، عقربه می‌چرخد تا در امتداد میدان مغناطیسی آهنربا قرار گیرد و قطب N آن سوی میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. **خط‌های میدان مغناطیسی:** در فصل ۲ دیدیم که میدان الکتریکی را با خط‌های میدان الکتریکی نمایش می‌دهند. میدان مغناطیسی را نیز می‌توان توسط خط‌های میدان مغناطیسی نمایش داد. این خط‌ها طوری رسم می‌شوند که راستای میدان مغناطیسی در هر نقطه مماس بر خط میدان در آن نقطه باشد. خط میدان مغناطیسی در هر نقطه همسو با میدان مغناطیسی در آن نقطه است. علاوه بر این تراکم این خط‌ها در هر ناحیه از فضا نشانگر بزرگی میدان مغناطیسی در آن ناحیه است.

آزمایش ۲-۴

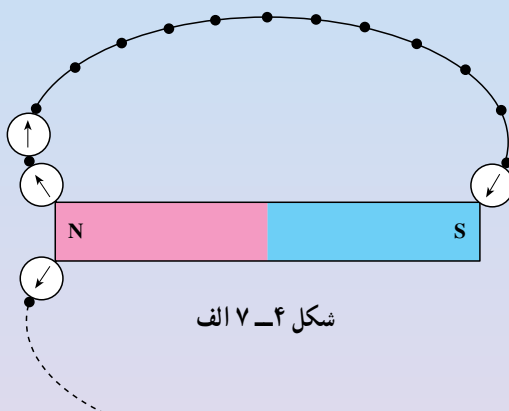
وسيله‌های آزمایش: یک آهنربای میله‌ای، یک عقربه‌ی مغناطیسی، مداد و کاغذ.

۱- آهنربای میله‌ای را روی کاغذ قرار دهید.

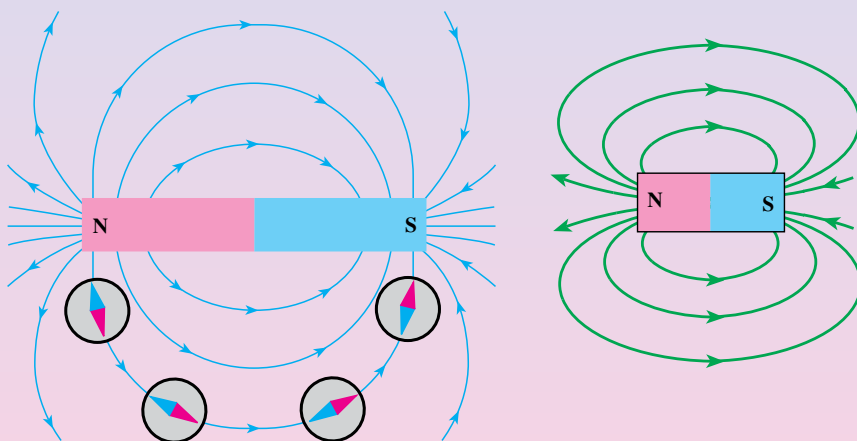
۲- عقربه‌ی مغناطیسی را مطابق شکل ۴-۷ الف نزدیک قطب N آهنربا قرار دهید و با مداد در نقطه‌ای که قطب N عقربه به آن سمت ایستاده یک نقطه بگذارید.

۳- عقربه را جابه‌جا کنید به طوری که قطب S آن روی نقطه‌ای که علامت

- زده‌اید قرار گیرد. بار دیگر با مداد در مکان قطب N عقربه نقطه‌ای بگذارید.
- ۴- این کار را آن قدر ادامه دهید تا بار دیگر عقربه به آهنربای میله‌ای برسد.
- ۵- این نقطه‌ها را به هم وصل کنید. روی منحنی حاصل، جهتی را که قطب N عقربه در آن می‌ایستد، با رسم پیکان مشخص کنید.
- ۶- مرحله‌های ۲ تا ۴ را چند بار تکرار کنید. هر بار از نقطه‌ای نزدیک نقطه‌ی شروع قبلی آغاز کنید تا آنکه شکلی مانند شکل ۴-۷ ب به دست آورید.



شکل ۴-۷ الف



شکل ۴-۷ ب

با استفاده از مقداری براده‌ی آهن می‌توان طرحی از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربا تهیه کرد. برای این کار آزمایش ۴-۳ را انجام دهید.

آزمایش ۳-۴

وسيله‌های آزمایش: آهنربای میله‌ای، آهنربای نعلی شکل، براده‌ی آهن، یک صفحه‌ی شیشه‌ای یا مقوایی، یک نمک پاش (یا وسیله‌ی دیگری برای پاشیدن براده‌ی آهن).

۱- آهنربای میله‌ای را روی میز قرار دهید و صفحه‌ی شیشه‌ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.

۲- به کمک نمک پاش براده‌های آهن را به‌طور یکنواخت به‌ضخامت خیلی کم روی شیشه بپاشید.

۳- چند ضربه‌ی آرام به صفحه‌ی شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرّحی که روی صفحه‌ی شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است.

پرسش ۱-۴

با استفاده از خاصیت القای مغناطیسی، توضیح دهید که چرا براده‌های آهن در آزمایش ۳-۴ در راستای خط‌های میدان مغناطیسی می‌ایستند.

میدان مغناطیسی یکنواخت: اگر خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیه‌ای از فضا با یک‌دیگر موازی و هم‌فاصله باشند، بردار میدان مغناطیسی در همه‌ی نقطه‌های آن ناحیه، بزرگی و جهت ثابتی دارد. یک چنین میدان مغناطیسی‌ای را میدان مغناطیسی یکنواخت می‌نامند.

خط‌های میدان مغناطیسی مربوط به آهنرباها را که در وضعیت‌های مختلف به کمک براده‌های آهن به‌دست آمده است، در شکل ۴-۸ مشاهده می‌کنید.



(پ) دو آهنربای میله‌ای که قطب‌های غیرهمانسان نزدیک یک‌دیگر است.



(ب) دو آهنربای میله‌ای که قطب‌های همانسان نزدیک یک‌دیگر است.



(الف) آهنربای میله‌ای

۴-۳- تعریف میدان مغناطیسی با استفاده از نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی

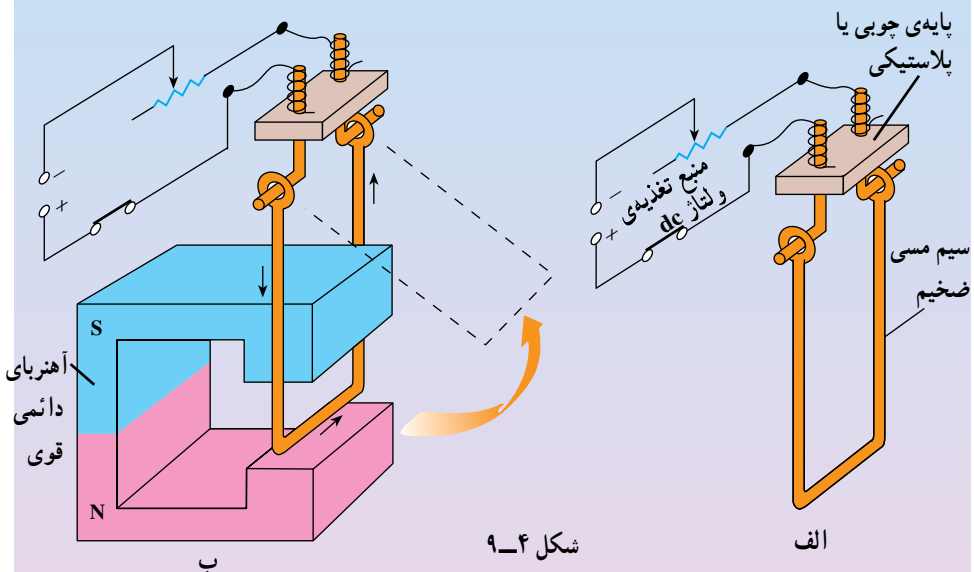
دیدیم که هرگاه یک عقربه‌ی مغناطیسی یا هر آهنربای دیگری در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بر آن نیرو وارد می‌شود. در ادامه خواهیم دید که بر سیم‌های حامل جریان الکتریکی نیز در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود، بزرگی میدان مغناطیسی و یکای آن را می‌توان با استفاده از این اثر تعریف کرد. برای مشاهده‌ی این نیرو آزمایش زیر را انجام دهید.

آزمایش ۴-۴

وسایلهای آزمایش: یک آهنربای نعلی شکل قوی، سیم مسی ضخیم، سیم رابط، رئوستا و منبع تغذیه.

۱- مدارى مطابق شکل ۹-۴ الف ببندید.

۲- آهنربای نعلی شکل را مطابق شکل ۹-۴ ب در اطراف سیم مسی قرار دهید.



۳- کلید را ببندید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، بنویسید.

۴- این آزمایش را چند بار تکرار کنید و هر بار آهنربا را در وضعیت جدیدی در اطراف سیم مسی قرار دهید و با بستن کلید مشاهده‌های خود را یادداشت کنید.

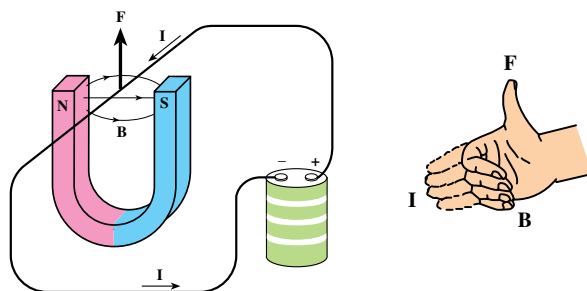
۵- نتیجه‌ی آزمایش را به کلاس گزارش دهید.

۶- این آزمایش را با یک آهنربای دیگر تکرار کنید.

۷- جهت و بزرگی شدت جریان را تغییر دهید و آزمایش‌های بالا را تکرار کنید.

اورستد (فیزیکدان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۴-۴ و اندازه‌گیری دقیق نیرویی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد که :
 نیرویی که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، بر راستای جریان و نیز بر میدان مغناطیسی عمود است.
 جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی را می‌توان از قاعده‌ای به نام قاعده‌ی دست راست به این صورت پیش‌بینی کرد :

اگر دست راست خود را باز نگه دارید و چهار انگشت را مطابق شکل ۴-۱۰ در جهت جریان بگیرید به طوری که اگر انگشتان خود را خم کنید، در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرد - در این صورت، انگشت شست شما جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان را نشان خواهد داد.



شکل ۴-۱۰ قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت نیروی \vec{F} وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی I در میدان مغناطیسی \vec{B}

عامل‌های مؤثر بر نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی: بزرگی نیروی \vec{F} که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، به عامل‌های زیر بستگی دارد :

۱- **جریانی که از سیم می‌گذرد (I)**؛ هرچه جریان بیش‌تر باشد، نیروی وارد بر سیم از سوی میدان مغناطیسی بیش‌تر خواهد بود.

$$F \propto I$$

۲- **طول قسمتی از سیم که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد (l)**؛ هرچه طول بیش‌تری از سیم در میدان قرار گیرد، نیروی وارد بر آن بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto l$$

۳- میدان مغناطیسی (\vec{B})؛ نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان‌های مغناطیسی مختلف یکسان نیست. نیرویی که در میدان مغناطیسی یک آهنربای قوی‌تر بر سیم حامل جریان وارد می‌شود، بزرگ‌تر است. با استفاده از این واقعیت، می‌توانیم بزرگی میدان مغناطیسی را تعریف کنیم. اندازه‌ی میدان مغناطیسی را با B نمایش می‌دهند:

$$F \propto B$$

۴- سینوس زاویه‌ای که جریان با میدان مغناطیسی می‌سازد ($\sin \alpha$)؛ نیروی وارد بر سیم حامل جریان در یک میدان مغناطیسی با سینوس زاویه‌ی بین راستای میدان و راستای جریان متناسب است.

$$F \propto \sin \alpha$$

تناسب‌های بالا را می‌توان با استفاده از ضریب تناسب k ، به صورت زیر خلاصه کرد.

$$F = kBI \sin \alpha \quad (۱-۴)$$

با انتخاب یکای مناسب برای میدان مغناطیسی، می‌توان ضریب تناسب k را برابر یک گرفت. در نتیجه داریم

$$F = BI \sin \alpha \quad (۲-۴)$$

اگر جریان I و میدان B بر هم عمود باشند، داریم:

$$\sin \alpha = 1$$

در نتیجه، نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی عمود بر آن به قرار زیر است:

$$F = BI \quad (۳-۴)$$

این بیش‌ترین نیرویی است که میدان مغناطیسی B می‌تواند بر طول l از سیم حامل جریان I وارد کند. بنابراین، می‌توانیم اندازه‌ی میدان مغناطیسی B را با رابطه‌ی زیر تعریف کنیم.

$$B = \frac{F_{\text{بیشینه}}}{Il} \quad (۴-۴)$$

یعنی بزرگی میدان مغناطیسی در هر نقطه، برابر است با نیرویی که بر یک متر از طول سیم حامل جریانی به شدت یک آمپر که در راستای عمود بر میدان قرار گرفته باشد وارد می‌شود.

یکای میدان مغناطیسی، تسلا: رابطه‌ی ۴-۴ را برای تعریف یکای میدان مغناطیسی به کار می‌بریم. یکای میدان مغناطیسی در SI تسلا نام دارد و با نماد T نشان داده می‌شود.

بنا به تعریف، یک تسلا بزرگی میدان مغناطیسی است که در آن بر یک متر از سیمی که حامل جریان الکتریکی به شدت یک آمپر است و در راستای عمود بر میدان قرار دارد نیرویی به بزرگی یک نیوتون وارد شود. در نتیجه، می‌توانیم بنویسیم:

$$1 \text{ تسلا} = \frac{1 \text{ نیوتون}}{(1 \text{ متر}) \times (1 \text{ آمپر})} = 1 \text{ تسلا} \quad ۱۴۹$$

تسلا یکای بزرگی است. در کاربردهای عملی از یکای کوچکتري استفاده می کنند که گاؤس نام دارد و با نماد G نمایش داده می شود.

$$1\text{T} = 10^4\text{G}$$

مثال ۱-۴

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی به بزرگی 4mT در راستایی که با جهت میدان زاویه ی 3° می سازد، قرار دارد. اگر شدت جریانی که از سیم می گذرد 5آمپر باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر یک متر از این سیم را محاسبه کنید. حل: بزرگی نیروی مغناطیسی برابر است با :

$$F = I l B \sin \alpha$$

$$F = 5 \times 1 \times 4 \times 10^{-5} \sin 3^\circ$$

$$F = 10 \times 10^{-5} \text{ N} = 0.1 \text{ mN}$$

تمرین ۱-۴

سیم افقی مستقیم حامل جریانی در یک میدان مغناطیسی یکنواخت افقی که جهت آن از شمال به جنوب است، قرار دارد. جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را تعیین کنید ؛ (الف) اگر سیم در راستای شمال – جنوب و جریان آن از شمال به جنوب باشد. (ب) اگر سیم در راستای شرق – غرب و جریان آن از غرب به شرق باشد.

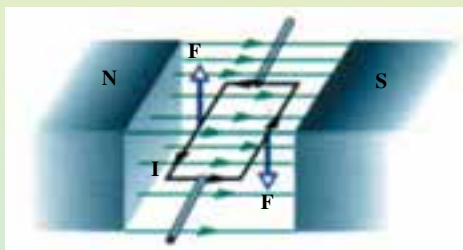
فعالیت ۵-۴

آزمایشی را طراحی کنید که به کمک آن بتوان نیروی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی را اندازه گیری کرد.

فناوری

طرز کار گالوانومتر: گالوانومتر وسیله‌ای است که با آن جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک را اندازه می‌گیرند. امروزه وسیله‌های اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی (یعنی شدت جریان، اختلاف پتانسیل، مقاومت و ...) معمولاً عقربه‌ای یا رقمی (دیجیتالی) هستند. تشریح سازوکار وسیله‌های رقمی به مطالب موجود در این کتاب مربوط نمی‌شود. ولی با استفاده از مطالبی که فراگرفته‌ایم، می‌توانیم سازوکار گالوانومتر عقربه‌ای را مورد بررسی قرار دهیم. برای این کار، ابتدا ببینیم اگر یک سیم حامل جریان به شکل یک قاب مطابق شکل ۴-۱۱ در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار گیرد، چه نیروهایی بر آن وارد می‌شود. چنین سیمی را یک پیچه می‌نامند.

محور پیچه

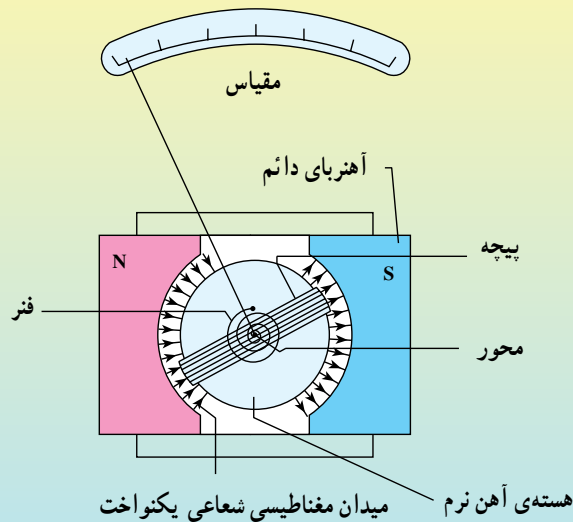


شکل ۴-۱۱- پیچه‌ی حامل جریان در میدان مغناطیسی

هنگامی که جریان از پیچه می‌گذرد، از طرف میدان بر اضلاع آن نیرو وارد می‌شود و در نتیجه پیچه مطابق شکل ۴-۱۱ حول محورش می‌چرخد. هر گالوانومتر دارای یک قاب است که به دور آن سیم پیچیده شده است، این قاب در یک میدان مغناطیسی دائم و قوی قرار گرفته است. وقتی جریان از این پیچه می‌گذرد، از سوی میدان مغناطیسی به قاب نیرو وارد می‌شود و آن را می‌چرخاند (شکل ۴-۱۲ را ببینید) و عقربه‌ی متصل به قاب را منحرف می‌کند. هر قدر اندازه‌ی شدت جریان بیش‌تر باشد، میزان چرخش پیچه و انحراف عقربه بیش‌تر خواهد شد.

اگر جریانی در جهت وارون شارش کند، جهت چرخش پیچه و انحراف وارون خواهد شد. با قطع جریان، فنر ظریفی که در پشت پیچه قرار دارد، پیچه و عقربه را به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گرداند. صفحه‌ی گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می‌چرخد را بر حسب آمپر مدرج می‌کنند، به این ترتیب که در مقابل هر زاویه، بزرگی شدت

جریانی که عقربه را به اندازه‌ی آن زاویه منحرف می‌کند، ثبت می‌کند.



شکل ۴-۱۲

فناوری

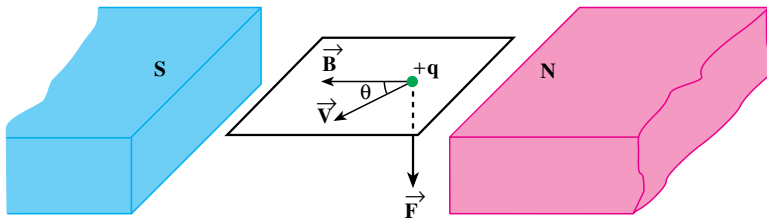
موتور الکتریکی: موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این موتورها در انجام کارهای مختلف روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرند، و اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها نظیر جاروی برقی، مته‌ی برقی، آسیاب برقی، ماشین لباس‌شویی، پنکه و ... را تشکیل می‌دهند.

ساختمان موتور الکتریکی مانند ساختمان گالوانومتر است، از این نظر که در موتور الکتریکی نیز عبور جریان از یک قاب (به نام روتور) واقع در میدان مغناطیسی، باعث چرخش پیچه می‌شود. چرخش قطعات در دستگاه‌های بالا از این حرکت پیچه ناشی می‌شود.

۴-۴- نیروی وارد بر ذره‌ی باردار متحرک در میدان مغناطیسی

در بخش گذشته دیدیم که در میدان مغناطیسی، نیرویی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود. هرگاه جریان صفر شود، نیروی وارد بر سیم نیز صفر می‌شود. در فصل ۳ دیدیم که جریان الکتریکی در واقع شارش بارهای الکتریکی است و صفر شدن جریان در یک رسانا به‌طور متوسط به معنای توقف شارش بارهای الکتریکی است. پس نتیجه می‌گیریم که نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی، درواقع بر بارهایی وارد می‌شود که در سیم در حال حرکت‌اند.

آزمایش نشان می‌دهد که اگر ذره‌ی باردار q با سرعت \vec{v} در میدان مغناطیسی \vec{B} حرکت کند (به شرط آن که جهت حرکت آن موازی با میدان نباشد) بر آن نیرویی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۱۳-۴ بر راستای \vec{v} و میدان مغناطیسی \vec{B} عمود است. این نیرو را نیروی الکترومغناطیسی می‌نامند.



شکل ۱۳-۴- ذره‌ی با بار مثبت q که در میدان مغناطیسی \vec{B} با سرعت \vec{v} حرکت می‌کند.

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی نیرویی که در میدان مغناطیسی بر بار الکتریکی q که با سرعت \vec{v} در حرکت است وارد می‌شود، به عامل‌های زیر بستگی دارد.

۱- بار الکتریکی (q)؛ هرچه بار الکتریکی q بزرگ‌تر باشد، نیروی وارد بر آن از سوی میدان مغناطیسی بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto q$$

۲- سرعت حرکت بار الکتریکی (\vec{v})؛ هرچه سرعت حرکت بار الکتریکی در میدان مغناطیسی بیش‌تر باشد، نیرویی که از سوی میدان مغناطیسی بر آن وارد می‌شود، بزرگ‌تر خواهد بود.

$$F \propto v$$

۳- میدان مغناطیسی (\vec{B})؛ هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد، نیرویی که بر بار وارد

می‌شود، بیش‌تر خواهد بود.

$$F \propto B$$

۴- سینوس زاویه‌ی θ که جهت حرکت بار الکتریکی (یعنی بردار \vec{v}) با میدان مغناطیسی می‌سازد؛ نیروی وارد بر بار الکتریکی متحرک در میدان مغناطیسی با سینوس این زاویه متناسب است (شکل ۴-۱۳).

$$F \propto \sin \theta$$

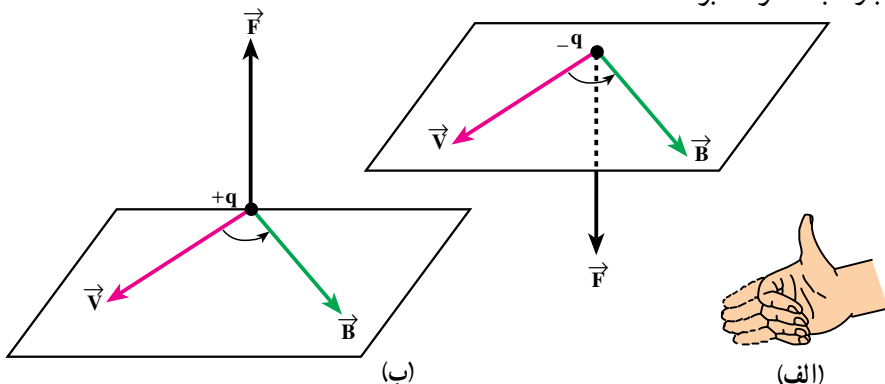
تناسب‌های بالا را می‌توان در رابطه‌ی زیر خلاصه کرد.

$$F = kq v B \sin \theta \quad (۴-۵)$$

که در آن k ضریب تناسب است. اگر F برحسب نیوتون و q برحسب کولن و v برحسب m/s و B برحسب تسلا باشد، ضریب تناسب یک خواهد شد. در نتیجه، داریم:

$$F = qvB \sin \theta \quad (۴-۶)$$

جهت نیروی وارد بر بار متحرک: سوی نیروی مغناطیسی وارد بر بار الکتریکی مثبت که در میدان مغناطیسی \vec{B} با سرعت \vec{v} حرکت می‌کند نیز توسط قاعده‌ی دست راست به ترتیب زیر تعیین می‌شود. اگر دست راست خود را طوری نگه داریم که انگشتان باز شده‌ی ما در راستای \vec{v} (یعنی در جهت حرکت بار الکتریکی) باشد - به گونه‌ای که وقتی آن‌ها را روی زاویه‌ی کوچک‌تری که \vec{v} با \vec{B} می‌سازد مطابق شکل ۴-۱۴ الف خم کنیم در جهت B قرار گیرد - انگشت شست ما در جهت نیروی وارد بر بار خواهد بود. نیروی وارد بر بار منفی مانند شکل ۴-۱۴ ب در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت خواهد بود.



شکل ۴-۱۴- (الف) قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت نیروی وارد بر بار متحرک در میدان مغناطیسی،
(ب) جهت نیروی وارد بر بار الکتریکی متحرک مثبت و منفی، در میدان مغناطیسی

پرسش ۲-۴

اگر بار الکتریکی موازی با \vec{B} حرکت کند، نیروی مغناطیسی وارد بر آن چه قدر است؟

مثال ۲-۴

ذره‌ای با بار ۴ میکروکولن و با سرعت $2 \times 10^3 \text{ m/s}$ در راستایی که با میدان مغناطیسی یکنواخت 10° G زاویه‌ی 3° می‌سازد، در حرکت است. بزرگی نیروی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

حل: نیروی وارد بر بار متحرک در میدان مغناطیسی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} F &= qvB \sin \theta \\ &= 4 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^3 \times 10^{-2} \sin 3^\circ \\ &= 4 \times 10^{-5} \text{ N} \end{aligned}$$

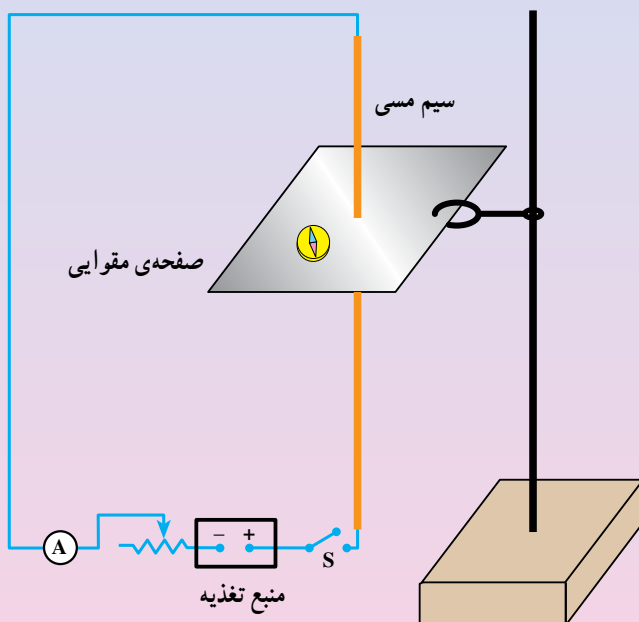
۴-۵- آثار مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی

اورستد ضمن انجام دادن برخی آزمایش‌های الکتریسته برای جمع‌ی از دانشجویان خود، مشاهده کرد که عقربه‌ی مغناطیسی موجود در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می‌شود. او با انجام دادن آزمایش‌های بیش‌تر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. این کشف اورستد نخستین گام در راه درک رابطه‌ی بین الکتریسته و مغناطیس بود که به گسترش مبحث الکترومغناطیس انجامید. در این بخش، به بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم‌ها می‌پردازیم.

آزمایش ۴-۵ (آزمایش اورستد)

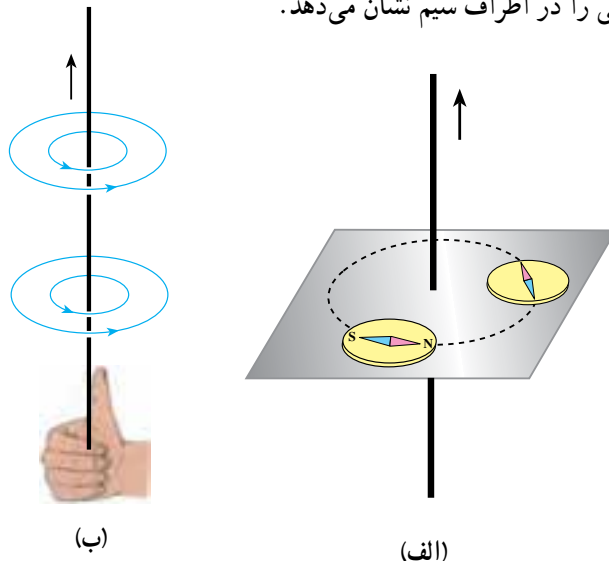
وسایله‌های آزمایش: منبع تغذیه، سیم مسی نسبتاً ضخیم، رؤستا، آمپرسنج، صفحه‌ی مقوایی، عقربه‌ی مغناطیسی، کلید قطع و وصل و سیم رابط.

- ۱- سیم مسی را از صفحه‌ی مقوایی عبور دهید و با آن مداری مطابق شکل ۱۵-۴ ترتیب دهید.
- ۲- قبل از بستن کلید و برقراری جریان الکتریکی، عقربه‌ی مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرارگرفتن آن توجه کنید.
- ۳- با وصل کردن کلید و تنظیم رئوستا، جریان مناسبی را از مدار عبور دهید. آنگاه به سمت‌گیری عقربه‌ی مغناطیسی توجه کنید.
- ۴- عقربه‌ی مغناطیسی را در نقطه‌های مختلف روی مقوا قرار دهید و سمت‌گیری آن را بررسی کنید.
- ۵- چند خط میدان مغناطیسی را به روش آزمایش ۲-۴ رسم کنید.
- ۶- نتیجه‌ی این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و به کلاس گزارش دهید.
- ۷- این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.
- ۸- تحقیق کنید که افزایش شدت جریان چه تأثیری در نتیجه‌ی آزمایش دارد؟



شکل ۱۵-۴

با انجام دادن این آزمایش می بینید که خط‌های میدان مغناطیسی حاصل از یک سیم حامل جریان، مطابق شکل ۱۶-۴ الف به صورت دایره‌های هم‌مرکزی در اطراف سیم حامل جریان خواهند بود. جهت خط‌های میدان مغناطیسی سیم حامل جریان را می‌توان به کمک عقربه‌ی مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن با استفاده از قاعده‌ی دست راست نیز می‌شود این جهت را تعیین کرد؛ بنابراین قاعده، اگر سیم را مطابق شکل ۱۶-۴ ب در دست راست خود بگیرید - به گونه‌ای که انگشت شست در جهت جریان الکتریکی باشد - جهت خم شدن چهار انگشت دست شما جهت خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف سیم نشان می‌دهد.



شکل ۱۶-۴

آزمایش نشان می‌دهد که بزرگی میدان مغناطیسی B در اطراف یک سیم نازک دراز مستقیم حامل جریان الکتریکی I به شدت I در نقطه‌ای که فاصله‌ی عمودی آن از سیم برابر R است با I نسبت مستقیم و با R نسبت وارون دارد، یعنی

$$B \propto \frac{I}{R}$$

ضریب تناسب در SI برابر $\frac{\mu_0}{2\pi}$ است که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ نام دارد و برابر است با $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{Tm}{A}$. در نتیجه، داریم:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (۷-۴)$$

مثال ۳-۴

بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی ای به شدت ۲ آمپر را که از سیمی نازک، دراز و مستقیم می‌گذرد، در نقطه‌ای به فاصله‌ی الف) ۲ متر، ب) ۲ میلی‌متر از سیم حساب کنید.
حل: داریم

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

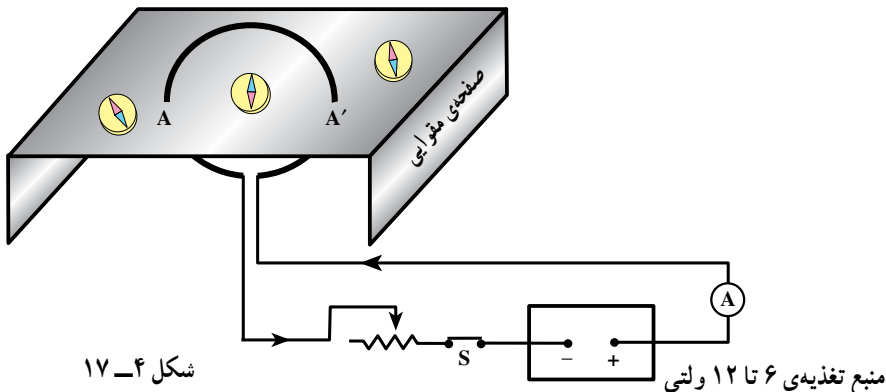
$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 2} = 2 \times 10^{-7} \text{ T} \quad \text{الف)}$$

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 2}{2\pi \times 2 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{-4} \text{ T} \quad \text{ب)}$$

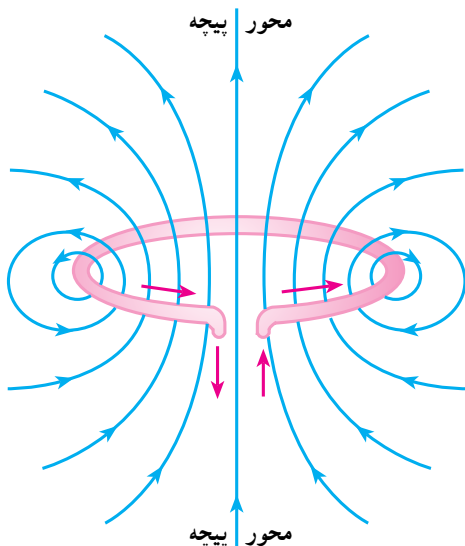
میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی در یک پیچه‌ی مسطح: پیچه‌ی مسطح از چند دور سیم نازک به شکل حلقه تشکیل شده که به هم فشرده شده‌اند و به صورت یک حلقه‌ی مسطح درآمدند. خطی که از مرکز این حلقه می‌گذرد و عمود بر سطح آن است، محور پیچه نامیده می‌شود. پیچه‌ها در بسیاری از وسیله‌های برقی برای ایجاد میدان مغناطیسی به کار می‌روند.

فعالیت ۶-۴

با استفاده از عقربه‌ی مغناطیسی و براده‌ی آهن خط‌های میدان مغناطیسی ناشی از عبور جریان الکتریکی از یک پیچه را تعیین کنید. برای این کار، می‌توانید از مداری مطابق شکل ۴-۱۷ استفاده کنید.



خط‌های میدان مغناطیسی پیچه روی صفحه‌ای که از محور پیچه می‌گذرد، در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، خط‌های میدان در ناحیه‌ی داخل پیچه به یک‌دیگر نزدیک‌ترند؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است.



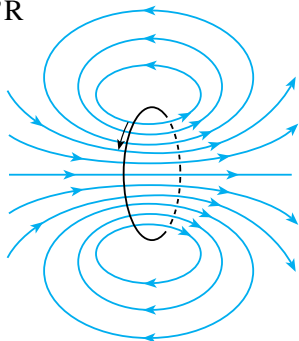
شکل ۴-۱۸- نقشه‌ی خط‌های میدان مغناطیسی در صفحه‌ی عمود بر سطح پیچه که از محور پیچه می‌گذرد.

هم‌چنین در شکل ۴-۱۸ دیده می‌شود که در نقطه‌هایی که بر محور پیچه قرار دارند، میدان موازی با محور پیچه است.

جهت میدان مغناطیسی پیچه را در هر نقطه می‌توان با قاعده‌ی دست راست - به روشی که قبلاً توضیح داده شد - تعیین کرد (شکل ۴-۱۹).

بزرگی میدان مغناطیسی پیچه‌ی مسطحی به شعاع R که N دور دارد و جریان الکتریکی‌ای به شدت I آمپر از آن می‌گذرد، در مرکز پیچه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (۴-۸)$$



شکل ۴-۱۹- استفاده از قاعده‌ی دست راست برای تعیین جهت میدان مغناطیسی پیچه

مثال ۴-۴

از پیچه‌ی مسطحی به شعاع $۶/۲۸\text{cm}$ که از ۱۰۰ دور سیم نازک درست شده است جریانی به شدت ۲ آمپر می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه به دست آورید.

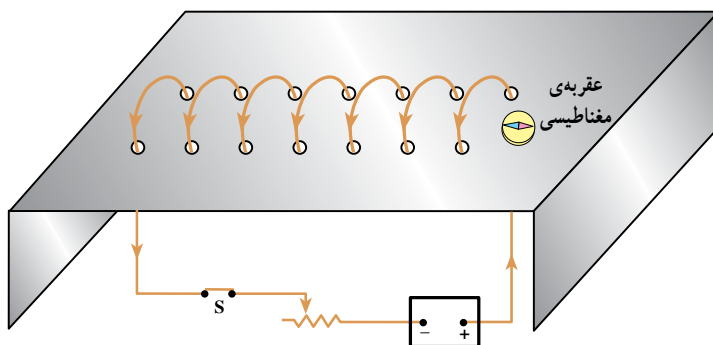
حل: داریم

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 100 \times 2}{2 \times 6/28 \times 10^{-2}} = 2 \times 10^{-3} \text{ T}$$

میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌لوله‌ی حامل جریان: سیم‌لوله از چند دور سیم تشکیل شده است که شبیه به یک فنر پیچیده شده است. اگر جریان الکتریکی‌ای از سیم‌لوله عبور کند، در فضای اطراف سیم‌لوله خاصیت مغناطیسی ایجاد می‌شود. با انجام فعالیت زیر به وجود میدان مغناطیسی در اطراف سیم‌لوله‌ی حامل جریان پی می‌برید.

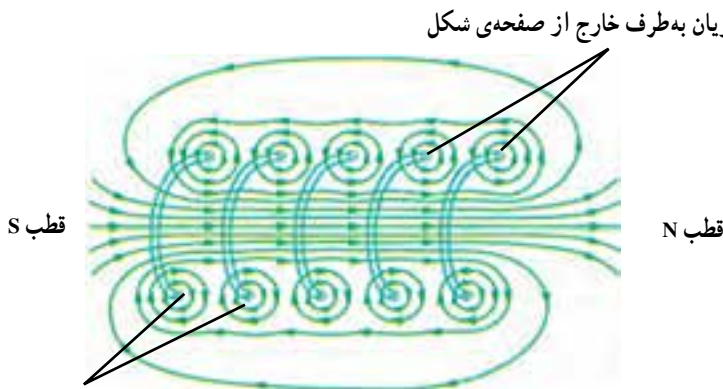
فعالیت ۷-۴

روی یک جعبه‌ی مقوایی یا پلاستیکی دو ردیف سوراخ با فاصله‌های مساوی ایجاد کنید. سیم را به صورتی که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است از میان سوراخ‌ها عبور دهید تا یک سیم‌لوله درست شود. جریان الکتریکی ثابتی از سیم‌لوله عبور دهید و با استفاده از عقربه‌ی مغناطیسی یا براده‌های آهن، خط‌های میدان مغناطیسی سیم‌لوله را مشخص کنید.



شکل ۴-۲

نقش خط‌های میدان مغناطیسی یک سیملوله‌ی حامل جریان الکتریکی در داخل و خارج آن در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل می‌بینید، خط‌های میدان داخل سیملوله بسیار متراکم‌تر از خط‌های میدان در خارج آن است و این نشان‌دهنده‌ی قوی‌تر بودن میدان در داخل سیملوله است. علاوه بر این خط‌های میدان در داخل سیملوله، بویژه در نقطه‌های نسبتاً دور از لبه‌های سیملوله تقریباً موازی و هم‌فاصله‌اند و این نشانگر یکنواخت بودن میدان مغناطیسی درون سیملوله است. همان‌طور که دیده می‌شود، جهت میدان مغناطیسی در داخل سیملوله خلاف جهت میدان مغناطیسی در خارج آن است.



شکل ۴-۲۱- میدان مغناطیسی سیملوله
جریان به طرف درون صفحه‌ی شکل

جهت میدان مغناطیسی سیملوله‌ی حامل جریان را نیز می‌توان با استفاده از قاعده‌ی دست راست تعیین کرد.

اگر شعاع قاعده‌ی سیملوله در مقایسه با طول آن کوچک باشد و حلقه‌های سیملوله خیلی به هم نزدیک باشند، میدان مغناطیسی داخل سیملوله در نقطه‌های دور از لبه‌ها یکنواخت است و بزرگی آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$B = \mu_0 n I \quad (۹-۴)$$

در این رابطه، I جریانی است که از سیملوله می‌گذرد و n تعداد دورهای سیملوله در واحد طول است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$n = \frac{N}{l} \quad (۱۰-۴)$$

که N تعداد کل دورهای سیملوله و l طول سیملوله است.

مثال ۴-۵

از سیملوله‌ای که در هر متر طول آن ۲۰۰۰ دور سیم پیچیده شده است، جریانی به شدت ۳ آمپر عبور می‌کند. بزرگی میدان مغناطیسی را در درون سیملوله (دور از لبه‌ها) به دست آورید.

حل: داریم

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} I = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{2000}{1} \times 3 \\ = 7.5 \times 10^{-3} \text{ T}$$

خط‌های میدان مغناطیسی، منحنی‌های بسته‌ای هستند، و نقطه‌ی آغاز یا پایانی ندارند. این موضوع برای پیچه و سیملوله در شکل‌های ۴-۱۸ و ۴-۲۱ دیده می‌شود.

سیملوله با هسته‌ی آهنی — آهنربای الکتریکی: در بخش ۴-۱ دیدید که اگر یک میله‌ی آهنی را در میدان مغناطیسی قرار دهیم، خاصیت مغناطیسی در آن القا خواهد شد. می‌توانیم میله‌ی آهنی را درون یک سیملوله‌ی حامل جریان که میدان در آنجا از هر جای دیگر در اطراف سیملوله قوی‌تر است جای دهیم. در این صورت، این میله‌ی آهنی را هسته‌ی سیملوله می‌نامند. پیش از آنکه جریانی از سیملوله عبور کند، سیملوله و هسته‌ی آهنی خاصیت مغناطیسی ندارند. اما وقتی جریانی در سیملوله برقرار می‌کنیم، میدان مغناطیسی سیملوله، خاصیت مغناطیسی در هسته‌ی آهنی القا می‌کند و هسته‌ی آهنی آهنربا می‌شود. این آهنربا را آهنربای الکتریکی می‌نامند.

به این ترتیب خاصیت آهنربایی آهنربای الکتریکی را می‌توانیم قطع و وصل کنیم. هرچه تعداد دورهای سیملوله در واحد طول بیش‌تر باشد و جریانی که از آن می‌گذرد بزرگ‌تر باشد آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود.

وجود هسته‌ی آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیملوله می‌شود. سیملوله‌ی بدون هسته‌ی آهنی دارای میدان مغناطیسی ضعیفی است که در عمل کاربردی ندارد.

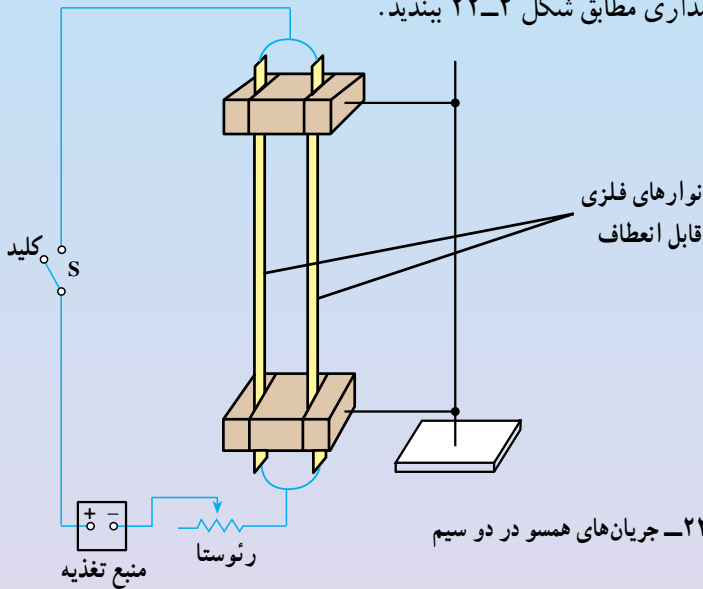
۴-۶ — نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان

در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. هم‌چنین در بخش ۴-۲ دیدیم که آهنربا بر سیم حامل جریان نیرو وارد می‌کند. حال فرض کنید که برای ایجاد میدان مغناطیسی به جای آهنربا از یک سیم حامل جریان استفاده کنیم. اگر سیم حامل جریان دیگری را در مجاورت این سیم قرار دهیم، آیا بر آن نیرویی وارد می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این پرسش آزمایش ۴-۶ را انجام دهید.

آزمایش ۴-۶

وسایله‌های آزمایش: دو نوار فلزی نازک قابل انعطاف به پهنای تقریبی یک سانتی متر، دو پایه‌ی نارسانا (چوبی)، رئوستا، منبع تغذیه‌ی جریان یکنواخت، کلید قطع و وصل و سیم رابط.

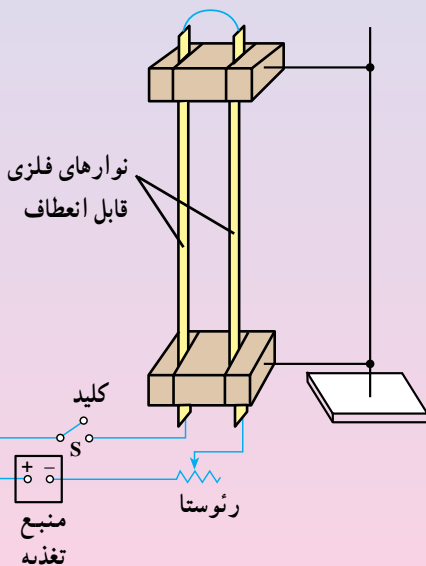
۱- مدارى مطابق شكل ۴-۲۲ ببندید.



۲- با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. توجه کنید که جریان در دو سیم موازی و همسو است. مشاهده‌ی خود را گزارش دهید.

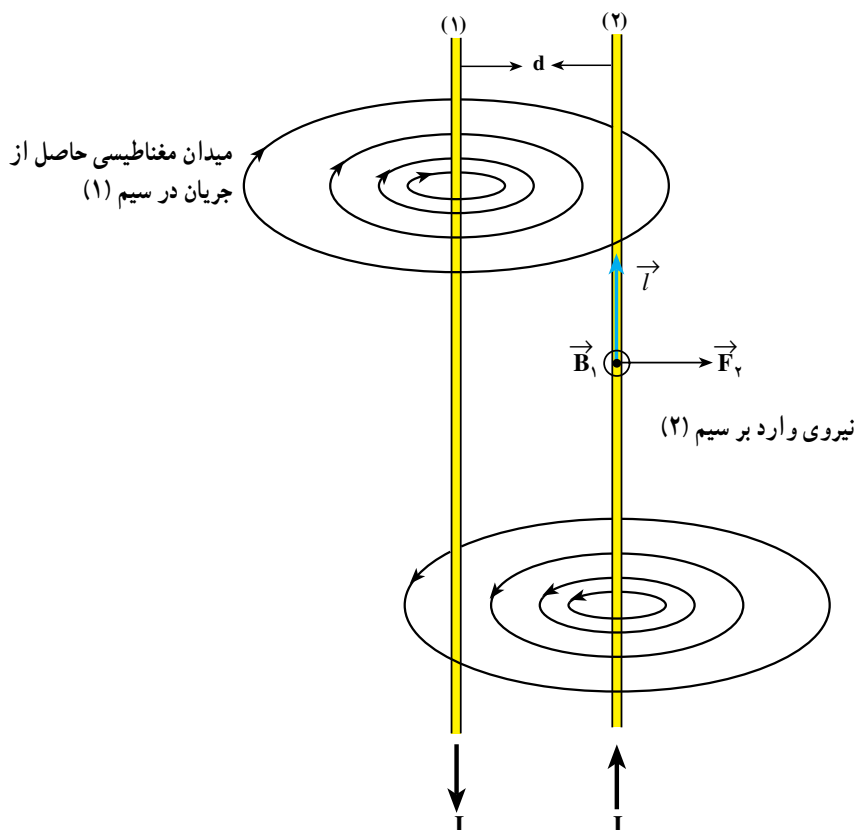
۳- مدارى مطابق شكل ۴-۲۳ ببندید.

۴- با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. در این حالت جریان در دو سیم در جهت‌های مخالف است. مشاهده‌های خود را گزارش دهید.



آزمایش صفحه‌ی قبل نشان می‌دهد که سیم‌های حامل جریان الکتریکی بر یک‌دیگر نیرو وارد می‌کنند. هرگاه جریانی که از دو سیم می‌گذرد همسو باشد (شکل ۴-۲۲)، دو سیم یک‌دیگر را می‌ربایند، و اگر جریانی که از دو سیم می‌گذرد در جهت‌های مخالف باشد (شکل ۴-۲۳) دو سیم یک‌دیگر را می‌رانند.

نیروی را که بر هر سیم وارد می‌شود، می‌توان برحسب میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم دیگر توضیح داد. برای این کار، دو سیم مستقیم و خیلی دراز موازی را که حامل جریان I هستند و به فاصله‌ی d از یک‌دیگر قرار گرفته‌اند، مطابق شکل ۴-۲۴ در نظر می‌گیریم. جریان الکتریکی در سیم شماره‌ی (۱) در فضای اطراف آن، میدان مغناطیسی (\vec{B}_1) را ایجاد می‌کند. جهت میدان \vec{B}_1 در محل سیم شماره‌ی (۲) همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است برونسو است. چون سیم شماره‌ی (۲) نیز حامل جریان الکتریکی I است، میدان \vec{B}_1 بر آن نیرو وارد می‌کند. این نیرو را در شکل با \vec{F}_p نشان داده‌ایم، جهت \vec{F}_p با استفاده از قاعده‌ی دست راست تعیین می‌شود.



شکل ۴-۲۴- جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های در جهت مخالف

تمرین ۲-۴

جهت نیروی وارد بر سیم شماره‌ی (۱) در شکل ۴-۲۴ را با استدلالی مشابه تعیین کنید.

فعالیت ۸-۴

جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های همسو را با رسم شکل و استفاده از قاعده‌ی دست راست مشخص کنید.

تمرین ۳-۴

از دو سیم بلند موازی که به فاصله‌ی d از یک‌دیگر قرار دارند، جریانی به شدت I می‌گذرد، جهت جریان در هر دو سیم یکسان است، نیرویی را که به یک متر از هر یک از سیم‌ها وارد می‌شود به دست آورید.

دیدیم که دو سیم مستقیم دراز و موازی حامل جریان با توجه به جهت جریان بر هم نیروهای ربایشی یا رانشی وارد می‌کنند، این واقعیت، اساس تعریف عملیاتی* یکای شدت جریان یعنی آمپر در SI است. مطابق این تعریف:

هرگاه از دو سیم نازک، موازی، مستقیم و بسیار دراز، که به فاصله‌ی یک متر از یک‌دیگر در خلأ قرار دارند، جریان‌های مساوی عبور کند — به گونه‌ای که بر یک متر از طول هر یک از سیم‌ها نیرویی برابر 2×10^{-7} نیوتون وارد شود — جریانی که از هر یک از سیم‌ها می‌گذرد، برابر یک آمپر است.

۷-۴- خاصیت مغناطیسی مواد

پیش از این دیدیم که برخی مواد خاصیت آهنربایی دارند، و در برخی مواد دیگر در حضور میدان مغناطیسی خاصیت آهنربایی القا می‌شود. برای نمونه هسته‌ی آهنی یک آهنربای الکتریکی را به یاد بیاورید. این سؤال پیش می‌آید که منشأ این رفتار مواد چیست؟ در این بخش به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

* تعریف عملیاتی یکا به معنای ارائه‌ی روش اندازه‌گیری آن یکا است.

یکی از ویژگی‌های جالب آهنرباها این است که اگر آهنربایی را به دو یا چند قطعه بشکنیم، هر قطعه

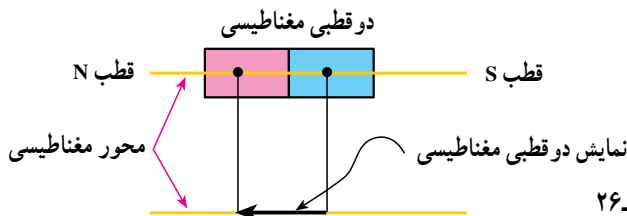
نیز خود یک آهنربا با دو قطب N و S است (شکل



شکل ۴-۲۵- هر قطعه از یک آهنربا، یک دوقطبی مغناطیسی است.

۲۵-۴). آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هر قدر این عمل شکستن را ادامه دهیم، باز هم قطعه‌های حاصل دارای دو قطب N و S خواهند بود. می‌توان چنین نتیجه گرفت که قطب N از قطب S جداشدنی نیست و کوچکترین ذره‌های تشکیل دهنده آهنرباها (یعنی اتم‌ها یا مولکول‌ها) نیز آهنربا هستند و دو قطب N و S دارند.

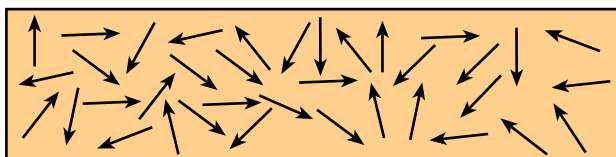
این آهنرباهای کوچک را دوقطبی مغناطیسی می‌نامند؛ زیرا هر یک همواره دو قطب N و S دارند. خطی را که دو قطب یک دوقطبی مغناطیسی را به هم متصل می‌کند، محور مغناطیسی آن می‌نامند. یک دوقطبی مغناطیسی را با یک پیکان نمایش می‌دهند (شکل ۴-۲۶).



شکل ۴-۲۶

موادی را که اتم‌ها یا مولکول‌های سازنده آن‌ها خاصیت مغناطیسی دارند، مواد مغناطیسی می‌نامند. نحوه‌ی سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک در مواد مغناطیسی مختلف، متفاوت است. به همین دلیل مواد از لحاظ ویژگی‌های مغناطیسی نیز با هم تفاوت دارند. در ادامه، به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می‌پردازیم.

مواد پارامغناطیس: دوقطبی‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی پارامغناطیسی دارای سمت‌گیری مشخص و منظمی نیستند و در جهت‌های کاتوره‌ای قرار دارند (شکل ۴-۲۷). در نتیجه این مواد خاصیت مغناطیسی ندارند. اگر آن‌ها را درون یک میدان مغناطیسی (مثلاً نزدیک یک آهنربا) قرار دهیم، دوقطبی‌های کوچک مانند عقربه‌های مغناطیسی در نزدیکی آهنربا رفتار می‌کنند؛ یعنی، در



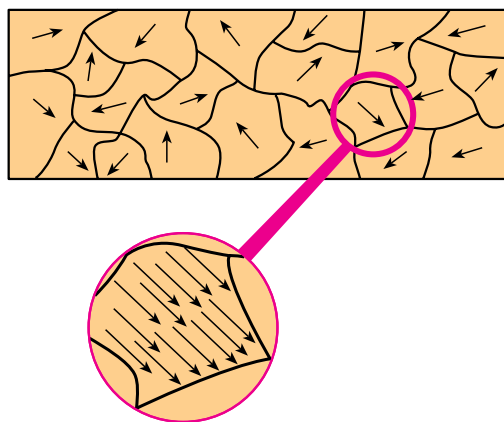
شکل ۴-۲۷- سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی در ماده‌ی پارامغناطیس در غیاب میدان مغناطیسی

راستای خط‌های میدان مغناطیسی منظم می‌شوند. هرچه میدان مغناطیسی قوی‌تر باشد، تعداد بیش‌تری از این دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک با میدان هم‌خط می‌شوند. در نتیجه، خاصیت مغناطیسی ماده بیش‌تر می‌شود.

اگر آهنربا را از این مواد دور کنیم، دوقطبی‌های مغناطیسی دوباره به سرعت به وضعیت کاتوره‌ای که در غیاب میدان داشتند، برمی‌گردند.

به این ترتیب، مواد پارامغناطیس در میدان‌های مغناطیسی قوی خاصیت مغناطیسی پیدا می‌کنند. منگنز، پلاتین، آلومینیم، فلزهای قلیایی و قلیایی خاکی، اکسیژن و اکسید ازت از جمله مواد پارامغناطیسی‌اند.

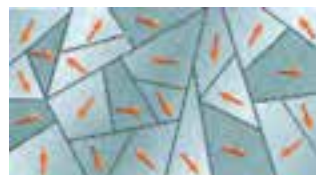
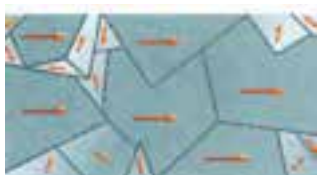
مواد فرومغناطیس: در برخی از مواد مغناطیسی، دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک به‌طور خود به خود با دوقطبی‌های مجاور خود هم‌خط می‌شوند. این گونه مواد را فرومغناطیس می‌نامند. در عمل، همه‌ی بخش‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی فرومغناطیس در یک راستا قرار ندارند بلکه این گونه مواد مانند شکل ۴-۲۸ از بخش‌های بسیار کوچکی با ابعاد خیلی کم‌تر از میلی‌متر تشکیل شده‌اند به‌طوری که دوقطبی‌های مغناطیسی درون هر بخش به‌طور کامل، هم‌خط‌اند. ولی سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی هر بخش با بخش‌های مجاور آن تفاوت دارد. هر بخش را یک حوزه‌ی مغناطیسی می‌نامند.



شکل ۴-۲۸- یک ماده‌ی فرومغناطیس در حالت طبیعی

ممکن است سمت‌گیری و اندازه‌ی حوزه‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی فرومغناطیس به‌گونه‌ای باشد که در کل اثر یک‌دیگر را خنثی کنند و ماده در مجموع، آهنربا نباشد (شکل ۴-۲۹ الف).

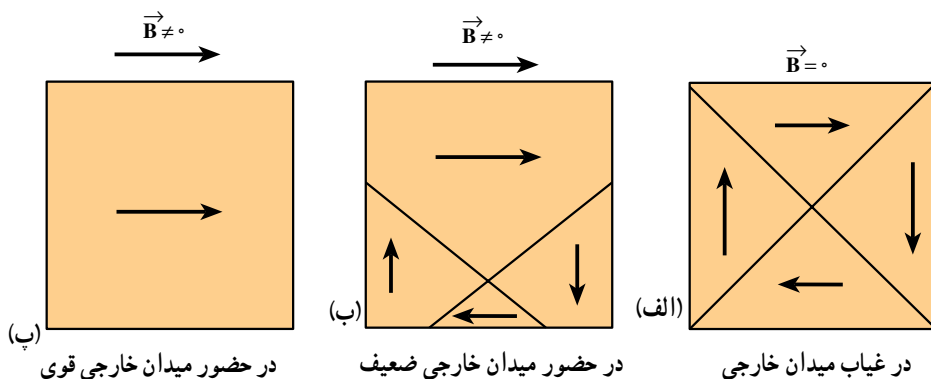
این گونه مواد را می توان با قرار دادن در یک میدان مغناطیسی آهنربا کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی بر حوزه های مغناطیسی باعث می شود که دوقطبی های مغناطیسی هر حوزه تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند و جهت آن ها به جهت میدان خارجی متمایل شود. علاوه بر این حوزه هایی که نسبت به میدان در وضع مناسبی قرار دارند (با میدان همسویند) رشد می کنند؛ یعنی، حجمشان زیاد می شود و در نتیجه، حوزه هایی که سمت گیری آن ها نسبت به میدان مناسب نیست، کوچک شوند؛ یعنی، مرز بین حوزه ها جابه جا می شود، و در نتیجه ماده در مجموع خاصیت آهنربایی پیدا می کند، شکل ۲۹-۴ ب. حرکت مرز حوزه ها در مواد فرومغناطیسی به صورت طرح وار در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. در شکل ۴-۳ الف یک ماده ی فرومغناطیسی با چهار حوزه در میدان خارجی صفر قرار دارد. سمت گیری حوزه های مغناطیسی در این شکل به صورتی است که در کل ماده دارای خاصیت مغناطیسی نیست. در شکل ۴-۳ ب ماده ی فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی \vec{B} قرار داده ایم: مرزهای حوزه ها جابه جا شده اند و در نتیجه، ماده در مجموع خاصیت مغناطیسی پیدا کرده است. در شکل ۴-۳ پ میدان مغناطیسی خارجی آن قدر قوی است که حجم حوزه های با سمت گیری نامناسب عملاً به صفر رسیده است و همه ی حجم ماده را حوزه ی با سمت گیری مناسب (همسو با میدان) اشغال کرده است. در این حالت ماده در مجموع بیش ترین خاصیت آهنربایی را دارد.



(الف) ماده ی فرومغناطیسی آهنربا نیست.

(ب) ماده ی فرومغناطیسی آهنربا است.

شکل ۲۹-۴ حوزه های مغناطیسی



شکل ۴-۳ جابه جا شدن مرزهای بین حوزه ها در مواد فرومغناطیسی

در برخی از مواد فرومغناطیس مانند آهن، کبالت و نیکل در صورتی که خالص باشند، حجم حوزه‌ها به سهولت تغییر می‌کند و در نتیجه به سهولت به روش ذکر شده آهنربا می‌شوند و خاصیت آهنربایی خود را نیز به راحتی از دست می‌دهند. این مواد را فرومغناطیس نرم می‌نامند. از این گونه مواد در هسته‌ی سیم‌لوله‌ها استفاده می‌شود. مواد فرومغناطیس نرم با حذف میدان مغناطیسی خارجی خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهند و به دلیل همین خاصیت، آن‌ها برای ساختن آهنرباهای الکتریکی (آهنرباهای غیر دائم) مناسب‌اند.

برخی دیگر از مواد مانند فولاد (آهن به اضافه‌ی دو درصد کربن)، آلیاژهای دیگری از آهن، کبالت و نیکل به سختی آهنربا می‌شوند؛ یعنی، حجم حوزه‌ها در آن‌ها به سختی تغییر می‌کند. این مواد را فرومغناطیس سخت می‌نامند. در این گونه مواد برای افزایش حجم حوزه‌هایی که سمت‌گیری مناسب دارند (یعنی با میدان همسو هستند) به میدان‌های مغناطیسی خارجی قوی‌تری نیاز است. در این مواد، سمت‌گیری دوقطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها پس از حذف میدان خارجی به سهولت تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، پس از برداشتن میدان مغناطیسی خارجی، ماده‌ی فرومغناطیس سخت، خاصیت آهنربایی خود را حفظ می‌کند. به همین دلیل این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب‌اند. برای خاصیت آهنربایی هر ماده‌ی فرومغناطیس مقدار بیشینه‌ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی پیش می‌آید که ماده‌ی فرومغناطیس در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد؛ به طوری که همه‌ی دوقطبی‌های مغناطیسی اتمی در همه‌ی حوزه‌ها به موازات هم به خط شوند.

مطالعه‌ی آزاد

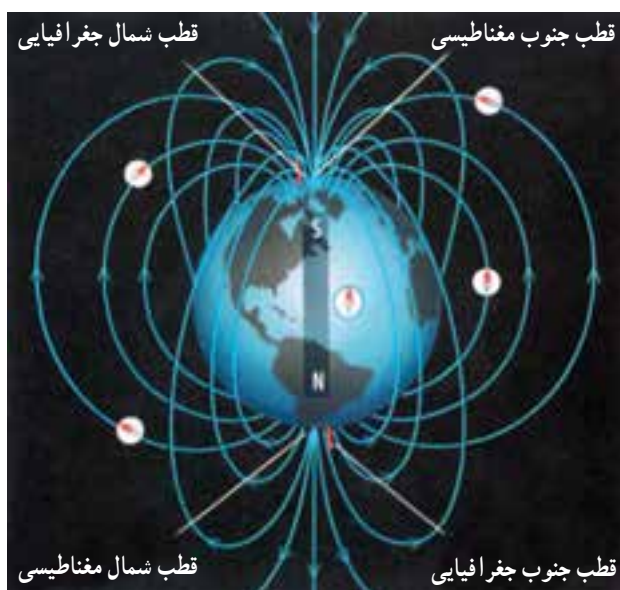
میدان مغناطیسی زمین و اثرهای آن

بشر از گذشته‌های بسیار دور به خاصیت مغناطیسی زمین پی برده است. ملاحان و جهانگردان در کارهای جاری خود همواره از قطب‌نما استفاده می‌کنند. اثرهای میدان مغناطیسی زمین نیز بر زندگی جانوران و گیاهان، موضوعی جالب و بحث‌انگیز برای پژوهشگران است. مثلاً پژوهش‌هایی در قرن بیستم نشان داد که در مغز برخی از پرندگان کوچنده، ساز و کاری جهت تشخیص راستای میدان مغناطیسی زمین موجود است. در سال ۱۹۵۸ میلادی (۱۳۳۷ هجری خورشیدی) با پژوهش‌هایی که توسط

ماهوره‌ی اکسپلورر* اول انجام گرفت، معلوم شد، در اطراف زمین ناحیه‌ای به نام کمر بند وان آلن موجود است، که دارای خاصیت مغناطیسی بوده و ذرات باردار تابیده از پرتوهای کیهانی و خورشیدی در این ناحیه به دام می‌افتند.

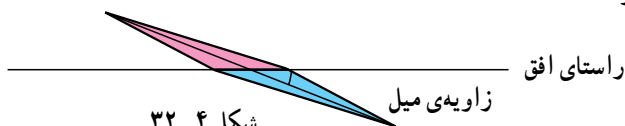
راستای میدان مغناطیسی زمین ثابت نیست و در طول قرن‌های متمادی در تغییر بوده است. اکنون قطب جنوب آن در کانادا است.

زاویه‌ای که راستای شمال - جنوب جغرافیا با راستای میدان مغناطیسی می‌سازد زاویه‌ی انحراف نام دارد.



شکل ۴-۳۱

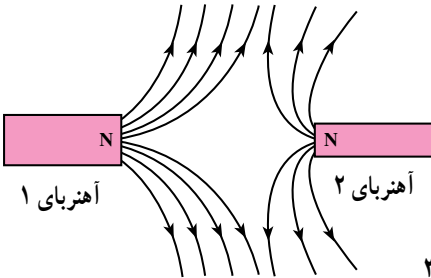
همچنین راستای میدان مغناطیسی در نقاط مختلف زمین در راستای افق قرار ندارد. زاویه‌ای که عقربه‌ی مغناطیسی با راستای افق تشکیل می‌دهد زاویه‌ی میل نام دارد.



شکل ۴-۳۲

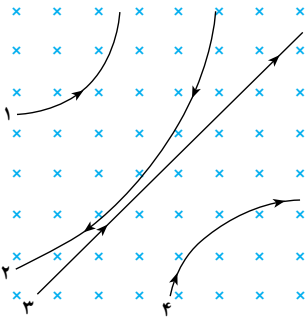
تمرین های فصل چهارم

۱- الف - آهنربایی با قطب های نامشخص در اختیار داریم. حداقل دو روش برای تعیین قطب های این آهنربا، بیان کنید.



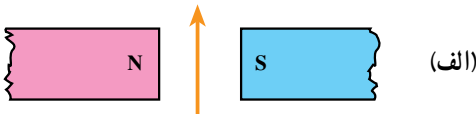
شکل ۳۳-۴

ب - خط های میدان مغناطیسی میان دو آهنربا در شکل ۳۳-۴ نشان داده شده است. کدام آهنربا ضعیف تر است؟

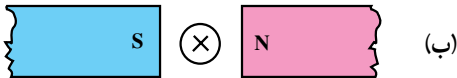


شکل ۳۴-۴

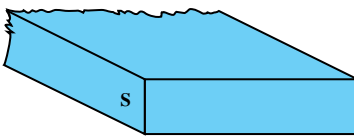
۲- چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون مسیرهایی مطابق شکل ۳۴-۴ می پیمایند. درباره ی نوع بار هر ذره چه می توان گفت؟



(الف)



(ب)



(پ)

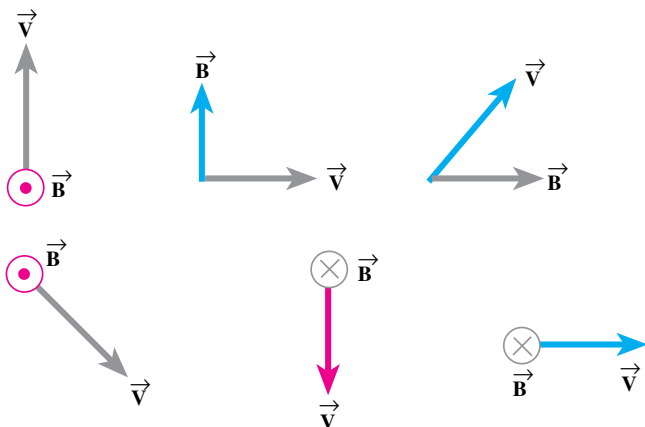
۳- سیم قائمی در میدان مغناطیسی زمین (که رو به شمال است) قرار دارد. جریانی از پایین به بالا از این سیم عبور می کند، جهت نیروی وارد بر این جریان چگونه است؟

۴- جهت نیروی الکترومغناطیسی بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل های ۳۵-۴ الف، ب و پ با استفاده از قاعده ی دست راست بیابید.



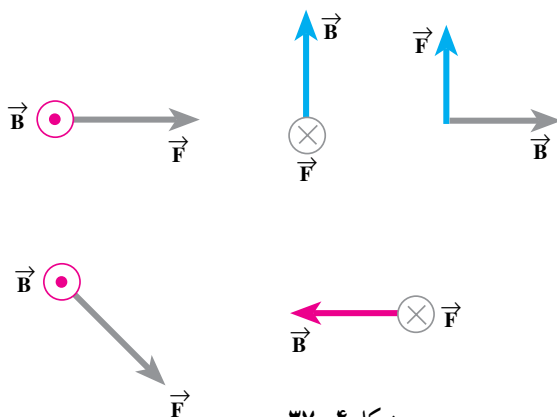
شکل ۳۵-۴

۵- جهت نیروی وارد بر بار مثبت را در هر یک از نمودارهای شکل ۳۶-۴ تعیین کنید.

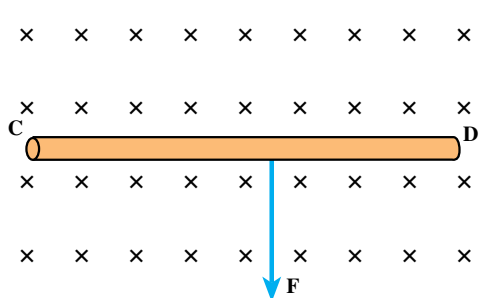


شکل ۳۶-۴

۶- نیروی \vec{F} وارد بر الکترونی که در میدان مغناطیسی \vec{B} در حرکت است در شکل ۳۷-۴ نشان داده شده است. در هر یک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید. (فرض کنید راستای حرکت الکترون بر میدان مغناطیسی عمود است.)



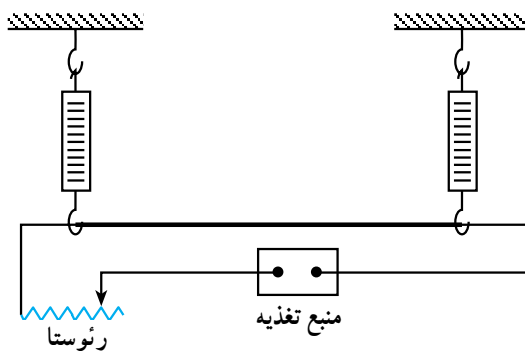
شکل ۳۷-۴



شکل ۳۸-۴

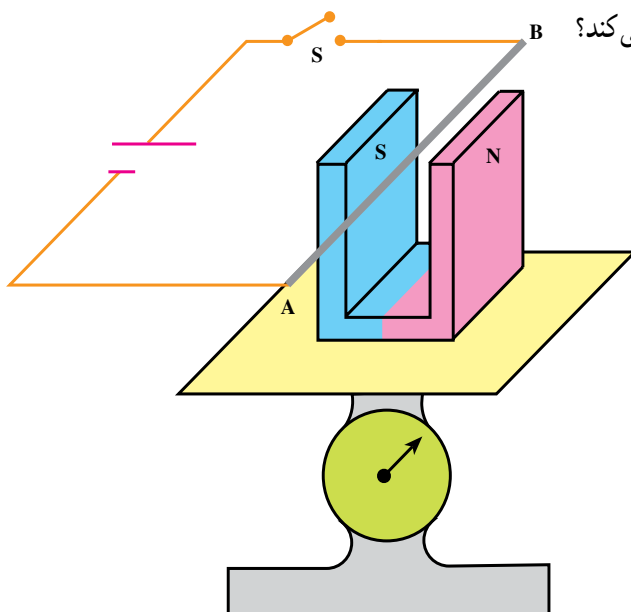
۷- سیم رسانای CD به طول ۲m مطابق شکل ۳۸-۴ عمود بر میدان مغناطیسی با اندازه $5/0 \text{ T}$ قرار گرفته است. اگر نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم برابر 1 N باشد، جهت و اندازه‌ی جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.

۸- یک سیم که حامل جریانی به شدت ۱۶ آمپر است، مطابق شکل ۴-۳۹ توسط دو نیروسنج فنری که به دو انتهای آن بسته شده است، به طور افقی و در راستای غرب به شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را افقی و یکنواخت و دقیقاً به سوی شمال با بزرگی 5 mT /° بگیرد. (الف) نیروی مغناطیسی وارد بر هر متر این سیم را تعیین کنید. (ب) اگر بخواهیم نیروسنج‌ها عدد صفر را نشان دهند، چه جریانی و در چه جهتی باید از سیم عبور دهیم؟ جرم یک متر از طول این سیم 8 gr است. ($g = 10 \text{ N/kg}$)



شکل ۴-۳۹

۹- یک آهنربای نعلی شکل را روی کفه‌ی یک ترازوی حساس قرار می‌دهیم، سیم AB را که مطابق شکل ۴-۴۰ در میان دو قطب آهنربا قرار دارد به وسیله‌ی یک کلید به دو پایانه‌ی یک باتری وصل می‌کنیم. آیا با بستن کلید عددی که ترازو نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ توضیح دهید.



شکل ۴-۴۰

۱۰- پروتونی با سرعت $4/4 \times 10^6$ m/s تحت زاویه 53° با میدان مغناطیسی ای به بزرگی 18 mT در حرکت است.

الف) بزرگی نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

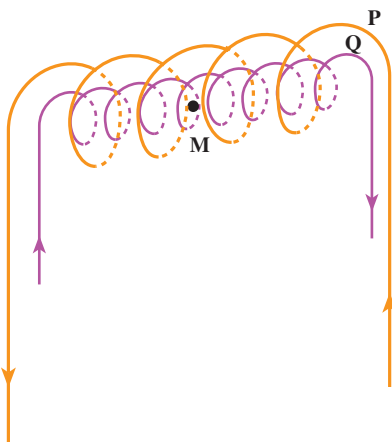
ب) اگر این نیرو تنها نیرویی باشد که بر پروتون وارد می‌شود، شتاب پروتون را حساب کنید.
(بار الکتریکی پروتون $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ و جرم آن $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ است).

۱۱- راستای نیروی وارد بر یک الکترون متحرک در میدان الکتریکی را با راستای نیروی وارد بر این الکترون در میدان مغناطیسی مقایسه کنید.

۱۲- از پیچه‌ی مسطحی به شعاع 5 cm که از 20° دور سیم نازک درست شده است، جریان 12 A می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه حساب کنید.

۱۳- سیم‌لوله‌ای شامل 25° دور حلقه است که دور یک لوله‌ی پلاستیکی تو خالی به طول 14° متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیم‌لوله 8 A باشد، بزرگی میدان مغناطیسی در درون سیم‌لوله را حساب کنید.

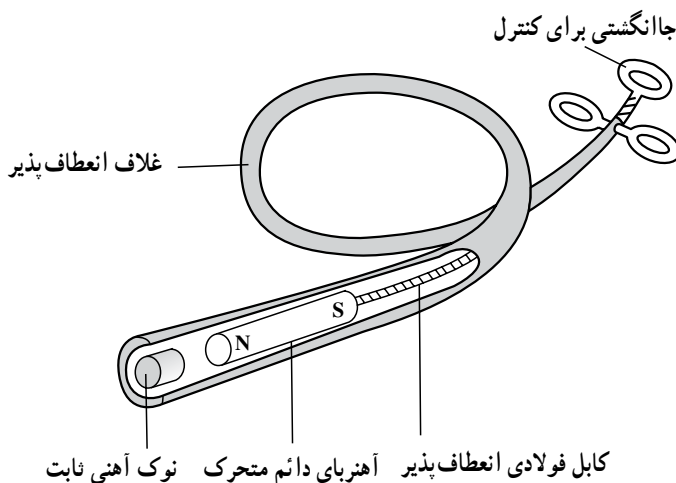
۱۴- دو سیم‌لوله‌ی P و Q هم محور دارای طول برابر ولی تعداد دور متفاوت هستند (شکل ۴-۴۱). تعداد دور سیم‌لوله‌ی P برابر 20° و تعداد دور سیم‌لوله‌ی Q برابر 30° است. اگر جریان 1 A از سیم‌لوله‌ی Q عبور کند، از سیم‌لوله‌ی P چه جریانی باید عبور کند تا برآیند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیم‌لوله در نقطه‌ی M (روی محور دو سیم‌لوله) برابر صفر شود؟



شکل ۴-۴۱

۱۵- الکترونی با سرعت $2/4 \times 10^5 \text{ m/s}$ در یک میدان مغناطیسی در حرکت است. نیرویی که از طرف میدان مغناطیسی بر این الکترون وارد می‌شود، هنگامی بیشینه است که الکترون به سمت جنوب حرکت کند. (الف) اگر این نیروی بیشینه بالاسو و برابر $6/8 \times 10^{-14} \text{ N}$ باشد، بزرگی و جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید. (ب) چه میدان الکتریکی همین نیرو را ایجاد می‌کند؟ (بار الکتریکی الکترون $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ است).

۱۶- کودکی یک قطعه‌ی کوچک فلز را بلعیده است که در گلوی او گیر کرده است. پزشک با دستگاهی که در شکل ۴۲-۴ دیده می‌شود، می‌خواهد فلز را بیرون بیاورد.



شکل ۴۲-۴

الف) هنگامی که آهنربای دائم به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟
 ب) آهن برای ساختن نوک ثابت چه مزیتی دارد؟
 پ) این وسیله را باید به درون گلوی کودک وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد. چرا غلاف باید انعطاف پذیر باشد؟
 ت) پزشک می‌خواهد یک گیره‌ی آهنی کاغذ و یک واشر آلومینیومی را از گلوی کودک بیرون بیاورد. کدامیک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟

۵



القای الکترومغناطیسی مبنای تولید انرژی الکتریکی در مولدهای جریان متناوب است. برای انتقال انرژی الکتریکی تا فاصله‌های خیلی دور از خطوط انتقال با ولتاژ بالا استفاده می‌شود.

القای الکترو مغناطیسی

۵-۱- پدیده‌ی القای الکترو مغناطیسی

در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که با استفاده از روش القای الکتریکی می‌توان اجسام رسانا را باردار کرد. در فصل قبل نیز با پدیده‌ی القای مغناطیسی آشنا شدیم. در پدیده‌ی اول در اثر القا، بار الکتریکی در ماده‌ی رسانا پدیدار می‌شود. در پدیده‌ی دوم، در اثر القا در ماده‌ی فرومغناطیس خاصیت مغناطیسی ایجاد می‌شود. پدیده‌ی القایی دیگری نیز وجود دارد که در آن، جریان الکتریکی در یک رسانا القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده آشنا می‌شوید.

آزمایش ۵-۱

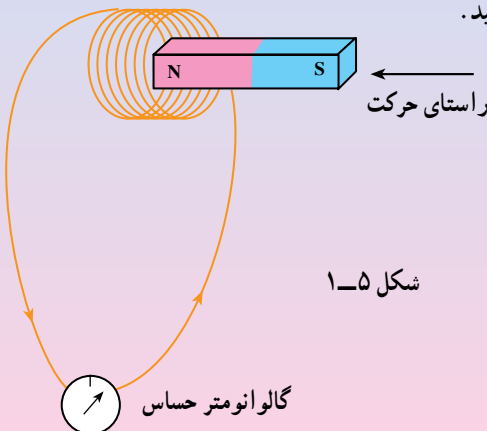
وسایله‌های آزمایش: میلی آمپرسنج صفر وسط (گالوانومتر)، آهنربای میله‌ای، پیچه و سیم رابط.

۱- با پیچه و گالوانومتر مداری مانند شکل ۵-۱ را ببندید.

۲- قطب N آهنربای میله‌ای را مطابق شکل به پیچه نزدیک کنید. آن چه را که در حین انجام دادن این عمل می‌بینید، یادداشت کنید.

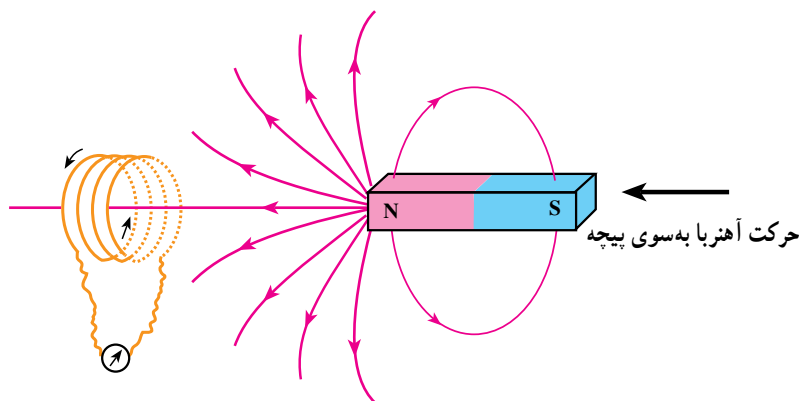
۳- قطب N آهنربای میله‌ای را نزدیک پیچه نگه دارید. سپس آن را از پیچه دور کنید. آن چه را مشاهده می‌کنید، بنویسید.

۴- بندهای ۲ و ۳ را با قطب S آهنربا نیز انجام دهید.



در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند امریکایی، با انجام دادن آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۱-۵ دریافتند که با دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه‌ی میلی آمپرسنج منحرف می‌شود، و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ مانند وقتی که در مدار یک مولد وجود داشته باشد. یعنی با حرکت آهنربا نسبت به پیچه، یک جریان الکتریکی در مدار القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی و جریان تولید شده را جریان الکتریکی القایی می‌نامند. القای الکترومغناطیسی اساس کار مولد جریان متناوب، دینام، مبدل‌ها و بسیاری از وسیله‌های الکتریکی است.

دور یا نزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می‌شود (شکل ۲-۵) و همین امر جریان الکتریکی القایی را در پیچه ایجاد می‌کند. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که: تغییر اندازه‌ی میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می‌شود.



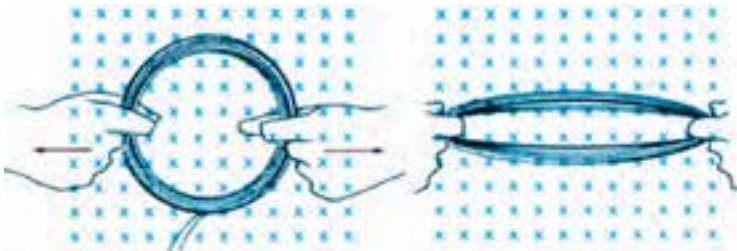
شکل ۲-۵

آزمایش نشان می‌دهد که علاوه بر روش گفته شده، به روش‌های دیگر نیز می‌توان در یک پیچه جریان الکتریکی القا کرد.

اگر پیچه‌ای از یک سیم انعطاف پذیر را مطابق شکل ۳-۵ در میدان مغناطیسی یکنواخت B قرار دهیم، سپس پیچه را تغییر شکل دهیم به گونه‌ای که مساحت حلقه‌ی پیچه تغییر کند، خواهیم دید که در حین این عمل جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که:

تغییر مساحت مدار بسته در میدان مغناطیسی نیز می‌تواند عامل ایجاد جریان القایی

شود.



شکل ۳-۵- با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

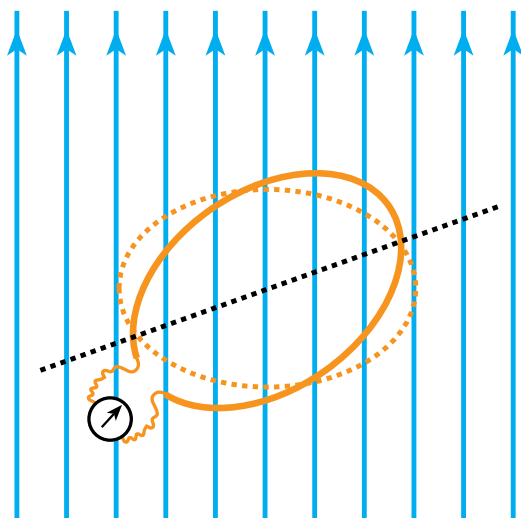
با انجام دادن فعالیت زیر، با یک روش دیگر ایجاد جریان الکتریکی القایی آشنا می‌شوید.

فعالیت ۱-۵

یک آهنربای میله‌ای را در نزدیکی یک پیچه قرار دهید. بدون آنکه فاصله‌ی آهنربا از پیچه را تغییر دهید، پیچه را بچرخانید. هر تغییری را که در گالوانومتر مشاهده می‌کنید، بنویسید.

با چرخاندن پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت مطابق شکل ۴-۵، بزرگی میدان مغناطیسی و مساحت حلقه‌ی مدار تغییر نمی‌کند، ولی زاویه‌ی بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. از این فعالیت نیز می‌توان نتیجه گرفت که:

تغییر زاویه‌ی بین حلقه و راستای میدان مغناطیسی نیز می‌تواند عامل برقراری جریان الکتریکی القایی شود.



شکل ۴-۵- در حین چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه‌ی بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

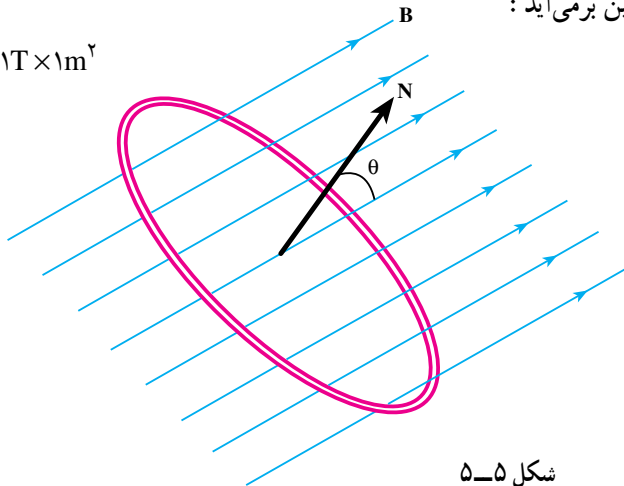
۵-۲- شار مغناطیسی

در آزمایش‌های قبل دیدیم که در اثر تغییر میدان مغناطیسی در حلقه، تغییر مساحت حلقه، و یا تغییر زاویه‌ی بین سطح حلقه و جهت میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. کمیتی به نام شار مغناطیسی، این سه کمیت را دربر دارد. این کمیت نرده‌ای به صورت زیر معرفی می‌شود. فرض کنید حلقه‌ای به مساحت A مطابق شکل ۵-۵ در میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارد. شار میدان مغناطیسی یکنواخت* که از سطح حلقه می‌گذرد به صورت زیر تعریف و با نماد Φ نمایش داده می‌شود.

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۵-۱)$$

که در این رابطه، θ زاویه‌ی بین بردار میدان مغناطیسی \vec{B} و نیم خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم خط را می‌توان به طور اختیاری در هر یک از دو طرف سطح حلقه رسم کرد، ولی در هر مورد پس از انتخاب دیگر جهت آن را نباید عوض کرد). یکای شار مغناطیسی در SI وِبر (Wb) است. از معادله‌ی ۵-۱ چنین برمی‌آید:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$$



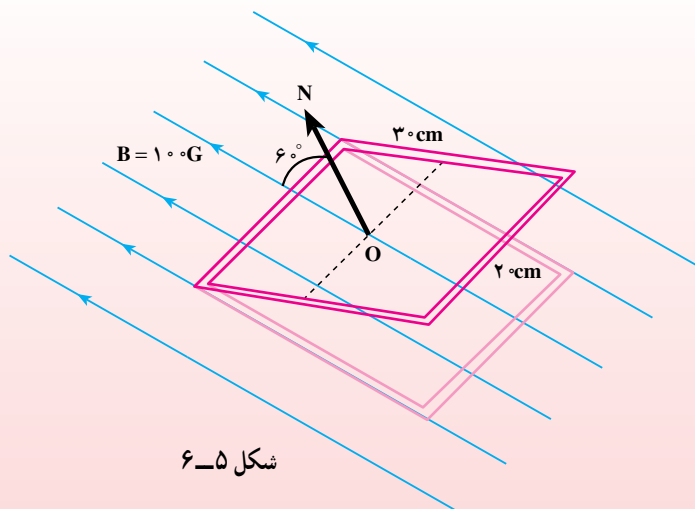
شکل ۵-۵

مثال ۵-۱

الف) شار مغناطیسی عبوری از سطح یک قاب مستطیلی شکل به ابعاد $3 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ که خط عمود بر آن با میدان مغناطیسی یکنواخت صد گاؤس مطابق

* اگر میدان مغناطیسی یکنواخت نباشد، رابطه‌ی مربوط به شار مغناطیسی پیچیده‌تر می‌شود. این رابطه فراتر از سطح برنامه این کتاب است.

شکل ۵-۶ زاویه‌ی 6° می‌سازد را به‌دست آورید.
 ب) اگر این قاب را بچرخانیم به‌طوری که زاویه‌ی خط عمود بر آن با خط‌های میدان مغناطیسی از 6° به 3° کاهش یابد، شار مغناطیسی چه‌قدر تغییر می‌کند؟



حل: الف) نیم خط ON را مطابق شکل عمود بر سطح رسم می‌کنیم. زاویه‌ی بین خط‌های میدان و نیم خط ON برابر 6° است؛ بنابراین داریم:

$$A = 3 \times 2 = 6 \text{ cm}^2 = 6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$B = 1.0 \text{ G} = 10^{-2} \text{ T}$$

$$\Phi = BA \cos \theta = 10^{-2} \times 6 \times 10^{-2} \cos 6^\circ = 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

ب) در وضعیت جدید داریم:

$$\theta = 3^\circ$$

در نتیجه، به‌دست می‌آوریم:

$$\Phi = BA \cos \theta = 10^{-2} \times 6 \times 10^{-2} \cos 3^\circ$$

$$\Phi = 5/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

تغییر شار حاصل از این چرخش برابر است با:

$$\Delta \Phi = 5/2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$$

$$\Delta \Phi = 2/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

تمرین ۵-۱

حلقه‌ای به مساحت 5 cm^2 در یک میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارد. با فرض این که خط‌های میدان مغناطیسی \vec{B} عمود بر سطح حلقه باشند، اگر بزرگی میدان مغناطیسی بدون تغییر جهت آن به اندازه 3 T افزایش یابد، شار مغناطیسی که از سطح حلقه می‌گذرد، چه قدر تغییر می‌کند؟

با انجام دادن آزمایش‌ها و فعالیت‌های پیش درمی‌یابیم که تغییر هریک از کمیت‌های A ، B و زاویه‌ی بین B و نیم‌خط عمود بر سطح باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، و تغییر شار مغناطیسی باعث ایجاد جریان الکتریکی القایی در مدار می‌شود. درست شبیه به وضعیتی که یک مولد در مدار باشد، و نیروی محرکه‌ی آن جریانی در مدار ایجاد کرده باشد. علاوه بر این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که هر چه تغییر شار سریع‌تر اتفاق افتد، جریان القایی و نیروی محرکه‌ی القایی بزرگ‌تر خواهد شد. مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۵-۲ تا ۵-۴ هر چه حرکتی که باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربه‌ی گالوانومتر بیش‌تر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان بزرگ‌تری به وجود آمده است.

لنز، فیزیکدان آلمانی روس‌تبار، و فارادی پدیده‌ی القای الکترومغناطیسی را فرمول‌بندی کردند، و قانون‌های القای الکترومغناطیسی را بیان کردند.

۵-۳ قانون القای الکترومغناطیسی فارادی

بنابر قانون فارادی هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است.

یعنی هرچه آهنگ تغییر شار مغناطیسی بیش‌تر باشد، نیروی محرکه‌ی القایی و در نتیجه جریان ایجاد شده در مدار بیش‌تر خواهد بود. قانون فارادی را می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد.

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (5-2)$$

در این رابطه، \mathcal{E} نیروی محرکه‌ی القایی برحسب ولت و $\frac{d\Phi}{dt}$ آهنگ تغییر شار مغناطیسی (یعنی مشتق شار نسبت به زمان) برحسب وبر بر ثانیه $(\frac{\text{Wb}}{\text{s}})$ است. علامت منفی نشان‌دهنده‌ی جهت

نیروی محرکه‌ی القایی است که در بخش بعد در مورد آن بیش‌تر سخن می‌گوییم.

نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه: هر پیچه را می‌توان به صورت چند حلقه سیم که به‌طور متوالی به هم بسته شده‌اند، در نظر گرفت. تغییر شار مغناطیسی در هر حلقه‌ی پیچه نیروی محرکه‌ای القا می‌کند. نیروی محرکه‌ی القایی کل، برابر مجموع نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه‌هاست. به بیان دیگر، نیروی محرکه‌ی القایی در هر پیچه با تعداد دورهای پیچه (N) نیز نسبت مستقیم دارد؛ یعنی،

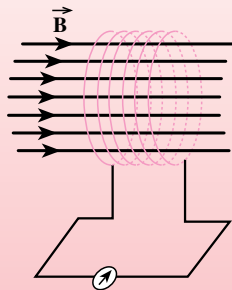
$$\varepsilon = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-5)$$

اگر شار مغناطیسی که از پیچه‌ای با N حلقه می‌گذرد در بازه‌ی زمانی Δt به اندازه‌ی Φ تغییر کرده باشد، آهنگ متوسط تغییر شار مغناطیسی در بازه‌ی زمانی Δt برابر $\frac{\Phi}{\Delta t}$ خواهد بود. نیروی محرکه‌ی القایی متوسط (که با $\bar{\varepsilon}$ نمایش داده می‌شود) ایجاد شده در این پیچه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\bar{\varepsilon} = N \frac{\Phi}{\Delta t} \quad (4-5)$$

مثال ۲-۵

پیچه‌ای شامل 200 دور سیم با مساحت سطح مقطع 2 سانتی‌متر مربع مطابق شکل ۷-۵ در میدان مغناطیسی یکنواختی قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که خط‌های میدان بر سطح آن عمود است. بزرگی میدان مغناطیسی در بازه‌ی زمانی $3/2$ میلی ثانیه و بدون تغییر جهت از 18 mT به 22 mT می‌رسد. اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط چه قدر است؟



شکل ۷-۵

حل: ابتدا شاری را که در دو حالت اولیه و نهایی از پیچه می‌گذرد، محاسبه می‌کنیم.

$$\Phi_1 = B_1 A \cos \theta = 18 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-4} \times \cos 0^\circ = 3.6 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$\Phi_2 = B_2 A \cos \theta = 22 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-4} \times \cos 0^\circ = 4.4 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

تغییر شار مغناطیسی که از سطح پیچه می‌گذرد، برابر است با :

$$\Phi_2 - \Phi_1 = 4/4 \times 10^{-5} - 3/6 \times 10^{-5} = 0/8 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

این تغییر شار در بازه‌ی زمانی $3/2 \times 10^{-3}$ ثانیه روی داده است؛ بنابراین،
آهنگ متوسط تغییر شار برابر است با :

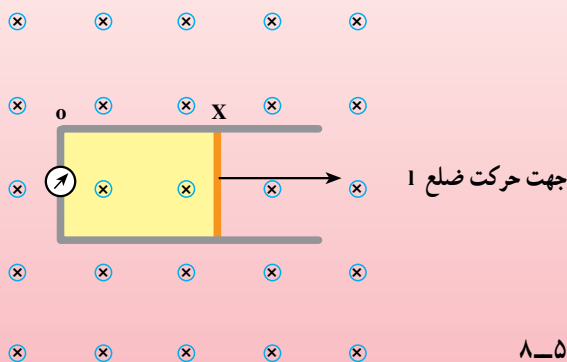
$$\frac{\Phi}{\Delta t} = \frac{0/8 \times 10^{-5}}{3/2 \times 10^{-3}} = 2/5 \times 10^{-3} \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$$

در نتیجه بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط برابر است با :

$$|\bar{\varepsilon}| = \left| N \frac{\Phi}{\Delta t} \right| = \left| 200 \times 2/5 \times 10^{-3} \right| = 0/5 \text{ V}$$

مثال ۳-۵

قاب مستطیلی شکلی که از سیم بدون روکش ساخته شده است مطابق شکل ۵-۸ در میدان مغناطیسی یکنواخت و ثابت با بزرگی $0/18 \text{ T}$ قرار گرفته است. سطح حلقه بر میدان مغناطیسی عمود است. اگر ضلع $l = 20 \text{ cm}$ با سرعت $v = 20 \text{ m/s}$ در جهتی که در شکل نشان داده شده است حرکت کند بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی را محاسبه کنید.



شکل ۵-۸

حل: بنابر قانون فارادی، نیروی محرکه‌ی القایی برابر است با $\frac{d\Phi}{dt}$ ، $\varepsilon =$ که

در آن Φ ، شار مغناطیسی که از حلقه می‌گذرد، برابر است با :

$$\Phi = AB \cos \theta$$

در این مسئله، B بزرگی میدان مغناطیسی ثابت است، همچنین θ زاویه‌ی میدان مغناطیسی با نیم خط عمود بر حلقه ثابت و برابر صفر است و $\cos \theta = 1$ ، و تنها مساحت حلقه با زمان تغییر می‌کند. مساحت حلقه در هر لحظه برابر است با :

$$A = lx = lvt$$

در نتیجه آهنگ تغییر مساحت با زمان از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d(lvt)}{dt} = lv$$

در نتیجه، داریم :

$$|\mathcal{E}| = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| \frac{d}{dt} (AB) \right| = B \frac{dA}{dt}$$

$$|\mathcal{E}| = lvB = 0.2 \times 2.0 \times 0.18$$

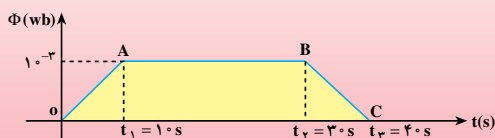
$$= 0.072 \text{ V} = 72 \text{ mV}$$

تمرین ۲-۵

میدان مغناطیسی عمود بر یک قاب دایره‌ای شکل به قطر 20 سانتی‌متر با زمان تغییر می‌کند و در مدت $5/0$ s از $28/0$ تسلا به $12/0$ تسلا می‌رسد (تغییر علامت نشان می‌دهد که جهت میدان نیز وارون شده است). نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در حلقه را حساب کنید.

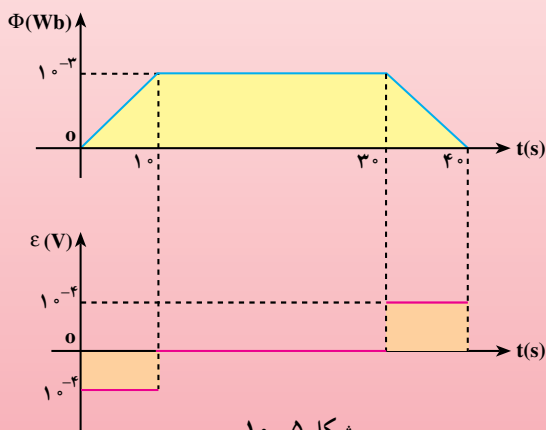
مثال ۴-۵

نمودار تغییرات شار مغناطیسی که از یک حلقه می‌گذرد برحسب زمان در منحنی شکل ۹-۵ داده شده است. نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القا شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.



شکل ۹-۵

حل: نمودار تغییرات شار مغناطیسی برحسب زمان نشان می‌دهد که در بازه‌ی زمانی $\Delta t_1 = t_1 - 0$ شار به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. در نتیجه، در این بازه نیروی محرکه‌ی القایی که برابر است با $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ ، مقداری ثابت (برابر شیب خط OA) و منفی خواهد داشت و مقدار آن برابر است با 10^{-4} ولت. در بازه‌ی زمانی $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ شار ثابت مانده است. بنابراین، $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ و نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه برابر صفر است. در بازه‌ی زمانی $\Delta t_3 = t_3 - t_2$ ، شار به‌صورت خطی کاهش یافته است، $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ ؛ و در نتیجه، نیروی محرکه‌ی القایی در این بازه مثبت است و مقدار آن برابر است با 10^{-4} ولت. نمودار این تغییرات در شکل ۵-۱۰ رسم شده است.



شکل ۵-۱۰

۵-۴- محاسبه‌ی جریان القایی

دیدیم که نیروی محرکه‌ی القایی در پیچه (و یا در حلقه) جریانی تولید می‌کند که به آن جریان القایی گفته می‌شود. اگر مقاومت پیچه برابر R باشد، جریان القا شده در آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

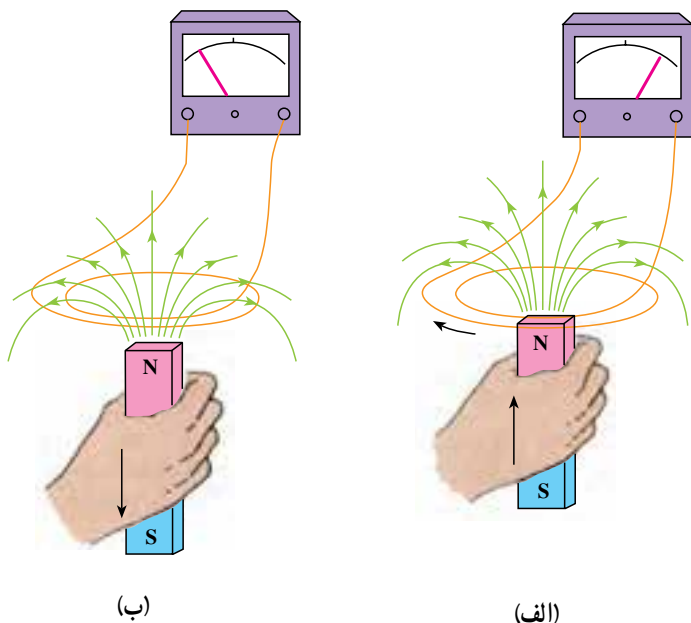
$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (5-5)$$

قانون لنز که به‌صورت زیر بیان می‌شود، در واقع دستورالعملی است برای تعیین جهت جریان القایی.

جریان القایی در مدار در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن با عامل

به وجود آورنده‌ی جریان القایی یعنی تغییر شار مغناطیسی مخالفت می‌کند.

علامت منفی در رابطه‌ی ۵-۵ نشان‌دهنده‌ی همین مخالفت است. در عمل، برای به دست آوردن جهت جریان القایی در یک مدار از قانون لنز استفاده می‌شود. به عنوان مثال، اگر قطب N یک آهنربای میله‌ای را مطابق شکل ۵-۱۱ الف به یک پیچه نزدیک کنیم، شار مغناطیسی که از پیچه می‌گذرد، به دلیل قوی‌تر شدن میدان در محل پیچه، افزایش می‌یابد. جهت جریان القایی در پیچه همان‌طور که در شکل ۵-۱۱ الف نشان داده شده است در جهتی است که میدان مغناطیسی حاصل از آن در خلاف جهت میدان آهنربای میله‌ای باشد، تا با افزایش شار مغناطیسی که از پیچه می‌گذرد مخالفت کند. یعنی قطب N آهنربا را به عقب براند.



شکل ۵-۱۱- جریان القایی در جهتی است که با حرکت آهنربا به طرف پیچه مخالفت می‌کند.

تمرین ۵-۳

قطب N یک آهنربای میله‌ای را مطابق شکل ۵-۱۱ ب از پیچه دور می‌کنیم، با استفاده از قانون لنز جهت جریان القایی را در پیچه تعیین کنید.

مثال ۵-۶

سیملوله‌ای با 500Ω دور و مقاومت الکتریکی 10Ω و مساحت سطح مقطع 25 cm^2 در یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. برای اینکه جریانی به شدت 1 mA در سیملوله القا شود، میدان مغناطیسی با چه آهنگی باید تغییر کند؟ فرض کنید سطح مقطع سیملوله بر میدان مغناطیسی عمود است.

حل: زاویه‌ی بین میدان و خط عمود بر سطح سیملوله صفر است، در نتیجه داریم:

$$\Phi = BA$$

چون مساحت هر حلقه‌ی سیملوله ثابت است، تغییر Φ در اثر تغییر در بزرگی میدان مغناطیسی است. در نتیجه تغییر شار مغناطیسی برابر است با:

$$\Phi = A\Delta B$$

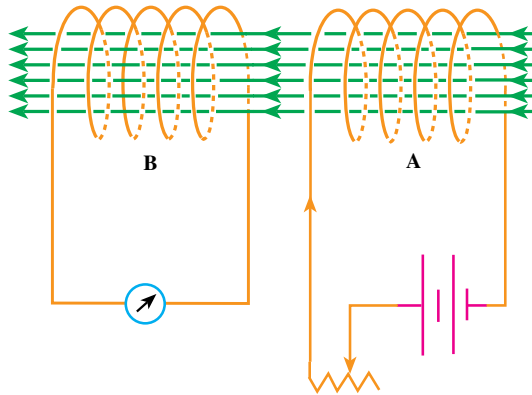
از سوی دیگر، با توجه به رابطه‌ی ۴-۵ اندازه‌ی جریان القایی برابر است با:

$$\begin{aligned} I &= \left| \frac{N}{R} \frac{\Phi}{\Delta t} \right| = \left| \frac{N}{R} \frac{A\Delta B}{\Delta t} \right| \\ &= \frac{NA}{R} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| \\ 10^{-3} \text{ A} &= \frac{500 \times 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{10 \Omega} \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| \\ \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| &= 8 \times 10^{-3} \text{ T/s} \end{aligned}$$

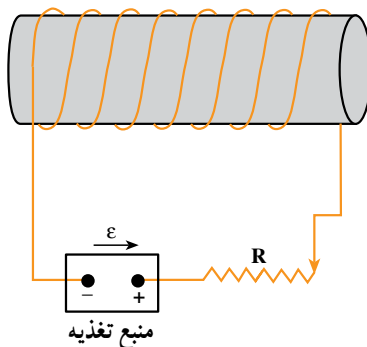
۵-۵- خود القایی

در آزمایش‌ها و فعالیت‌هایی که از ابتدای این فصل تا این‌جا انجام داده‌اید، همواره یک عامل خارجی باعث تغییر شار مغناطیسی و در نتیجه، القای نیروی محرکه و جریان الکتریکی در مدار شده است. برای مثال در شکل ۵-۲ تغییر جریان در مدار A باعث تغییر شار مغناطیسی در سیملوله‌ی B و ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در مدار B می‌شود. در ادامه به بررسی این موضوع می‌پردازیم که: تغییر جریان الکتریکی در یک مدار حتی در خود مدار نیروی محرکه‌ای را القای می‌کند. برای این کار مداری مطابق شکل ۵-۱۳ در نظر بگیرید.

فرض کنید که روستا با بیش‌ترین مقاومت در مدار قرار گرفته است و جریان ثابتی از مدار



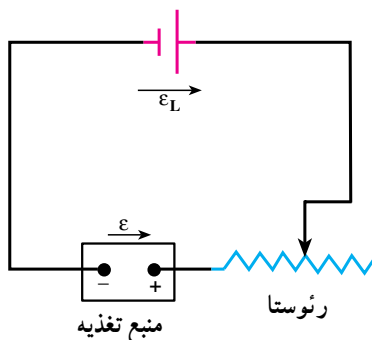
شکل ۵-۱۲- تغییر جریان در سیملوله ی A باعث ایجاد جریان در سیملوله ی B می شود.



شکل ۵-۱۳- خودالقایی - تغییر جریان در مدار نیروی محرکه ای در خود سیملوله القا می کند.

می گذرد. در نتیجه، شار مغناطیسی ثابت Φ از سیملوله می گذرد. حال اگر مقاومت رئوستا را به تدریج کاهش دهیم، جریان در سیملوله افزایش می یابد. در مدتی که جریان در حال افزایش است، شار مغناطیسی که از سیملوله می گذرد افزایش پیدا می کند. بنابر قانون فارادی این تغییر شار باعث ایجاد نیروی محرکه ی القایی در خود مدار می شود. روشن است که در تمام مدتی که جریان ثابتی از مدار می گذرد، چون شار مغناطیسی تغییر نمی کند نیروی محرکه ی القایی وجود ندارد. به این پدیده که تغییر جریان در یک مدار باعث ایجاد نیروی محرکه ی القایی در همان مدار می شود خودالقایی می گویند. در این مثال، جهت این نیروی محرکه ی القایی چنان است که می خواهد مانع افزایش شار مغناطیسی ای شود که منبع تغذیه ایجاد می کند. افزایش شار مغناطیسی به دلیل افزایش شدت جریانی است که از مدار می گذرد، در نتیجه نیروی محرکه ی القایی در واقع در جهتی است که با افزایش شدت جریان

مقابله می‌کند. به عبارت دیگر در این حالت نیروی محرکه‌ی القایی معادل نیروی محرکه‌ی باتری‌ای عمل می‌کند که در جهت مخالف منبع تغذیه مانند شکل ۱۴-۵ در مدار قرار گرفته باشد.



شکل ۱۴-۵- خودالقایی باعث می‌شود که سیم‌لوله مانند پیل ε در مدار عمل کند.

۲-۵ فعالیت

با بحث در گروه خود، نتیجه‌ی آزمایشی را پیش‌بینی کنید که در آن مشابه آزمایش بالا عمل شود؛ با این تفاوت که به جای کاهش مقاومت مدار، آن را افزایش دهند. دلیل وجود نیروی محرکه‌ی القایی و جهت آن را نیز مورد بحث قرار دهید.

به این ترتیب، دریافتیم که :

هرگاه جریانی که از یک سیم‌لوله (یا یک پیچ) می‌گذرد، تغییر کند، در آن نیروی محرکه‌ای به وجود می‌آید که با عامل تغییر جریان مخالفت می‌کند و به آن نیروی محرکه‌ی خودالقایی گفته می‌شود. این پدیده را خودالقایی می‌نامند.

ضریب خودالقایی (یا القاییدگی): در پدیده‌ی خودالقایی، در اثر عبور یک جریان الکتریکی متغیر از سیم‌لوله، میدان مغناطیسی متغیری به وجود می‌آید. بزرگی این میدان در هر لحظه متناسب با جریانی است که در آن لحظه از سیم‌لوله می‌گذرد (به عنوان مثال رابطه‌های ۷-۴ و ۹-۴ را ملاحظه کنید)، یعنی :

$$B \propto I$$

این میدان مغناطیسی متغیر، شار مغناطیسی متغیری را از سیم‌لوله عبور می‌دهد که با میدان مغناطیسی متناسب است و در نتیجه با شدت جریانی که از سیم‌لوله می‌گذرد متناسب است، یعنی

$$\Phi_B \propto I$$

اگر ضریب تناسب را با نماد b نشان دهیم، داریم :

$$\Phi = bI$$

این شار مغناطیسی متغیر در هر حلقه‌ی سیملوله (یا پیچه) نیروی محرکه‌ای القا می‌کند که به صورت زیر است :

$$\varepsilon_1 = \frac{d\Phi}{dt}$$

یا :

$$\varepsilon_1 = b \frac{dI}{dt}$$

در نتیجه اگر سیملوله دارای N حلقه باشد، نیروی محرکه‌ای القا شده در سیملوله برابر خواهد بود با :

$$\varepsilon_L = N\varepsilon_1$$

$$\varepsilon_L = Nb \frac{dI}{dt}$$

اگر $Nb = L$ قرار دهیم، نیروی محرکه‌ی خودالقایی سیملوله به صورت زیر نوشته می‌شود :

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (5-5)$$

L از مشخصات ساختمانی سیملوله است (به تعداد حلقه‌ها، طول سیملوله و... بستگی دارد) و ضریب خودالقایی یا القاییدگی سیملوله نام دارد. یکای خودالقایی «هانری» نام دارد که آن را با نماد H نمایش می‌دهند. یک هانری ضریب خودالقایی سیملوله‌ای است که هرگاه جریانی که از آن عبور می‌کند با آهنگ یک آمپر بر ثانیه تغییر کند، نیروی محرکه‌ای برابر یک ولت در آن القا شود.

به هر قسمتی از یک مدار که خاصیت خودالقایی داشته باشد، القاگر می‌گویند. پیچه و سیملوله در مداری با جریان متغیر القاگرند.

مثال ۵-۷

از سیملوله‌ای به ضریب خودالقایی $4H$ ، جریان متغیری می‌گذرد که با زمان به صورت $I = 4t - 3$ تغییر می‌کند (I بر حسب آمپر و t بر حسب ثانیه است). بزرگی نیروی محرکه‌ی القا شده را محاسبه کنید.

حل: داریم

$$|\varepsilon| = \left| L \frac{dI}{dt} \right|$$

$\frac{dI}{dt}$ را از رابطه‌ی جریان برحسب زمان که در مسئله داده شده محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(4t - 3) = 4 \text{ A/s}$$

در نتیجه، به دست می‌آوریم

$$|\varepsilon| = 0.4 \times 4 = 1.6 \text{ V}$$

محاسبه‌ی ضریب خودالقایی سیملوله: در فصل ۴ دیدیم که میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریانی به شدت I از سیملوله‌ای به طول l که دارای N حلقه است، در داخل سیملوله یکنواخت و موازی با محور سیملوله است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{NI}{l}$$

علاوه بر این دیدیم که اگر سیملوله دارای هسته‌ای باشد، میدان مغناطیسی سیملوله تقویت می‌شود. میدان مغناطیسی سیملوله‌ای که هسته داشته باشد، در داخل سیملوله از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$B = k\mu_0 \cdot \frac{N}{l} I \quad (5-6)$$

که در آن k ضریبی است که به جنس هسته‌ی داخل سیملوله بستگی دارد و به آن تراوایی نسبی مغناطیسی هسته می‌گویند. با توجه به آن که میدان مغناطیسی در داخل سیملوله یکنواخت و موازی با محور سیملوله است، شار مغناطیسی حاصل از آن که از سیملوله می‌گذرد برابر است با:

$$\Phi_{AB} = k\mu_0 \cdot \frac{NA}{l} I \quad (5-7)$$

نیروی محرکه‌ی خودالقایی برابر است با:

$$\varepsilon_L = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5-8)$$

با قرار دادن Φ از رابطه‌ی ۵-۷ در رابطه‌ی ۵-۸ به دست می‌آوریم:

$$\varepsilon_L = N \frac{d}{dt} \left(k\mu_0 \frac{NA}{l} I \right)$$

یعنی :

$$\varepsilon_L = k\mu_0 \frac{N^2 A}{l} \frac{dI}{dt} \quad (9-5)$$

از مقایسه‌ی رابطه‌های ۵-۵ و ۹-۵ به دست می‌آوریم :

$$L = k\mu_0 \frac{N^2 A}{l} \quad (10-5)$$

این رابطه نشان می‌دهد که ضریب خودالقایی از مشخصه‌های ساختاری القاگر است و به جریان متغیری که از القاگر می‌گذرد بستگی ندارد.

مثال ۵-۱

سیملوله‌ای بدون هسته، با سطح مقطع 1 cm^2 و طول 5 cm در نظر بگیرید. اگر تعداد حلقه‌های این سیملوله برابر 2000 باشد، ضریب خودالقایی آن را حساب کنید.

حل: چون سیملوله بدون هسته است، $k=1$ است بنابراین با استفاده از رابطه‌ی ۱۰-۵ داریم :

$$L = 1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{(2000)^2 \times (1 \times 10^{-4})}{0.05}$$

در نتیجه :

$$L = 10^{-2} \text{ H} = 10 \text{ mH}$$

تمرین ۵-۴

دو سیملوله با سطح مقطع و تعداد دور یکسان در نظر بگیرید. اگر طول یکی از سیملوله‌ها دو برابر دیگری باشد، نسبت ضریب خودالقایی آن‌ها را محاسبه کنید.

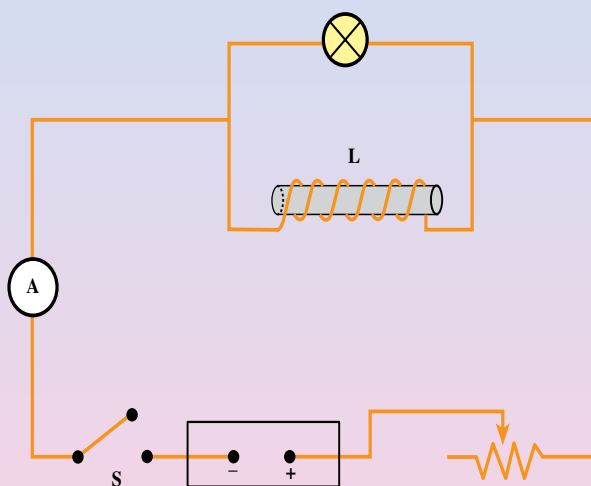
آزمایش ۲-۵

وسيله‌های آزمایش: لامپ ۱۲ ولتی، منبع تغذیه، رئوستا، کلید، سیم رابط، سیملوله (با ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور) و هسته‌ی آهنی.

۱- مداری مطابق شکل ۵-۱۵ ببندید.

۲- رئوستا را به گونه‌ای تنظیم کنید تا لامپ با روشنایی ضعیف تابش کند.

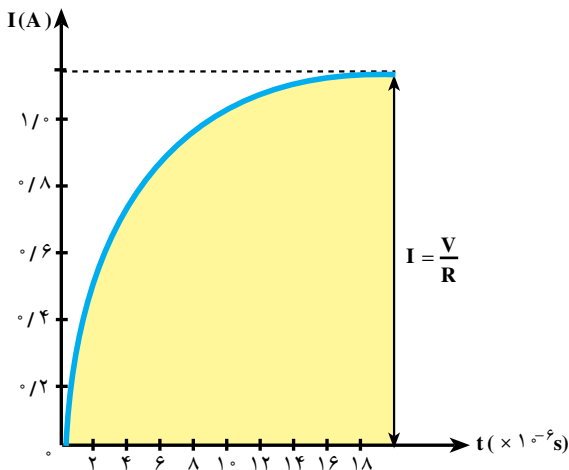
۳- کلید S را سریعاً قطع کنید و آنچه را مشاهده می‌کنید پس از بحث در گروه به کلاس گزارش کنید.



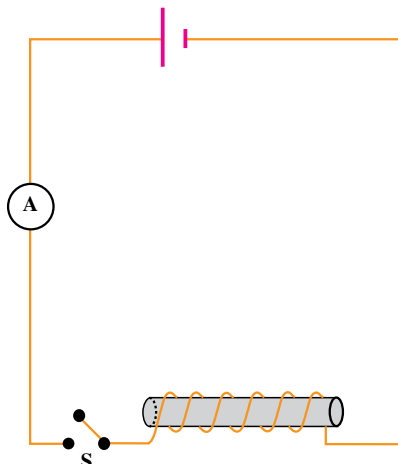
شکل ۵-۱۵

دیدیم که تغییر جریان در یک القاگر باعث ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی در آن می‌شود. ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی باعث می‌شود جریان به سرعت به مقدار نهایی خود نرسد. برای مثال مداری مانند شکل ۵-۱۶ الف در نظر بگیرید که در آن یک سیملوله با تعداد دور نسبتاً زیاد به دو سر یک باتری بسته شده است. هنگامی که کلید S را می‌بندیم، جریان به‌طور آتی به مقداری که از قانون اهم ($I = \frac{V}{R}$) به‌دست می‌آید نمی‌رسد، بلکه با زمان تغییر می‌کند. منحنی تغییر جریان با زمان به‌صورت منحنی شکل ۵-۱۶ ب است.

این اثر را می‌توانیم به این صورت توجیه کنیم که به هنگام بستن کلید، جریان از صفر روبه



(ب) چگونگی تغییر جریان با زمان به هنگام بستن کلید



(الف) سیمی به مقاومت R را به صورت یک سیملوله بسته ایم

شکل ۵-۱۶ اثر خودالقایی در مدار شامل سیملوله (اعداد روی شکل مربوط به یک آزمایش خاص است)

افزایش می‌گذارد و نیروی محرکه‌ی خودالقایی در جهت مخالف نیروی محرکه‌ی مولد در سیملوله القا می‌شود، در نتیجه جریان در مدار کم‌تر از حالتی است که خودالقا در مدار وجود نداشته باشد. یعنی جریان کم‌تر از مقداری است که از رابطه‌ی $I = \frac{V}{R}$ به دست می‌آید. با گذشت زمان و نزدیک شدن جریان به I ، آهنگ تغییر جریان کندتر می‌شود. بنابراین نیروی محرکه‌ی خودالقایی نیز کوچک‌تر می‌شود. هنگامی که جریان برابر I می‌شود، دیگر جریان تغییر نمی‌کند و نیروی محرکه‌ی خودالقایی به صفر می‌رسد.

فعالیت ۵-۳

با توجه به مطالب بالا نتیجه‌ی آزمایش ۵-۲ را توجیه کنید.

۵-۶ انرژی ذخیره شده در القاگر

هنگامی که در دو سر القاگری اختلاف پتانسیل برقرار شود، از طرف مولد به القاگر انرژی داده می‌شود. بخشی از این انرژی در مقاومت R تلف می‌شود و بقیه‌ی آن در میدان مغناطیسی سیملوله ذخیره می‌شود، این انرژی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (۵-۱۱)$$

این انرژی در میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان از القاگر ذخیره می‌شود.

مثال ۵-۹

سیملوله‌ای با ضریب خودالقایی 4 mH و مقاومت $100\ \Omega$ مفروض است. سیملوله را مطابق شکل ۵-۱۵ به یک باتری ۶ ولتی وصل می‌کنیم. چه مقدار انرژی در سیملوله ذخیره می‌شود؟

حل: پس از آنکه جریان در سیملوله به مقدار نهایی خود رسید، داریم:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6}{100} = 0.06\text{ A}$$

با استفاده از رابطه‌ی ۵-۱۱ انرژی ذخیره شده در القاگر برابر است با:

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \\ = \frac{1}{2} (0.004)(0.06)^2 = 7.2 \times 10^{-4}\text{ J}$$

تمرین ۵-۵

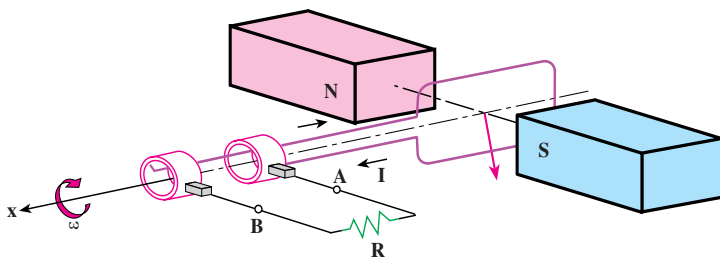
رابطه‌ای برای انرژی ذخیره شده در یک سیملوله‌ی بدون هسته بر حسب ویژگی‌های سیملوله به دست آورید.

۵-۷- جریان متناوب

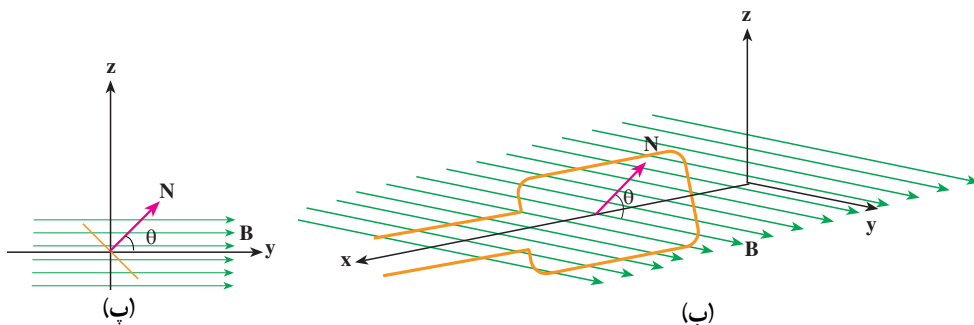
یکی از کاربردهای مهم القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. دیدیم که برای ایجاد نیروی محرکه‌ی القایی باید شار عبوری از مدار تغییر کند، و شار مغناطیسی‌ای که از یک پیچه می‌گذرد از رابطه‌ی $AB \cos \theta$ محاسبه می‌شود، که در آن θ زاویه‌ی بین نیم‌خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

ساده‌ترین راه برای تغییر شار، تغییر زاویه‌ی θ است. به همین لحاظ متداول‌ترین روش تولید جریان القایی، تغییر زاویه‌ی θ است.

شکل ۵-۱۷ الف پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت حول محور x دوران کند. محور y را منطبق بر راستای میدان مغناطیسی انتخاب کرده‌ایم، شکل‌های ۵-۱۷ ب و پ نشان می‌دهند که چگونه زاویه‌ی θ ، با چرخش پیچه حول محور x ، تغییر می‌کند.



(الف) پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت می‌چرخد



شکل ۵-۱۷

اگر زمان یک دور چرخش پیچه T ثانیه باشد، پیچه در مدت t ثانیه $\frac{t}{T}$ دور خواهد چرخید. هر دور کامل برابر 2π رادیان است. در نتیجه اگر پیچه در لحظه‌ی $t=0$ در وضعیت عمود بر میدان مغناطیسی ($\theta=0$) باشد، پس از گذشت t ثانیه در وضعیت زیر خواهد بود:

$$\theta = 2\pi \frac{t}{T} \quad \text{رادیان} \quad (۱۲-۵)$$

T یعنی زمان چرخش یک دور کامل را «دوره» یا «زمان تناوب» می‌نامند. $\frac{2\pi}{T}$ را با ω

نمایش می‌دهند و به آن بسامد زاویه‌ای می‌گویند. در نتیجه داریم:

$$\theta = \omega t$$

در نتیجه شار مغناطیسی $\Phi = AB \cos \theta$ که در لحظه‌ی t از پیچه عبور می‌کند برابر است با:

$$\Phi = AB \cos \theta \quad (۱۳-۵)$$

نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه با توجه به قانون فارادی از رابطه‌ی ۵-۳ محاسبه می‌شود

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NAB \frac{d(\cos \omega t)}{dt}$$

و یا

$$\mathcal{E} = NAB\omega \sin \omega t \quad (۱۴-۵)$$

یعنی نیروی محرکه‌ای که در پیچه القا می‌شود با زمان تغییر می‌کند. بیش‌ترین مقدار این نیروی محرکه مربوط به زمانی است که برای آن $\sin \omega t = 1$ باشد و برابر است با $\epsilon_m = NAB\omega$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$\epsilon = \epsilon_m \sin \omega t \quad (5-15)$$

این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه‌ی القا شده به‌طور دوره‌ای تغییر می‌کند.

تمرین ۵-۶

- (الف) نمودار تغییرات شاری که از مدار پیچه در شکل ۵-۱۷ الف می‌گذرد را بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.
- (ب) نمودار تغییرات نیروی محرکه‌ی القا شده در پیچه در شکل ۵-۱۷ الف را بر حسب زمان در طول یک دوره‌ی چرخش پیچه رسم کنید.

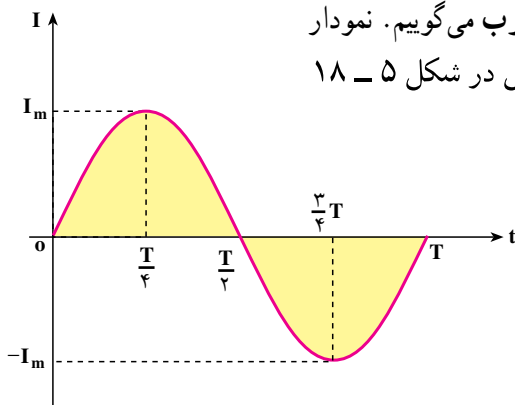
اگر مقاومت مدار برابر R باشد، جریان حاصل از این نیروی محرکه از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$I = \frac{\epsilon}{R} = \frac{\epsilon_m}{R} \sin \omega t \quad (5-16)$$

این رابطه نشان می‌دهد که جریان نیز با زمان تغییر می‌کند. بیش‌ترین مقدار جریانی که از مدار می‌گذرد، مربوط به زمانی است که $\sin \omega t = 1$ باشد، و برابر است با $I_m = \frac{\epsilon_m}{R}$. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم

$$I = I_m \sin \omega t \quad (5-17)$$

رابطه‌ی ۵-۱۷ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیچه به‌طور سینوسی تغییر می‌کند. به یک چنین جریانی، جریان متناوب می‌گوییم. نمودار تغییرات جریان متناوب در یک دوره‌ی کامل در شکل ۵-۱۸ رسم شده است.



شکل ۵-۱۸- نمودار تغییرات جریان متناوب سینوسی در یک دوره

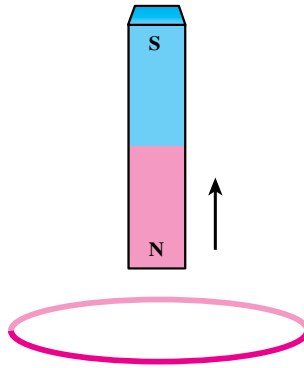
فعالیت ۴-۵

با بحث در گروه خود و با استفاده از نمودار شکل ۵-۱۸ جهت جریان متناوب را در هر بازه‌ی زمانی برابر $\frac{1}{4}$ دوره مورد بررسی قرار دهید، و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

در صنعت برای ایجاد جریان متناوب از مولدهای مخصوصی استفاده می‌شود که به آن‌ها «مولدهای صنعتی جریان متناوب» گفته می‌شود. در مولدهای صنعتی، پیچ‌ها را ساکن گرفته و آهنربا را در مقابل آن‌ها می‌چرخانند.

تمرین های فصل پنجم

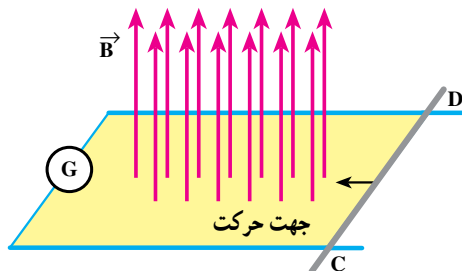
۱- قطب شمال یک آهنربا، مطابق شکل ۵-۱۹ از یک حلقه ی فلزی دور می شود. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



شکل ۵-۱۹

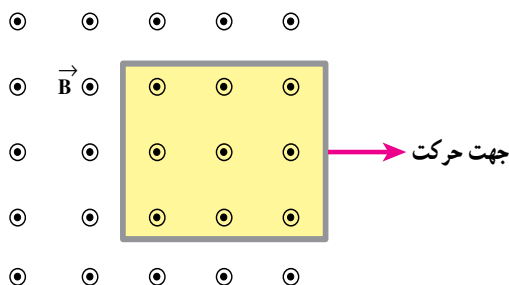
۲- یک آهنربای میله ای را به طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک زمین رها می کنیم. اگر سطح زمین در محل برخورد آهنربا با آن نرم باشد آهنربا در زمین فرو می رود. اگر این آزمایش را بار دیگر در وضعیتی تکرار کنیم که آهنربا در حین سقوط از درون حلقه های یک پیچه بگذرد، مقدار فرورفتگی آهنربا در زمین چه تغییری خواهد کرد؟ چرا؟ (از اثر مغناطیسی زمین بر روی آهنربا چشم پوشی کنید.)

۳- دو میله ی رسانای موازی در صفحه ای عمود بر میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} قرار دارند. این میله ها توسط گالوانومتری مطابق شکل ۵-۲۰ به یک دیگر بسته شده اند. میله ی رسانای CD می تواند روی دو میله ی موازی بلغزد. اگر میله ی CD در جهت نشان داده شده در شکل به حرکت درآید جهت جریان القایی در مدار در چه سویی است؟



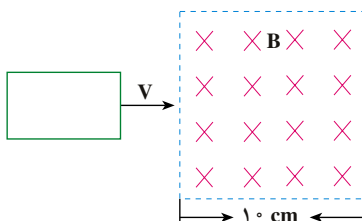
شکل ۵-۲۰

۴- پیچه‌ی مستطیلی را که شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی برونسو خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در پیچه در چه سویی است؟



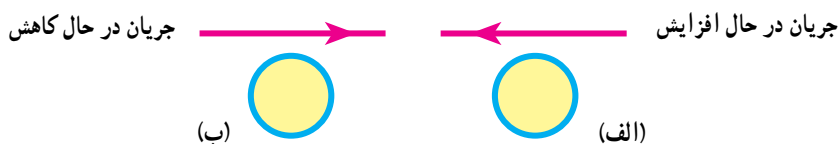
شکل ۵-۲۱

۵- حلقه‌ی فلزی مستطیلی شکلی به ابعاد $3\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ مطابق شکل ۵-۲۲ با سرعت ثابت 2 m/s وارد میدان مغناطیسی یکنواخت 2 T می‌شود و از طرف دیگر آن خارج می‌شود. نمودار تغییرات شار که از حلقه می‌گذرد و نیروی محرکه‌ی القا شده در آن را بر حسب زمان رسم کنید.



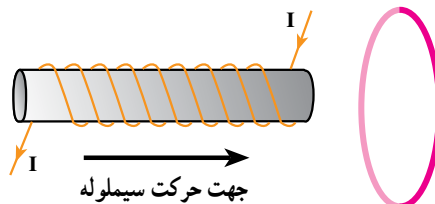
شکل ۵-۲۲

۶- جهت جریان القایی در هر یک از حلقه‌های دایره‌ای نشان داده شده در شکل ۵-۲۳ در چه سویی است؟



شکل ۵-۲۳

- ۷- پیچه‌ای که دارای ۱۰۰۰ حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه‌ی آن 0.4 T و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت 0.1 s تغییر کرده و به 0.4 T در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه‌ی پیچه 5 cm^2 باشد،
- الف- اندازه‌ی نیروی محرکه‌ی القایی متوسط در پیچه را حساب کنید.
- ب- جهت جریان القایی را تعیین کنید.
- ۸- در شکل ۵-۲۴ اگر سیملوله را در جهت نشان داده شده در شکل به حلقه نزدیک جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟

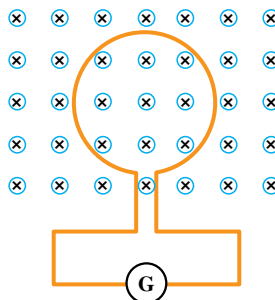


شکل ۵-۲۴

- ۹- پیچه‌ای با سطح مقطع 3 cm^2 دارای ۱۰۰۰ حلقه است و در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت 0.2 s پیچه بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه‌ی متوسط القایی در آن چه قدر است؟ اندازه‌ی میدان زمین را 5 G در نظر بگیرید.
- ۱۰- اگر شار مغناطیسی عبوری از حلقه‌ای مطابق رابطه‌ی زیر (در SI) تغییر کند:

$$\Phi_B = (4t^2 + 3t - 1) \times 10^{-3}$$

- بزرگی نیروی محرکه‌ی القایی در حلقه در لحظه‌ی $t = 2\text{ s}$ چه قدر است؟
- ۱۱- حلقه‌ای مطابق شکل ۵-۲۵ درون یک میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. اگر اندازه‌ی میدان افزایش یابد، جهت جریان القایی را روی حلقه مشخص کنید.



شکل ۵-۲۵

۱۲- جریان متناوبی که بیشینه‌ی آن $2A$ و دوره‌ی آن $2s$ است از یک رسانای 5 اهمی می‌گذرد. (الف) در چه لحظه‌هایی شدت جریان بیشینه خواهد بود؟ در این لحظه‌ها نیروی محرکه‌ی

القایی چه قدر است؟ (ب) در لحظه‌ی $t = \frac{1}{4}s$ ، شدت جریان چه قدر است؟

۱۳- شکل ۵-۲۶ دینام یک دوچرخه را نشان می‌دهد، تحقیق کنید چگونه این دینام، برق

مورد نیاز لامپ‌های دوچرخه را تولید می‌کند.



شکل ۵-۲۶- دینام دوچرخه

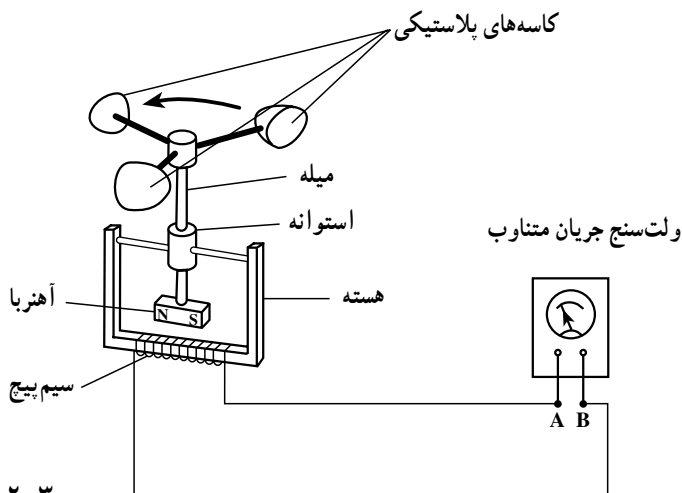
۱۴- شکل ۵-۲۷ ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه

نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد میله‌ی آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

(الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربه‌ی ولت‌سنج می‌شود؟

(ب) آیا با افزایش سرعت باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

(پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.



شکل ۵-۲۷

واژه‌نامه‌ی فارسی - انگلیسی

Adiabatic Process	فروآیند بی‌دررو	Dielectric breakdown	فروشکست دی‌الکتریک
Alternating Current	جریان متناوب	Dielectric constant	ثابت دی‌الکتریک
Angular frequency	بسامد زاویه‌ای	Efficiency	بازده
Attraction	ربایش	Environment	محیط
Bar magnet	آهنربای میله‌ای	Electric dipole	دوقطبی الکتریکی
Boiler	دیگ بخار	Electric field lines	خط‌های میدان الکتریکی
Capacitance	ظرفیت	Electric field	میدان الکتریکی
Condenser	چگالنده	Electric force	نیروی الکتریکی
Coefficient of performance	ضریب عملکرد	Electric Motor	موتور الکتریکی
Coefficient of resistivity	ضریب دمای مقاومت ویژه	Electric potential energy	انرژی پتانسیل الکتریکی
Coil	پیچ	Electric resistance	مقاومت الکتریکی
Cold reservoir	منبع سرد	Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی محرکه الکتریکی
Compression (step)	(مرحله‌ی) تراکم	Electromagnetic induction	القای الکترومغناطیسی
Capacitor	خازن		
Conservation of charge	پایستگی بار	Electric current	جریان الکتریکی
Cosmic ray	پرتو کیهانی	Equation of state	معادله‌ی حالت
Coulomb's Law	قانون کولن	Equilibrium	تعادل
Cycle	چرخه	Equivalent resistance	مقاومت معادل
Deviation Angle	زاویه‌ی انحراف		

Exhaust (step)	(مرحله ی) تخلیه	Isochoric Process	فرآیند هم حجم
Expansion	انبساط	Isothermal Process	فرآیند هم دما
Explosion (step)	(مرحله ی) آتش گرفتن	Kirochhoff's laws	قانون های کیرشهف
External combustion engine	ماشین برون سوز	Lenz's law	قانون لنز
Faraday's law of electromagnetic induction	قانون القای الکترومغناطیسی فاراده	Loop	حلقه
Ferromagnetism	فرومغناطیس	Macroscopic quantities	کمیت های ماکروسکوپی
First law of Thermodynamics	قانون اول ترمودینامیک	Magnetic axis	محور مغناطیسی
Gas Constant	ثابت گازها	Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی
Heat engine	ماشین گرمایی	Magnetic Domain	حوزه ی مغناطیسی
Heat reservoir	منبع گرما	Magnetic Energy	انرژی مغناطیسی
Heat	گرما	Magnetic field lines	خط های میدان مغناطیسی
Horseshoe magnet	آهنربای نعلی شکل	Magnetic field	میدان مغناطیسی
Hot reservoir	منبع گرم	Magnetic flux	شار مغناطیسی
Ideal gas	گاز کامل	Magnetic induction	القای مغناطیسی
Inclination Angle	زاویه ی میل	Magnetic permeability	تراوایی مغناطیسی
Induced current	جریان القایی	Mechanism	سازوکار
Inductance	ضریب خودالقایی (القایدگی)	Microscopic quantities	کمیت های میکروسکوپی
Inductor	القاکر	Molar Heat Capacity	ظرفیت گرمایی مولی
Insulator	عایق	Net charge	بار خالص
Intake (step)	(مرحله) مکش	Node	گره
Internal combustion engine	ماشین درون سوز	North pole	قطب شمال
Internal energy	انرژی درونی	Parallel Circuits	مدارهای موازی
Internal resistance	مقاومت درونی	Parallel plate capacitor	خازن تخت (خازن با صفحه های موازی)
Iron Core	هسته ی آهنی	Paramagnetism	پارامغناطیس
Isobaric Process	فرآیند هم فشار	Permanent magnet	آهنربای دائمی
		Permittivity	ضریب گذردی

Polarized	قطبیده	South pole	قطب جنوب
Potential difference	اختلاف پتانسیل	Steam engine	ماشین بخار
Power (step)	(مرحله‌ی) انجام کار	Surface charge density	چگالی سطحی بار
Pressure	فشار	System	دستگاه
Refrigerator	یخچال	Temperature	دما
Relative magnetic Permeability		Temporary magnet	آهنربای موقت
	تراوایی نسبی مغناطیسی	Thermal equilibrium	تبادل گرمایی
Repulsion	رانش	Thermodynamic Process	فرآیند ترمودینامیکی
Resistivity	مقاومت ویژه	Thermodynamic Variabels	
Resistor	مقاومت		متغیرهای ترمودینامیکی
Rheostat	رئوستا	Thermodynamics	ترمودینامیک
Right hand rule	قاعده‌ی دست راست	to charge	پرکردن (خازن)
Second law of Thermodynamics		to discharge	خالی کردن (خازن)
	قانون دوم ترمودینامیک	Valve	دریچه (سوپاپ)
Self - induction	خودالقایی	Variable resistor	مقاومت متغیر
Series Circuits	مدارهای متوالی	Voltage drop	افت پتانسیل
Solenoid	سیملوله	Volume	حجم

فهرست مراجع

- ۱- مجلات رشد آموزش فیزیک
- ۲- اصول فیزیک جلد ۱ و ۲ هانس. سی. اوهانیان، مرکز نشر دانشگاهی
- ۳- دوره‌ی درسی فیزیک جلد ۱ تا ۴ گ. س. لندسبرگ، ترجمه دکتر لطیف کاشیگر، ناصر مقبلی، انتشارات فاطمی.
- 4- Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999 by Holt Rinehart and Winston.
- 5 - Physics For Scientists and Engineers Paul A. Tipler 1999 by W. H. Freedman and Company.
- 6 - College Physics Raymond A. Serway Jerry S. Faughn 1999, 2000, SAUNERS College Publishing.
- 7 - Fundamentals of Physics.
David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker 2001 John Wiley & Sons, Inc.
- 8 - Physics. Principles with Applications Douglas C. Giancoli 1991 Prentice - Hall International Editions.
- 9 - Understanding Physics Robin Millar 1994 Collins Educational.
- 10 - Physics Classical and Modern, Frederick J. Keller W. Edward Gettys, Malcolm J. Skove 1993 Mc Graw Hill.
- 11 - University Physics, Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2000 Addison Wesley Longman, Inc.

- 12 – Contemporary College Physics. Jones / Childers 1999 by Mc Graw Hill Companies.
- 13 – Physics 2 David Sanq 2001 Cambridge University Press.
- 14 – Understanding Physics - Cumnuing Laws Redish Cooney 2004 - Jonh Wiley & Sons.
- 15 – Inquiry into Physics - Vern J. Ostdiek - Donald J. Bord 2000 - Thomson Books/cole.

