

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

# فیزیک (۳) و آزمایشگاه

سال سوم آموزش متوسطه

رشته ریاضی و فیزیک

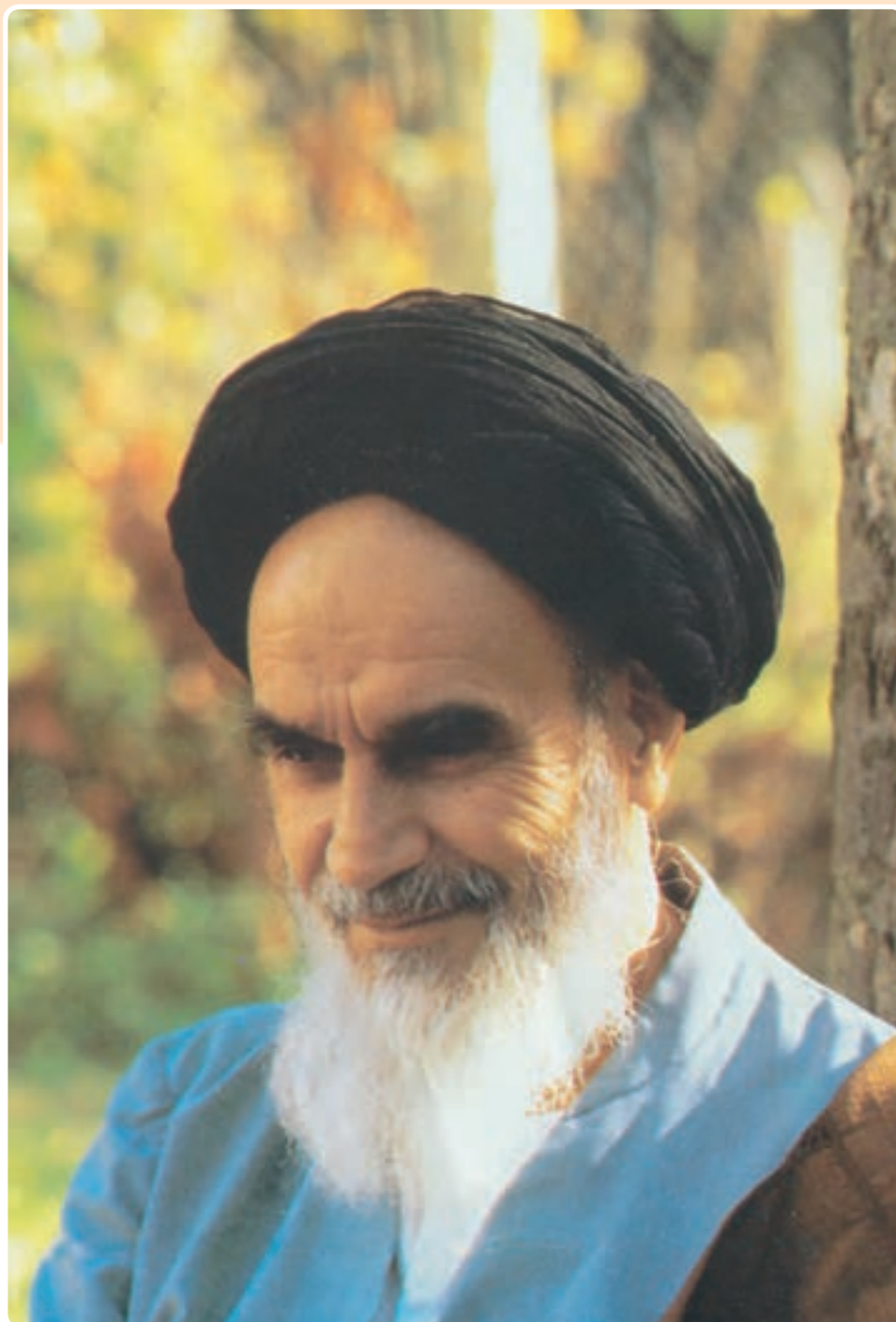
## وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی



نام کتاب :	فیزیک (۳) و آزمایشگاه - ۲۵۶/۴
پدیدآورنده :	سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف :	دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف :	احمد احمدی، سیامک خادمی، روح‌الله خلیلی بروجنی، منیژه رهبر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، مهرناز طلوع شمس، مجید فلاح، حمید فدایی فرد و اسفندیار معتمدی (اعضای شورای برنامه‌ریزی) - احمد احمدی، روح‌الله خلیلی بروجنی، سید مهدی شیوایی، حسن عزیزی و غلامعلی محمودزاده (اعضای گروه تألیف) - احمد احمدی، محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی و حمید فدایی فرد (بازنگری و اصلاح فصل‌های ۲، ۱ و ۳)، روح‌الله خلیلی بروجنی (فصل‌های ۴ و ۵) - محمدکاظم بهنیا (ویراستار)
مدیریت آماده‌سازی هنری :	اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
شناسه افزوده آماده‌سازی :	لیدا نیک‌روش (مدیر امور فنی و چاپ) - جواد صفری (طراح جلد) - راحله زادفتح‌اله (صفحه‌آرا) - مریم دهقان‌زاده (رسام) - سیده‌فاطمه محسنی، زهرا ایمانی‌نصر، فاطمه گیتی‌جبین، علیرضا ملکان، زینت بهشت‌شیرازی، حمید ثابت‌کلاچاهی، ناهید خیام‌پاشی (امور آماده‌سازی)
نشانی سازمان :	تهران : خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی) تلفن : ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار : ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹ وبگاه : <a href="http://www.irtextbook.ir">www.irtextbook.ir</a> و <a href="http://www.chap.sch.ir">www.chap.sch.ir</a>
ناشر :	شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران تهران : کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش) تلفن : ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار : ۴۴۹۸۵۱۶، صندوق پستی : ۳۷۵۱۵-۱۳۹
چاپخانه :	شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
سال انتشار و نوبت چاپ :	چاپ شانزدهم ۱۳۹۵

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

شابک ۶-۲۳۵-۰۵-۹۶۴-۹۷۸-۰۵-۲۳۵۰-۶ ISBN 978-964-05-2350-6



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



## فهرست

### فصل ۱: ترمودینامیک.....

۲	۱-۱- معادلهٔ حالت .....
۴	۲-۱- فرایندهای ترمودینامیکی آرمانی .....
۵	۳-۱- تبادل انرژی .....
۵	۴-۱- انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک .....
۶	۵-۱- فرایندهای خاص .....
۱۸	۶-۱- چرخهٔ ترمودینامیکی .....
۱۹	۷-۱- ماشین‌های گرمایی .....
۲۴	۸-۱- بازدهٔ ماشین گرمایی .....
۲۵	۹-۱- قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی) .....
۲۸	۱۰-۱- یخچال‌ها .....
۳۰	۱۱-۱- قانون دوم ترمودینامیک (به بیان یخچالی) .....
۳۲	پرسش‌ها .....
۳۲	مسئله‌ها .....

### فصل ۲: الکتریسیتهٔ ساکن.....

۳۶	۱-۲- قانون کولن .....
۴۵	۲-۲- میدان الکتریکی .....
۴۶	۳-۲- میدان الکتریکی حاصل از یک ذرهٔ باردار .....
۴۹	۴-۲- خطوط میدان الکتریکی .....
۵۲	۵-۲- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی .....
۵۳	۶-۲- انرژی پتانسیل الکتریکی .....
۵۵	۷-۲- پتانسیل الکتریکی .....
۵۸	۸-۲- توزیع و القای بار در رساناها .....
۶۲	۹-۲- خازن .....
۶۳	۱۰-۲- ظرفیت خازن .....
۶۴	۱۱-۲- خازن با دی‌الکتریک .....
۷۰	۱۲-۲- انرژی خازن .....
۷۲	۱۳-۲- به هم بستن خازن‌ها در مدار .....
۷۸	پرسش‌ها .....
۷۹	مسئله‌ها .....

**فصل ۳: جریان الكتریکی و مدارهای جریان مستقیم..... ۸۲**

- ۱-۳- جریان الكتریکی ..... ۸۳
- ۲-۳- مقاومت رساناهای اهمی و عوامل مؤثر بر آنها ..... ۸۵
- ۳-۳- برخی از استانداردهای مهندسی سیم ها ..... ۸۹
- ۴-۳- نیروی محرکه الكتریکی و مدارها ..... ۹۳
- ۵-۳- توان در مدارهای الكتریکی ..... ۹۸
- ۶-۳- به هم بستن متوالی مقاومت ها ..... ۱۰۱
- ۷-۳- مدارهای چندحلقه ای و به هم بستن موازی مقاومت ها ..... ۱۰۲
- پرسش ها ..... ۱۱۰
- مسئله ها ..... ۱۱۲

**فصل ۴: میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی..... ۱۱۵**

- ۱-۴- مغناطیس و قطب های مغناطیسی ..... ۱۱۶
- ۲-۴- میدان مغناطیسی ..... ۱۱۸
- ۳-۴- نیروی مغناطیسی وارد بر رسانای حامل جریان ..... ۱۲۱
- ۴-۴- نیروی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی ..... ۱۲۶
- ۵-۴- آثار مغناطیسی جریان الكتریکی ..... ۱۲۸
- ۶-۴- نیروی بین سیم های موازی حامل جریان ..... ۱۳۴
- ۷-۴- خواص مغناطیسی مواد ..... ۱۳۶
- پرسش ها ..... ۱۳۹
- مسئله ها ..... ۱۴۲

**فصل ۵: القای الكترومغناطیسی..... ۱۴۳**

- ۱-۵- پدیده القای الكترومغناطیسی ..... ۱۴۴
- ۲-۵- شار مغناطیسی ..... ۱۴۷
- ۳-۵- قانون القای الكترومغناطیسی فارادی ..... ۱۴۸
- ۴-۵- قانون لنز ..... ۱۵۲
- ۵-۵- القاگرها و اثر خودالقایی ..... ۱۵۴
- ۶-۵- انرژی ذخیره شده در القاگر ..... ۱۵۹
- ۷-۵- جریان متناوب ..... ۱۶۱
- پرسش ها ..... ۱۶۶
- مسئله ها ..... ۱۶۸

**پیوست ..... ۱۷۰****واژه نامه فارسی - انگلیسی..... ۱۷۲****فهرست منابع ..... ۱۷۴**

## سخنی با دانش آموزان و همکاران محترم

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

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

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

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

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

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

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب های درسی ابتدایی و متوسطه نظری

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

دانش آموزان عزیز، صفحه ویژه‌ای برای پشتیبانی این کتاب به آدرس <http://physics-dept.talif.sch.ir/cd3/physics.htm> طراحی شده و در دسترس شماست. در این صفحه مجموعه‌ای از فیلم‌های کوتاه آموزشی، آزمایشگاه مجازی، شبیه‌سازی، بیشتر بدانید و آزمون به تفکیک هر فصل وجود دارد که در طول سال تحصیلی می‌توانید از آنها استفاده کنید.



## ترمودینامیک

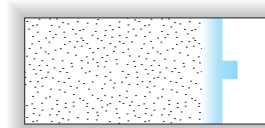


موتور ماشین‌های بنزینی بسیار ناکارآمد است و فقط حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد انرژی شیمیایی حاصل از سوختن بنزین را به کار مفید مکانیکی تبدیل می‌کند. دانشمندان و مهندسان در پی کارآمدتر کردن این ماشین‌ها هستند. با این حال، مَدّ بالایی برای بازدهی این ماشین‌ها وجود دارد که مانع از تبدیل کلّ انرژی شیمیایی به کار مفید می‌شود.

برای توصیف رفتار یک جسم باید برهم کنش آن جسم را با پیرامونش بررسی کنیم؛ مثلاً در مکانیک، جسم می‌تواند توپ در حال سقوطی باشد که با پیرامونش - یعنی زمین و هوا - برهم کنش دارد و برای توصیف رفتار آن باید کمیت‌های قابل مشاهده‌ای مانند مکان، سرعت و شتاب توپ را انتخاب کنیم که با عملیات آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شوند. در فرایندهایی که در آنها با مبادله گرما سروکار داریم، تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً گاز یا مایع است. این جسم را **دستگاه** و پیرامون آن را که می‌تواند با جسم تبادل انرژی داشته باشد، **محیط** می‌نامیم. بررسی‌های تجربی و نظری نشان می‌دهد رفتار یک دستگاه در پدیده‌های گرمایی را می‌توان برحسب کمیت‌هایی مانند فشار، حجم، دما، گرمای ویژه و ... توضیح داد. این کمیت‌ها به جزئیات رفتار تک تک مولکول‌های تشکیل دهنده دستگاه وابسته نیستند و تنها به وضعیت دستگاه در مقیاس بزرگ بستگی دارند؛ مثلاً اگر دستگاه را آب درون لیوانی در نظر بگیریم که به تعادل گرمایی رسیده است، دمای آب ثابت می‌ماند، در حالی که مولکول‌های تشکیل دهنده آن پیوسته به اطراف حرکت می‌کنند و سرعتهای تغییر می‌کند. کمیت‌هایی که وضعیت ماده را در مقیاس بزرگ توصیف می‌کنند، **کمیت‌های ماکروسکوپی** نامیده می‌شوند.

قوانینی که کمیت‌های ماکروسکوپی را در فرایندهای گرمایی به هم مربوط می‌کنند، اساس علمی به نام **ترمودینامیک** را می‌سازند. در واقع، علم ترمودینامیک علمی است که قوانین حاکم بین کمیت‌های ماکروسکوپی یک دستگاه در پدیده‌های گرمایی را بیان می‌کند و به مطالعه مبادله انرژی و کاربرد آن در چنین دستگاه‌هایی می‌پردازد. از این منظر، بسیاری از مطالبی که در فصل ششم کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم در حیطه علم ترمودینامیک می‌گنجد. علم ترمودینامیک از دیرباز در زندگی بشر نقش داشته است و نمونه بارز آن ماشین‌های گرمایی اند که گرما را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند و در پایان این فصل به آنها خواهیم پرداخت. مثال‌های بی‌شمار دیگری نیز وجود دارد که نشان می‌دهد چگونه علم ترمودینامیک در زندگی روزمره نقش بازی می‌کند. مثلاً مهندسان اتومبیل در پی بالا بردن بازده خودروها هستند، مهندسان هسته‌ای نگران آن‌اند که چطور دما و فشار بسیار بالای رآکتورهای هسته‌ای را کنترل کنند تا مبادا حوادث زیست محیطی فاجعه‌باری رخ دهد، مهندسان زیست محیطی به چگونگی مبادله گرما بین اقیانوس‌ها و جو علاقه‌مندند که می‌تواند بر شرایط جوی اثر بگذارد، مهندسان زیستی نگران آهنگ تولید گاز حاصل از تخمیر در زیست توده‌ها هستند و پزشکان در پی آن‌اند که چگونه دمای بدن یک بیمار می‌تواند نشانه‌ای از یک سرطان روبه‌رشد باشد.

(۱)



**شکل ۱-۱** گاز داخل استوانه در حالت تعادل ترمودینامیکی است.

### ۱-۱- معادله حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۱-۱ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی مسدود شده است. پیستون می‌تواند در درون استوانه حرکت کند (در اینجا 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 همهٔ نقاط گاز یکسان، مثلاً برابر  $T_i$  و  $P_i$ ، خواهد بود. در این صورت می‌گوییم که گاز در حالت **تعادل ترمودینامیکی** است. به عبارت دیگر یک دستگاه ترمودینامیکی در صورتی در حال تعادل است که مشخصه‌های قابل اندازه‌گیری آن مانند دما، فشار، حجم و ... به‌طور خودبه‌خودی تغییر نکند.

### فعالیت ۱-۱

اگر دما و فشار در داخل گاز شکل ۱-۱ در نقاط مختلف متفاوت باشند، چه رخ می‌دهد؟

در حالت تعادل هر یک از کمیت‌های فشار، حجم و دما گاز مقدار مشخصی دارد؛ مثلاً هنگامی که گاز درون استوانه در شکل ۱-۱ در وضعیت (۱) قرار دارد، مقدار این کمیت‌ها به ترتیب برابر با  $P_i, V_i, T_i$  است. حال اگر گاز را گرم یا سرد کنیم و یا پیستون را جابه‌جا کنیم، مقدار بعضی از این کمیت‌ها (یا همهٔ آنها) تغییر خواهد کرد و پس از مدتی، این کمیت‌ها به مقدارهای مشخص دیگری چون  $P_f, V_f, T_f$  خواهند رسید. از کمیت‌های  $P, V, T$  برای توصیف **حالت** دستگاه استفاده می‌کنیم. این کمیت‌های ماکروسکوپی را که حالت دستگاه با آنها توصیف می‌شود، **متغیرهای ترمودینامیکی** می‌نامیم. مثلاً برای گاز درون استوانهٔ شکل ۱-۱ با تغییراتی که ایجاد کردیم گاز از **حالت**  $(P_i, V_i, T_i)$  به **حالت**  $(P_f, V_f, T_f)$  می‌رسد.

متغیرهای ترمودینامیکی از یکدیگر مستقل نیستند و با هم رابطه دارند. رابطهٔ بین متغیرهای ترمودینامیکی را **معادلهٔ حالت** می‌نامیم. معادلهٔ حالت یک دستگاه می‌تواند پیچیده باشد؛ ولی آزمایش نشان می‌دهد که اگر گازها بسیار رقیق باشند، معادلهٔ حالت آنها ساده و مستقل از نوع گاز است. در این صورت، گاز را **گاز کامل (آرمانی)** می‌نامیم.

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

$$\frac{PV}{T} \propto n$$

در این رابطه  $n$  تعداد مول گاز است و مقدار آن از نسبت جرم گاز ( $m$ ) به جرم مولی آن ( $M$ ) به دست می‌آید:

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

بنابراین، معادلهٔ حالت گاز کامل که کمیت‌های  $P, V, T$  را به یکدیگر مربوط می‌کند، به صورت زیر است:

$$PV = nRT \quad (2-1)$$

که به **R ثابت گازها** می‌گویند. اگر  $P$  برحسب پاسکال،  $V$  برحسب مترمکعب،  $n$  برحسب مول و  $T$  برحسب کلون باشد، مقدار  $R$  برابر  $8/314 \text{ J/mol.K}$  است.

## مثال ۱-۱

تعیین کنید که در شرایط متعارفی (فشار یک اتمسفر و دمای صفر درجه سلسیوس) در اتاقی به حجم  $۳۶/۰ \text{ m}^3$  چند مول هوا وجود دارد؟

پاسخ: تعداد مول را با استفاده از قانون گازهای کامل به دست می آوریم:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(۱/۰۰ \times ۱۰^۵ \text{ N/m}^2)(۳۶/۰ \text{ m}^3)}{(۸/۳۱ \text{ J/mol.K})(۲۷۳\text{K})} = ۱/۶۰ \times ۱۰^۳ \text{ mol}$$

## ۲-۱ فرایندهای ترمودینامیکی آرمانی

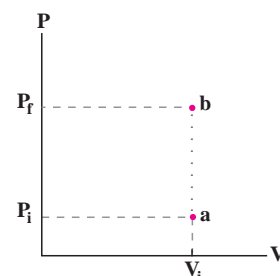
دیدیم که حالت (تعادل) یک دستگاه را می توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی  $P$ ،  $V$  و  $T$  بیان کرد. همچنین در اثر گرم شدن گاز یا جابه جاشدن پیستون حالت گاز تغییر می کند و گاز به حالت دیگری می رود. هنگامی که دستگاه از یک حالت به حالت دیگر می رود، می گوئیم که یک فرایند ترمودینامیکی انجام شده است.

اکنون فرض کنید که گاز ابتدا در حالت  $P_i$ ،  $V_i$  و  $T_i$  باشد و در اثر گرم کردن آن با ثابت نگه داشتن حجم، گاز به حالت  $P_f$ ،  $V_i$  و  $T_f$  برسد. در این فرایند ترمودینامیکی حالت دستگاه در حجم ثابت از (a) با دمای  $T_i$  و فشار  $P_i$  به (b) با دمای  $T_f$  و فشار  $P_f$  تغییر کرده است.

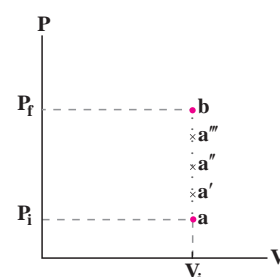
اگر حالت های بین a و b حالت های تعادلی نباشند، نمودار این فرایند ترمودینامیکی را نمی توان رسم کرد؛ زیرا در این حالت ها گاز در حال تعادل نیست و در نتیجه فشار و دمای گاز را نمی توان در این حالت ها تعیین کرد. به همین دلیل، این فرایند را با نقطه چین نمایش می دهیم (شکل ۲-۱).

اکنون فرض کنید دستگاه را در تماس با یک منبع گرما قرار می دهیم. ابتدا دمای منبع گرما را برابر با  $T_i$ ، یعنی دمای اولیه گاز، انتخاب می کنیم. در این صورت، تبادل گرما بین منبع و دستگاه رخ نمی دهد. سپس دمای منبع را کمی افزایش می دهیم. در این صورت گرمای اندکی به گاز منتقل می شود. چون این گرما بسیار کم است، تغییر کمی در حالت گاز ایجاد می شود و گاز پس از مدت کوتاهی به حالت تعادل می رسد. وضعیت دستگاه در این حالت با نقطه  $a'$  در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. هرچه اختلاف دما بین دستگاه و منبع کمتر باشد،  $a'$  به  $a$  نزدیک تر خواهد بود و رسیدن به حالت تعادل جدید سریع تر رخ خواهد داد. به عبارت دیگر می توان گفت که در فرایند تحول دستگاه از  $a$  به  $a'$ ، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می ماند. اگر گرمادهی را به همین روش ادامه دهیم، و در هر نوبت دمای منبع اندکی زیاد شود، نقاط  $a''$ ،  $a'''$  و ... به دست می آیند. هرچه دمای منبع را در هر نوبت کمتر تغییر دهیم، این نقاط به یکدیگر نزدیک تر خواهند بود و دستگاه زودتر به حالت تعادل می رسد.

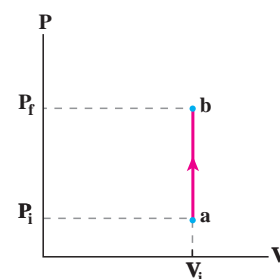
در حدی که گرمای داده شده به دستگاه در هر مرحله بسیار کوچک است، فرایند گرمادهی را می توان مانند شکل ۴-۱ به صورت یک خط نمایش داد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می ماند. چنین فرایندی را فرایند آرمانی می نامند.



شکل ۲-۱ گاز در فرایندی ترمودینامیکی از حالت a به حالت b رفته است.



شکل ۳-۱ دستگاه با دریافت مقادیر کوچک گرما، تغییر حالت می دهد.



شکل ۴-۱ نمودار تغییرات فشار برحسب حجم، هنگامی که دستگاه به صورت آرمانی در حجم ثابت گرمای Q را دریافت می کند و در نتیجه نمودار فرایند به صورت خط رسم می شود.

## ۳-۱- 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 دستگاه می‌گیرد، با علامت مثبت و گرمایی را که دستگاه از دست می‌دهد، با علامت منفی نشان می‌دهیم.

هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما می‌کند، معمولاً فرض می‌شود که با یک منبع گرما

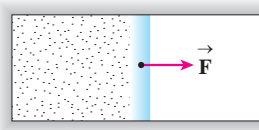
در تماس است. منبع گرما، جسمی است که اگر گرما از دست بدهد یا بگیرد، دمای آن به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نکند؛ مثلاً، هوای اتاق را برای یک استکان چای داغ می‌توان منبع گرما در نظر گرفت. با سرد شدن چای، دمای اتاق به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نمی‌کند.

## پرسش ۱-۱

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

**ب) کار:** شکل ۱-۵ گازی را درون یک استوانه با پیستونی نشان می‌دهد که اصطکاک آن

ناچیز است. اگر گاز را کمی گرم کنیم، گاز منبسط می‌شود و نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند، پیستون را که اصطکاک ناچیزی دارد به سمت راست جابه‌جا می‌کند. از کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه به یاد داریم هرگاه نیروی وارد بر جسم موجب جابه‌جایی آن جسم شود، کار انجام می‌دهد. بنابراین، در اینجا نیز گاز روی پیستون کار انجام داده است. در ترمودینامیک هر جا حجم دستگاه تغییر کند، بین دستگاه و محیط، کار مبادله شده است. در بخش‌های بعد رابطه‌ای برای این کار مبادله شده به دست خواهیم آورد.



شکل ۱-۵ در شکل بالا  $\vec{F}$  نیرویی است که گاز به پیستون وارد می‌کند.

## ۴-۱- انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های اجزای تشکیل دهنده آن ماده برابر است. به طور

دقیق‌تر، می‌توان گفت که انرژی درونی  $U$  ماده با مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل ذره‌های آن ماده برابر است. هنگامی که دستگاه در حالت معینی قرار دارد، که مثلاً با  $P$  و  $T$  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 ترمودینامیکی با مبادله کار، گرما یا هر دو با محیط از یک حالت اولیه با انرژی درونی  $U_1$ ، به یک حالت دیگر می‌رود ممکن است انرژی درونی آن تغییر کند و مثلاً به مقدار  $U_2$  برسد. تغییر انرژی درونی، یعنی  $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط ارتباط دارد. این ارتباط، موضوع **قانون اول ترمودینامیک** است. 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 رابطه زیر نشان داده می شود<sup>۱</sup>:

$$\Delta U = Q + W \quad (3-1)$$

این رابطه که بیان می دارد انتقال انرژی بین محیط و دستگاه از طریق تبادل کار و گرما صورت می گیرد، **قانون اول ترمودینامیک** نامیده می شود. در این رابطه،  $Q$  می تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد.  $W$  نیز می تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد. بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل کار و گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ( $\Delta U > 0$ )، یا کاهش ( $\Delta U < 0$ ) یابد یا اینکه تغییر نکند ( $\Delta U = 0$ ). گرما و کاری که بین دستگاه و محیط مبادله می شود فقط در طی فرایند معنا دارد؛ یعنی نمی توانیم پس از انجام هر فرایند از کار یا گرمای موجود در دستگاه صحبت کنیم.

در رابطه ۳-۱ اگر  $W$  کار دستگاه روی محیط در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه در هر فرایند ترمودینامیکی، کار دستگاه روی محیط قرینه کار محیط روی دستگاه است، این رابطه به صورت  $\Delta U = Q - W$  نوشته می شود.

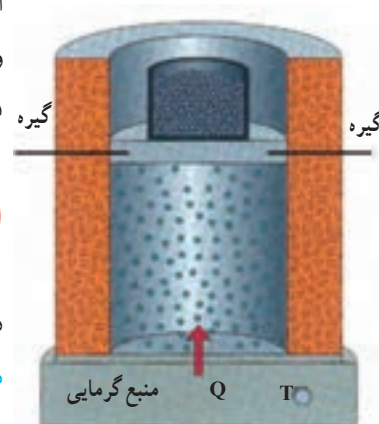
### مثال ۲-۱

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه  $420 \text{ J}$  گرما از محیط می گیرد و انبساط می یابد. اگر کاری که دستگاه روی محیط انجام می دهد  $100 \text{ J}$  باشد، تغییر انرژی درونی دستگاه چقدر است؟

**پاسخ:** چون دستگاه از محیط گرما گرفته است  $Q = +420 \text{ J}$  و چون کار دستگاه روی محیط  $100 \text{ J}$  است پس کار محیط روی دستگاه  $W = -100 \text{ J}$  می شود. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم

$$\Delta U = Q + W = 420 \text{ J} + (-100 \text{ J}) = 320 \text{ J}$$

توجه کنید که در فرایندهای مختلفی که برای یک گاز رخ می دهد و از حالت اولیه یکسان ( $T_i, V_i, P_i$ ) آغاز می شوند و به حالت نهایی یکسان ( $T_f, V_f, P_f$ ) می رسند، تغییر انرژی درونی گاز ( $\Delta U$ ) یکسان است، ولی کار و نیز گرمای مبادله شده در این فرایندها می تواند متفاوت باشد. در بخش بعد به بررسی چند نوع از این فرایندها می پردازیم.



### ۱-۵- فرایندهای خاص

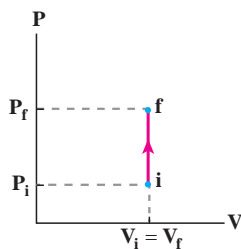
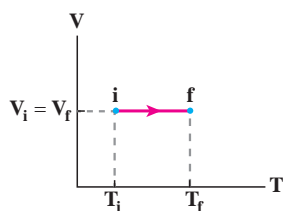
همان طور که گفتیم در ترمودینامیک بین دو حالت مشخص فرایندهای متفاوتی می تواند رخ دهد. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارد که کاربرد آنها وسیع تر است؛ از جمله: **فرایند هم حجم، فرایند هم فشار، فرایند هم دما و فرایند بی دررو**. در ادامه به توصیف این فرایندها می پردازیم. **الف) فرایند هم حجم:** حجم گاز طی این فرایند ثابت نگه داشته می شود و بنابراین، کار صفر است. در این فرایند گاز با محیط فقط تبادل گرما می کند. به این منظور گاز را در تماس با منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم قرار می دهیم (شکل ۱-۶)، طوری که دمای اولیه منبع و گاز با هم برابر باشد. دمای

**شکل ۱-۶** دمای گاز را در حجم ثابت، با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم، به تدریج تغییر می دهیم.

۱- در برخی کتابها از جمله کتاب شیمی ۳، تغییر انرژی درونی با  $\Delta E$  نشان داده شده است.



## ترمودینامیک



شکل ۱-۷ نمودارهای V-T و P-V برای یک فرایند هم حجم آرمانی

منبع را به آرامی و به تدریج تغییر می‌دهیم تا گاز با گذار از حالت‌های تعادلی، طی یک فرایند آرمانی به حالت نهایی مورد نظر برسد. در شکل ۱-۷ نمودارهای P-V و V-T برای یک فرایند هم حجم نشان داده شده است که در آن گاز گرما می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت، بالا می‌رود. اگر در این مثال گاز به صورت هم حجم گرما از دست بدهد جهت پیکان‌های نمودارهای شکل ۱-۷ وارونه می‌شود.

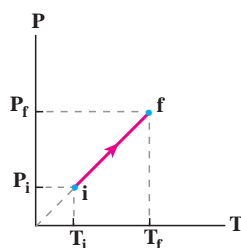
## مثال ۱-۳

نمودار P-T را برای فرایند هم حجم آرمانی یک گاز کامل رسم کنید.

**پاسخ:** چون گاز کامل است با استفاده از معادله حالت گاز کامل داریم

$$P = \left( \frac{nR}{V} \right) T$$

چون  $\frac{nR}{V}$  ثابت است، رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این رابطه در شکل زیر نشان داده شده است.



جدول ۱-۱ ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت برای برخی گازها در فشار کم بر حسب J/mol.K

گاز	$C_v$
Ar	۱۲/۵
He	۱۲/۵
Ne	۱۲/۵
هوا	۲۰/۸
CO	۲۰/۷
H <sub>۲</sub>	۲۰/۴
HCl	۲۱/۴
N <sub>۲</sub>	۲۰/۸
NO	۲۰/۹
O <sub>۲</sub>	۲۱/۲
Cl <sub>۲</sub>	۲۴/۸
CO <sub>۲</sub>	۲۸/۵
CS <sub>۲</sub>	۴۰/۹
H <sub>۲</sub> S	۲۵/۴
N <sub>۲</sub> O	۲۸/۵
SO <sub>۲</sub>	۳۱/۳

اکنون به محاسبه گرمایی می‌پردازیم که در فرایند هم حجم با دستگاه مبادله می‌شود. در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه  $\Delta T$  با رابطه  $Q = mc\Delta T$  داده می‌شود. با توجه به رابطه  $m = nM$  داریم،  $Q = nMc\Delta T$ . حاصل ضرب  $Mc$  را **ظرفیت گرمایی مولی** می‌نامیم. در مورد گازها، ظرفیت گرمایی مولی به نوع فرایند بستگی دارد. ظرفیت گرمایی مولی گاز در فرایند هم حجم را با  $C_v$  نشان می‌دهیم. بنابراین

$$Q = nC_v\Delta T \quad (۴-۱)$$

با توجه به این رابطه، یکای ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت، J/mol.K است. ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت چند گاز در جدول ۱-۴ آمده است. می‌توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت با تقریب خوبی برای گازهای کامل تک اتمی برابر با  $\frac{3}{2}R$  و برای اغلب گازهای کامل دو اتمی در دماهای معمولی برابر با  $\frac{5}{2}R$  است.

## مثال ۱-۴

به  $2/00$  مول از گازهای He،  $O_2$  و  $CO_2$ ، در حجم ثابت،  $100$  ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چقدر افزایش می‌یابد؟  
پاسخ: از رابطه ۴-۱ داریم:

$$\Delta T = \frac{Q}{nC_V}$$

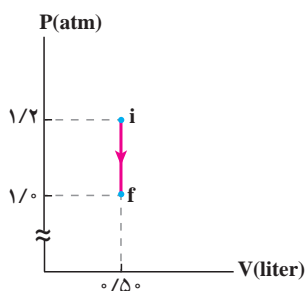
اکنون با استفاده از جدول ۱-۱ مقادیر  $C_V$  را برای این گازها در رابطه بالا قرار می‌دهیم:

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(12/5 \text{ J/mol.K})} = 4/00 \text{ K} \quad \text{برای He,}$$

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(21/2 \text{ J/mol.K})} = 2/36 \text{ K} \quad \text{برای } O_2,$$

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(28/5 \text{ J/mol.K})} = 1/75 \text{ K} \quad \text{برای } CO_2,$$

## مثال ۱-۵



شکل روبه‌رو نمودار یک فرایند هم‌حجم آرمانی را نشان می‌دهد که در صفحه  $P-V$  رسم شده است. گاز را کامل و تک‌اتمی فرض کنید. در این صورت گرمای مبادله شده چقدر است؟ آیا در این فرایند گاز گرما گرفته یا گرما از دست داده است؟  
پاسخ: با استفاده از رابطه (۴-۱) داریم:

$$\begin{aligned} Q &= nC_V \Delta T = n \left( \frac{3}{2} R \right) \Delta T \\ &= \frac{3}{2} (nRT_f - nRT_i) = \frac{3}{2} (P_f V_f - P_i V_i) \\ &= \frac{3}{2} [(1/0 \times 10^5 \text{ Pa})(0/50 \times 10^{-3} \text{ m}^3) - (1/2 \times 10^5 \text{ Pa})(0/50 \times 10^{-3} \text{ m}^3)] \\ &= -15 \text{ J} \end{aligned}$$

گرمای مبادله شده  $|Q| = 15 \text{ J}$  است. چون مقدار  $Q$  منفی شده است، بنابراین گاز گرما از دست داده است.

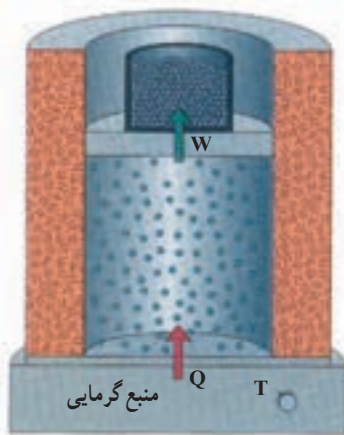
## تمرین ۱-۱

دمای  $n$  مول گاز با ظرفیت گرمایی مولی  $C_V$  در یک فرایند هم‌حجم از  $T_i$  به  $T_f$  رسیده است.  
الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرایند را بیابید.  
ب) اگر این گاز، گاز کامل و تک‌اتمی باشد، تغییر انرژی درونی آن به چه صورتی نوشته می‌شود؟

۱- نمودارهای ترمودینامیکی عموماً به مقیاس نیست و از این رو، در این مثال و مثال‌هایی از این دست قطعه‌ای از محور را بُرش

می‌دهیم و آن را با نماد  $\approx$  مشخص می‌کنیم.



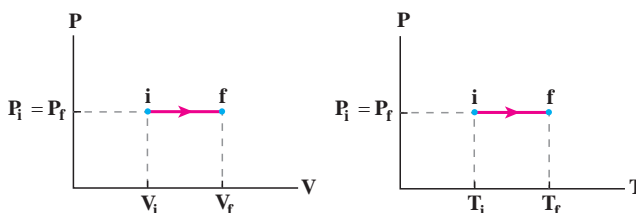


شکل ۸-۱ گرم کردن آرمانی گاز در فشار ثابت با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم.

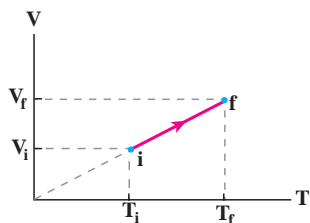
**(ب) فرایند هم فشار:** فشار گاز طی این فرایند ثابت می ماند. به عنوان مثالی از این فرایند، گازی را مطابق شکل ۸-۱ داخل استوانه‌ای که با یک منبع گرما با دمای قابل تنظیم در تماس است در نظر بگیرید. گاز ابتدا در فشار  $P_i$  و حجم  $V_i$  در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است.

دمای منبع را اندکی بالا می‌بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود که در نتیجه آن گاز، کمی منبسط می‌شود و پیستون را اندکی به طرف بالا 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 بالا حرکت می‌کند. در این وضعیت، شتاب حرکت پیستون بسیار کوچک و نزدیک به صفر خواهد بود. بنابراین، می‌توان گفت که در طی گرمادادن همواره فشار گاز ثابت است؛ نمودارهای  $P-V$  و  $P-T$  این فرایند آرمانی در شکل ۹-۱ رسم شده است.

شکل ۹-۱ نمودارهای  $P-V$  و  $P-T$  برای یک فرایند هم فشار آرمانی



#### مثال ۴-۱



نمودار  $V-T$  را برای فرایند هم فشار آرمانی یک گاز کامل رسم کنید.

**پاسخ:** چون گاز، کامل است با استفاده از معادله حالت گاز کامل داریم:

$$V = \left( \frac{nR}{P} \right) T$$

چون  $\frac{nR}{P}$  ثابت است رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این رابطه در شکل روبه‌رو نشان داده شده است.

در این فرایند، هم گرما و هم کار مبادله می‌شود. ابتدا کار را محاسبه می‌کنیم. اگر فشار گاز  $P$  باشد با توجه به تعریف فشار در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه ( $P = \frac{F}{A}$ )، گاز طی این فرایند نیروی  $PA$  را به پیستون وارد می‌کند که در آن  $A$  مساحت پیستون است. اگر جابه‌جایی پیستون برابر با  $d$  باشد، با استفاده از تعریف کار در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه، کاری که گاز روی پیستون انجام می‌دهد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{کار گاز روی پیستون} = F d \cos \theta = (PA) d \cos 0^\circ = P(Ad)$$

ولی  $Ad$ ، تغییر حجم گاز درون استوانه است که برابر است با  $\Delta V = V_f - V_i$ ، در نتیجه،

$$\text{کار گاز روی پیستون} = P \Delta V \quad (۵-۱)$$

بنا به قانون سوم نیوتون، نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند و نیرویی که پیستون به گاز وارد می‌کند هم اندازه و در خلاف جهت یکدیگرند. از سوی دیگر می‌دانیم جابه‌جایی پیستون و جابه‌جایی لایه‌ گاز مجاور آن هم اندازه و هم جهت‌اند؛ پس می‌توان نوشت

$$-P\Delta V = \text{منفی کار گاز روی پیستون} = \text{کار پیستون روی گاز}$$

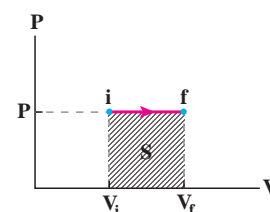
در این کتاب، کار محیط (در این مثال پیستون) روی دستگاه (در اینجا گاز) را با  $W$  نشان می‌دهیم. بنابراین، در فرایند هم فشار داریم:

$$W = -P\Delta V \quad (۶-۱)$$

بنا به رابطه فوق اگر گاز منبسط شود ( $\Delta V > 0$ ) کار محیط روی دستگاه ( $W$ ) منفی و اگر گاز متراکم شود ( $\Delta V < 0$ ) کار محیط روی دستگاه ( $W$ ) مثبت است.

از سوی دیگر در شکل ۱-۱ حاصل ضرب  $P\Delta V$  برابر با سطح زیر نمودار  $P-V$  (مساحت هاشورخورده) است. بنابراین، می‌توان گفت در فرایند هم فشار، قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر است با سطح زیر نمودار  $P-V$ .

گرچه این نتیجه برای یک فرایند هم فشار به دست آمد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر فرایند آرمانی برقرار است و همواره قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر مساحت سطح زیر نمودار فرایند در صفحه  $P-V$  است.



شکل ۱-۱: سطح زیر نمودار  $P-V$  برابر با قدرمطلق کار محیط روی دستگاه (یا کار دستگاه) است.

### مثال ۱-۱

۱۰۰ لیتر گاز کامل در فشار ثابت  $10^5 \text{ Pa} \times 1/100$  مقداری گرما به محیط می‌دهد و حجم آن  $10^\circ$  درصد کاهش می‌یابد.

اگر دمای اولیه گاز  $300^\circ \text{K}$  باشد دمای نهایی گاز و کار انجام شده روی آن چقدر است؟

پاسخ: چون گاز، کامل است و حجم آن به طور هم فشار کاهش یافته است، داریم:

$$\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$$

$$\frac{1/100}{300} = \frac{0/900}{T_f}$$

$$\Rightarrow T_f = 270^\circ \text{K}$$

در این فرایند، کار داده شده به گاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = -P\Delta V = -(10^5 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0/900 - 1/100) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 10^6 \text{ J}$$

### مثال ۱-۲

گرمای تبخیر آب در نقطه جوش  $226 \times 10^3 \text{ J/g}$  است. اگر  $10^\circ \text{g}$  (یا  $10^\circ \text{cm}^3$ ) آب بر اثر جوشیدن در فشار  $10^\circ \text{atm}$

( $10^5 \text{ Pa} \times 100 \approx 10^6 \text{ Pa}$ ) به  $167 \times 10^3 \text{ cm}^3$  بخار تبدیل شود،

الف) کار محیط روی آب چقدر است؟

ب) افزایش انرژی درونی آب چقدر است؟

پاسخ:

الف) چون تبخیر آب در فشار ثابت رخ داده است می توان نوشت:

$$W = -P\Delta V = -(1/0 \cdot 0 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(1/67 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1/0 \cdot 0 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = -1/67 \times 10^2 \text{ J}$$

ب) برای محاسبه تغییر انرژی درونی از قانون اول ترمودینامیک استفاده می کنیم:

$$\Delta U = Q + W$$

کار (W) را در قسمت الف محاسبه کردیم، کافی است Q را در این فرایند محاسبه کنیم. از کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه به یاد داریم:

$$Q = +mL_v = (1/0 \cdot 0 \text{ g})(2/26 \times 10^2 \text{ J/g}) = 2/26 \times 10^2 \text{ J}$$

و در نتیجه

$$\Delta U = 2/26 \times 10^2 \text{ J} + (-1/67 \times 10^2 \text{ J}) = 2/09 \times 10^2 \text{ J}$$

اکنون به محاسبه گرمایی می پردازیم که در فرایند هم فشار با دستگاه مبادله می شود. در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه  $\Delta T$ ، با رابطه  $Q = mc\Delta T$  داده می شود. با توجه به رابطه ۲-۱،  $m = nM$  است و در نتیجه داریم  $Q = nMc\Delta T$ . حاصل ضرب  $Mc$  را ظرفیت گرمایی مولی می نامیم و آن را در فرایند هم فشار با  $C_p$  نشان می دهیم. بنابراین:

$$Q = nC_p\Delta T \quad (7-1)$$

با توجه به این رابطه، یکای ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت،  $\text{J/mol}\cdot\text{K}$  است.

ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت چند گاز در جدول ۲-۱ آمده است.

می توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت با تقریب خوبی، برای گازهای کامل تک اتمی برابر با  $\frac{5}{2}R$  و برای اغلب گازهای کامل دو اتمی در دماهای معمولی برابر با  $\frac{7}{2}R$  است.

## مثال ۹-۱

مقدار گرمایی که  $1/0 \text{ liter}$  گاز کامل  $\text{O}_2$  در فشار  $1/0 \text{ atm}$  و دمای  $300 \text{ K}$  مبادله می کند تا دمایش به  $270 \text{ K}$  برسد چقدر است؟ آیا گاز گرما از دست می دهد یا گرما می گیرد؟

پاسخ: مقدار  $n$  برابر است با

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/0 \times 10^5 \text{ Pa})(1/0 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8/3 \text{ J/mol}\cdot\text{K})(300 \text{ K})} = 0/04 \text{ mol}$$

اکنون با استفاده از جدول ۲-۱ و رابطه ۷-۱ داریم:

$$Q = nC_p(T_f - T_i) = (0/04 \text{ mol})(29/4 \text{ J/mol}\cdot\text{K})(270 \text{ K} - 300 \text{ K}) = -35 \text{ J}$$

مقدار گرمای مبادله شده  $|Q| = 35 \text{ J}$  است و با توجه به اینکه  $Q$  منفی شده است، نتیجه می گیریم که گاز (دستگاه) گرما از دست می دهد.

جدول ۲-۱ — ظرفیت گرمایی مولی چند گاز در فشار ثابت بر حسب  $\text{J/mol}\cdot\text{K}$

$C_p$	گاز
۲۰/۸	Ar
۲۰/۸	He
۲۰/۸	Ne
۲۹/۱	هوا
$3/5 \cdot 05R = 29/1$	CO
$3/468R = 28/8$	$\text{H}_2$
$3/504R = 29/1$	HCl
۲۹/۱	$\text{N}_2$
$3/589R = 29/8$	NO
$3/533R = 29/4$	$\text{O}_2$
$4/082R$	$\text{Cl}_2$
$4/466R = 36/9$	$\text{CO}_2$
$5/494R$	$\text{CS}_2$
$4/112R$	$\text{H}_2\text{S}$
$4/671R$	$\text{N}_2\text{O}$
$4/799R$	$\text{SO}_2$

## مثال ۱۰-۱

مقداری گاز کامل تک اتمی در یک انبساط هم فشار،  $100 \text{ J}$  کار انجام می دهد. الف) گرمایی که گاز در این فرایند مبادله کرده چقدر است؟ ب) تغییر انرژی درونی گاز را محاسبه کنید.

پاسخ:

الف) گرما از رابطه  $1-7$  به دست می آید:

$$Q = nC_p \Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)\Delta T$$

که در آن از ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت گازهای کامل تک اتمی استفاده کرده ایم. در رابطه بالا  $nR\Delta T$  مجهول است و آن را باید به طریقی محاسبه کنیم. به این منظور از رابطه کار در فرایند هم فشار استفاده می کنیم:

$$\begin{aligned} W &= -P\Delta V = -P(V_f - V_i) \\ &= -(PV_f - PV_i) = -(nRT_f - nRT_i) \\ &= -nR\Delta T \end{aligned}$$

که در آن از قانون گازهای کامل ( $PV=nRT$ ) استفاده کرده ایم. از صورت مسئله می دانیم که گاز منبسط شده و  $100 \text{ J}$  کار انجام داده است. بنابراین  $W = -100 \text{ J}$  است و در نتیجه داریم:

$$nR\Delta T = 100 \text{ J}$$

با قراردادن این مقدار در رابطه  $Q$  خواهیم داشت:

$$Q = \left(\frac{5}{2}\right)(nR\Delta T) = \left(\frac{5}{2}\right)(100) = 250 \text{ J}$$

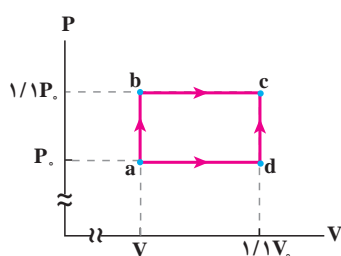
گرمای مبادله شده  $|Q| = 250 \text{ J}$  است. علامت مثبت  $Q$  نشان می دهد که این گرمایی است که گاز (دستگاه) گرفته است. ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W$$

که در آن گرمایی است که دستگاه گرفته و  $W$  کاری است که روی دستگاه انجام شده است. بنابراین:

$$\Delta U = 250 \text{ J} + (-100 \text{ J}) = 150 \text{ J}$$

## مثال ۱۱-۱



مقداری گاز کامل تک اتمی، مطابق شکل، از دو مسیر مختلف abc و adc به طور آرمانی از حالت اولیه a به حالت نهایی c رفته است.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر abc را بیابید.

ب) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر adc را بیابید.

پ) از مقایسه قسمت های الف) و ب) به چه نتیجه ای می رسید؟

پاسخ:

برای محاسبه انرژی درونی در هر دو قسمت از قانون اول ترمودینامیک

( $\Delta U = Q + W$ ) استفاده می کنیم که در آن  $Q$  گرمایی است که گاز (دستگاه) گرفته و  $W$  کار روی دستگاه است.

الف) کار در مسیر  $a \rightarrow b \rightarrow c$  برابر مجموع کار در مسیر  $ab$  و مسیر  $bc$  است :

$$W_{ab} = W_{\text{هم‌حجم}} = 0$$

$$W_{bc} = W_{\text{هم‌فشار}} = -P\Delta V = -1/1 P_0 (\cdot / 1 V_0) = -0/1 1 P_0 V_0$$

$$W_{abc} = W_{ab} + W_{bc} = -0/1 1 P_0 V_0$$

گرما در مسیر  $a \rightarrow b \rightarrow c$  برابر با مجموع گرما در مسیر  $ab$  و مسیر  $bc$  است :

$$\begin{aligned} Q_{ab} = Q_{\text{هم‌حجم}} &= nC_V \Delta T = n \left( \frac{3}{2} R \right) (T_b - T_a) = \frac{3}{2} (P_b V_b - P_a V_a) \\ &= \frac{3}{2} (1/1 P_0 V_0 - P_0 V_0) = 0/1 5 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{bc} = Q_{\text{هم‌فشار}} &= nC_P \Delta T = n \left( \frac{5}{2} R \right) (T_c - T_b) = \frac{5}{2} (P_c V_c - P_b V_b) \\ &= \frac{5}{2} (1/2 1 P_0 V_0 - 1/1 P_0 V_0) = 0/2 5 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = 0/4 2 5 P_0 V_0$$

در نتیجه تغییر انرژی درونی در مسیر  $a \rightarrow b \rightarrow c$  چنین می‌شود :

$$\Delta U_{abc} = W_{abc} + Q_{abc} = 0/3 1 5 P_0 V_0$$

ب) کار در مسیر  $a \rightarrow d \rightarrow c$  برابر مجموع کار در مسیر  $ad$  و  $dc$  است :

$$W_{ad} = W_{\text{هم‌فشار}} = -P\Delta V = -P_0 (\cdot / 1 V_0) = -0/1 P_0 V_0$$

$$W_{dc} = W_{\text{هم‌حجم}} = 0$$

$$W_{adc} = W_{ad} + W_{dc} = -0/1 P_0 V_0$$

گرما در مسیر  $a \rightarrow d \rightarrow c$  برابر مجموع گرما در مسیر  $ad$  و  $dc$  است :

$$\begin{aligned} Q_{ad} = Q_{\text{هم‌فشار}} &= nC_P \Delta T = n \left( \frac{5}{2} R \right) (T_d - T_a) = \frac{5}{2} (P_d V_d - P_a V_a) \\ &= \frac{5}{2} (1/1 P_0 V_0 - P_0 V_0) = 0/2 5 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{dc} = Q_{\text{هم‌حجم}} &= nC_V \Delta T = n \left( \frac{3}{2} R \right) (T_c - T_d) = \frac{3}{2} (P_c V_c - P_d V_d) \\ &= \frac{3}{2} (1/2 1 P_0 V_0 - 1/1 P_0 V_0) = 0/1 6 5 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$Q_{adc} = Q_{ad} + Q_{dc} = 0/4 1 5 P_0 V_0$$

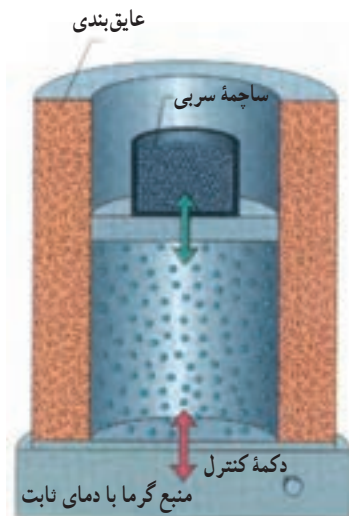
در نتیجه تغییر انرژی درونی در مسیر  $a \rightarrow d \rightarrow c$  چنین می‌شود :

$$\Delta U_{adc} = W_{adc} + Q_{adc} = 0/3 1 5 P_0 V_0$$

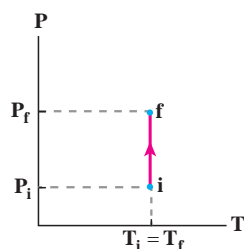
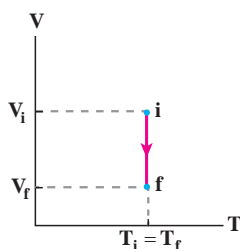
پ) از نتیجه‌های به دست آمده در قسمت‌های الف) و ب)، چنانکه پیش‌تر نیز اشاره شد، درمی‌یابیم در فرایندهای مختلفی که برای گاز (دستگاه) رخ می‌دهد، اگر گاز از حالت اولیه یکسان به حالت نهایی یکسانی برسد، تغییر انرژی درونی گاز مقدار ثابتی است و اصطلاحاً در ترمودینامیک می‌گویند تغییر انرژی درونی به مسیر بستگی ندارد.

**پ) فرایند هم‌دما:** دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می‌ماند؛ مثلاً برای انجام دادن یک تراکم هم‌دما می‌توان مطابق شکل ۱-۱۱ استوانه حاوی گاز را در تماس با یک منبع گرما با دمای ثابت قرار داد و حجم گاز داخل استوانه را با افزودن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون به آهستگی کاهش داد.

در هر تراکم جزئی، کار کوچکی روی گاز درون استوانه انجام می‌شود و بنا به قانون اول ترمودینامیک دمای گاز کمی افزایش می‌یابد و اختلاف دمای آن با منبع گرمایی باعث می‌شود که گاز مقداری گرما از دست بدهد تا دمای آن با دمای منبع یکسان شود. با ادامه تراکم‌های جزئی، گاز را به‌طور هم‌دما به فشار و حجم مورد نظر خود می‌رسانیم. در فرایند تراکم هم‌دما، کار محیط روی دستگاه مثبت است و گاز گرما از دست می‌دهد. نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  این فرایند در شکل ۱-۱۲ رسم شده است.



**شکل ۱-۱۱** استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی گلوله‌های سربی؛ تراکمی هم‌دما رخ می‌دهد.



**شکل ۱-۱۲** نمودارهای  $V-T$  و  $P-T$  برای یک تراکم هم‌دما آرمانی

### تمرین ۱-۲

مشابه آزمایشی که برای تراکم هم‌دما شرح دادیم، آزمایشی برای یک انبساط هم‌دما طراحی کنید، نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  را برای آن رسم و علامت‌های  $Q$  و  $W$  را برای چنین فرایندی تعیین کنید.

### فعالیت ۱-۲

انتهای یک سرنگ بزرگ (مثلاً  $10^\circ\text{C}$ ) 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؟ توضیح دهید.

### مثال ۱-۳

گاز کاملی را در دمای ثابت از حالت اولیه  $V_1 = 4^\circ\text{liter}$  و  $P_1 = 1^\circ\text{atm}$  تا حالت نهایی با حجم  $V_2 = 1^\circ\text{liter}$  متراکم می‌کنیم.

الف) در طی این فرایند، فشار گاز را برای هر یک از حجم‌های  $3^\circ\text{liter}$ ،  $2^\circ\text{liter}$  و  $1^\circ\text{liter}$  حساب کنید و نمودار  $P-V$  را با استفاده از روش نقطه‌یابی و معلوم بودن مختصات هر نقطه رسم کنید.

ب) مساحت سطح زیر این نمودار  $10^5 \times 5/5$  است.  $W$  و  $Q$  در این فرایند چقدر است؟

پاسخ:

الف) چون گاز، کامل و فرایند همدماست داریم:

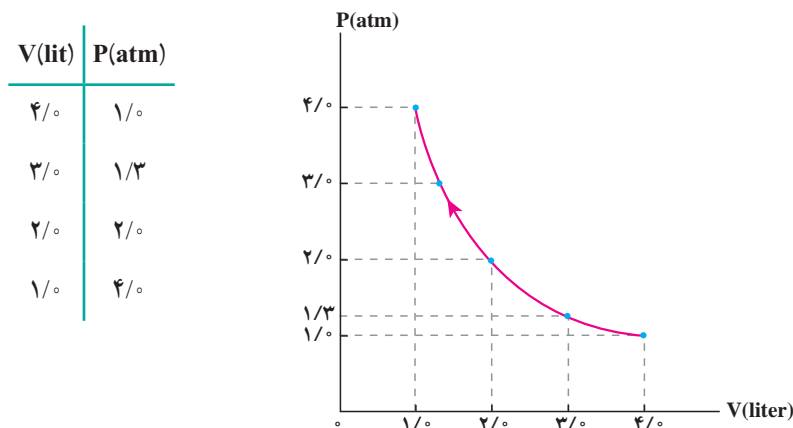
$$PV = nRT = \text{ثابت} \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots$$

$$V_2 = 3 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(3/0) \Rightarrow P_2 = 1/3 \text{ atm}$$

$$V_2 = 2 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(2/0) \Rightarrow P_2 = 2/0 \text{ atm}$$

$$V_2 = 1 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(1/0) \Rightarrow P_2 = 4/0 \text{ atm}$$

مختصات نقطه‌های مربوط به نمودار P-V را در جدول یادداشت و نمودار را رسم می‌کنیم:



ب) چون گاز متراکم شده است، علامت کار انجام شده بر روی گاز مثبت است:

$$W = +5/5 \times 10^2 \text{ J}$$

برای گاز کامل انرژی درونی گاز فقط تابع دمای مطلق آن است و در فرایند هم‌دما، دما ثابت می‌ماند. بنابراین داریم:

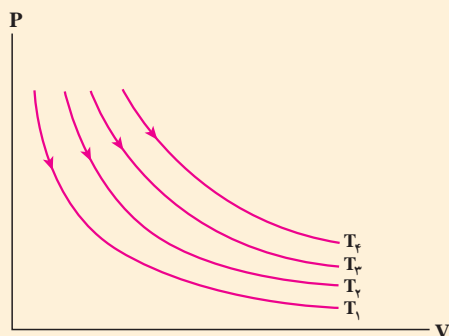
$$\Delta U = 0$$

آنگاه با استفاده از قانون اول ترمودینامیک گرمای داده شده به گاز به دست می‌آید:

$$\Delta U = Q + W \Rightarrow Q + 5/5 \times 10^2 = 0 \Rightarrow Q = -5/5 \times 10^2 \text{ J}$$

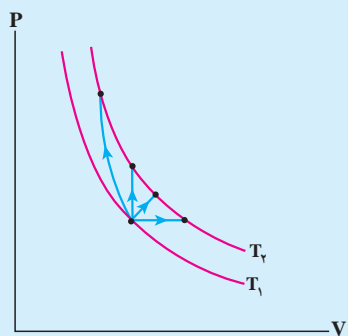
در حالت کلی، در فرایند هم‌دمای گاز کامل همواره  $Q = -W$  است.

## تمرین ۱-۳



در شکل مقابل، نمودار P-Vی مربوط به انبساط هم‌دمای یک گاز کامل در دماهای مختلف رسم شده است. نشان دهید:  $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ .

## فعالیت ۱۳



در شکل روبه‌رو گاز کاملی را از طریق چند فرایند مختلف از جمله یک فرایند هم‌حجم و یک فرایند هم‌فشار از دمای  $T_1$  به دمای  $T_2$  رسانده‌ایم.

الف) نشان دهید تغییر انرژی درونی در تمام فرایندها از رابطه  $\Delta U = nC_V \Delta T$  به دست می‌آید.

ب) با استفاده از فرایندهای هم‌حجم و هم‌فشار نشان دهید

$$C_p - C_v = R$$

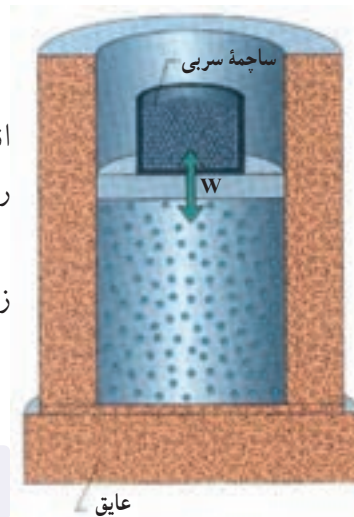
**ت) فرایند بی‌دررو:** در این فرایند بین دستگاه (گاز) و محیط، گرما مبادله نمی‌شود. برای انجام دادن این فرایند باید دستگاه را مطابق شکل ۱۳-۱ عایق بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را با افزودن یا کاستن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون به آهستگی انجام دهیم. در فرایند بی‌دررو  $Q=0$  است. بنابراین، قانون اول ترمودینامیک برای این فرایند به صورت زیر درمی‌آید:

$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

یا

$$W_{\text{بی‌دررو}} = \Delta U$$

(۱۳-۱)



**شکل ۱۳-۱** با کاستن یا افزودن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون، گاز درون استوانه عایق‌پوش شده، انبساط یا تراکم بی‌دررو پیدا می‌کند.

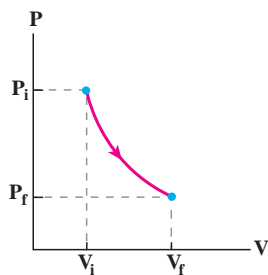
همچنین هنگامی که یک گاز را به سرعت متراکم یا منبسط می‌کنیم، چون گاز فرصت تبادل گرما با محیط را پیدا نمی‌کند، فرایند به صورت بی‌دررو در نظر گرفته می‌شود.

## فعالیت ۱۴



گاهی اوقات وقتی یک نوشابه خیلی سرد را از یخچال بیرون می‌آوریم و در آن را بلافاصله باز می‌کنیم، مشاهده می‌شود که مه رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می‌شود. این پدیده را توجیه کنید.





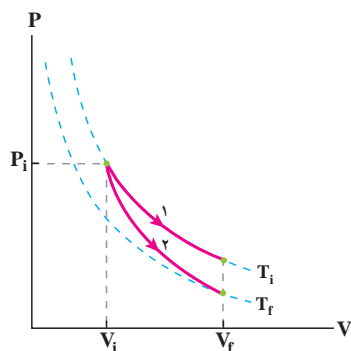
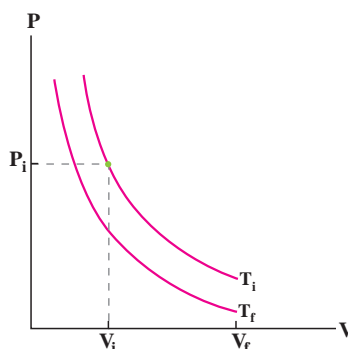
گاز کاملی را با حجم  $V_i$  و فشار  $P_i$  در نظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی‌دررو منبسط کنیم، نشان داده می‌شود که نمودار  $P-V$  آن خمی شبیه خم یک فرایند هم‌دما می‌شود. الف) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نشان دهید گاز کامل در انبساط بی‌دررو سرد می‌شود.

ب) گاز کاملی با حجم  $V_i$  و فشار  $P_i$  را تا حجم نهایی  $V_f$  یک بار به صورت هم‌دما و بار دیگر به صورت بی‌دررو منبسط می‌کنیم. با استفاده از نتیجه قسمت الف، نمودارهای این دو فرایند را در یک صفحه  $P-V$  رسم و با هم مقایسه کنید.

پ) در کدام فرایند  $|W|$  بیشتر است؟

پاسخ:

الف) با توجه به رابطه  $\Delta U_{\text{بی‌دررو}} = W$  و با توجه به اینکه در انبساط، کار محیط روی گاز (دستگاه) منفی است نتیجه می‌گیریم  $\Delta U < 0$  است؛ چون گاز، کامل است کاهش انرژی درونی گاز با کاهش دمای آن همراه است؛ یعنی دمای گاز کاهش می‌یابد. این را می‌توانستیم از رابطه  $\Delta U = nC_V \Delta T$  که در فعالیت ۳-۱ به دست آوردید نیز نتیجه بگیریم. ب) در شکل زیر دو منحنی هم‌دما با دماهای  $T_i$  و  $T_f$  رسم شده‌اند. از تمرین ۳-۱ می‌دانیم  $T_f < T_i$  است.



بدیهی است که در انبساط هم‌دما، دما تغییر نمی‌کند و همواره  $T = T_i$  است (مسیر ۱). ولی در قسمت الف نشان دادیم که در انبساط بی‌دررو دمای گاز کاهش می‌یابد، پس قاعدتاً گاز باید به دمایی پایین‌تر مثل دمای  $T_f$  در شکل برسد (مسیر ۲).

علاوه بر این برای رسم نمودار می‌توان فشارهای نهایی را با استفاده از قانون گازهای کامل با یکدیگر مقایسه کرد. همان‌طور که در مثال ۱۴-۱ خواهید دید فشار نهایی در انبساط بی‌دررو کمتر از فشار نهایی در انبساط هم‌دما می‌شود.

پ) چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم‌دما بیشتر است،  $|W|$  برای این فرایند مقدار بیشتری دارد.

مثال ۱۳-۱ را با فرض آنکه گاز به جای انبساط، تراکم باید پاسخ دهید.

## مثال ۱-۱۴

۵/۰۰ mol از یک گاز کامل تک اتمی را از حالت اولیه ( $P_i, V_i, T_i = 300 \text{ K}$ ) تا حجم نهایی  $V_f$  یک بار به صورت هم دما و بار دیگر به صورت بی دررو منبسط می کنیم. در انبساط بی دررو دمای مطلق گاز ۵/۰۰ درصد کاهش می یابد. الف) فشار نهایی گاز در انبساط بی دررو چند برابر فشار نهایی انبساط هم دما است؟ ب) کار انجام شده روی گاز در انبساط بی دررو را حساب کنید.

پاسخ:

$$\left(\frac{P_f V_f}{T_f}\right)_{\text{بی دررو}} = \left(\frac{P_f V_f}{T_f}\right)_{\text{هم دما}}$$

الف)

با توجه به اینکه حجم نهایی در دو فرایند یکسان است، داریم:

$$\left(\frac{P_f}{T_f}\right)_{\text{بی دررو}} = \left(\frac{P_f}{T_f}\right)_{\text{هم دما}} \Rightarrow \frac{P_f}{P_{\text{هم دما}}} = \frac{T_f}{T_{\text{هم دما}}} = \frac{285 \text{ K}}{300 \text{ K}} = 0.95$$

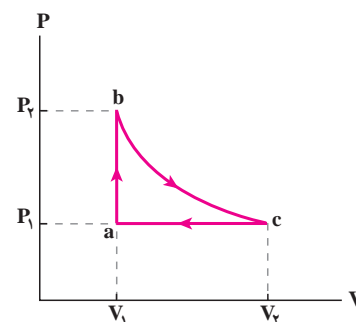
ب) با استفاده از رابطه ۸-۱ داریم:

$$W_{\text{بی دررو}} = \Delta U = nC_V \Delta T = n\left(\frac{3}{2}R\right)\Delta T$$

$$= (5.00 \text{ mol})\left(\frac{3}{2} \times 8.31 \text{ J/mol.K}\right)(-150 \text{ K}) = -935 \text{ J}$$

## ۱-۶- چرخه ترمودینامیکی

دستگاه می تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایندی را که در شکل ۱-۱۴ می بینید، از سه فرایند هم حجم، بی دررو و هم فشار تشکیل شده است. طی این فرایند، دستگاه نخست 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  $P_2$ ) می رود. سپس از طریق یک انبساط بی دررو به حالت c (با حجم  $V_2$  و فشار  $P_1$ ) می رسد. در ادامه، دستگاه با فرایندی هم فشار به حالت اولیه a بازمی گردد. مجموعه این فرایندها یک چرخه ترمودینامیکی را تشکیل می دهد. در چرخه ترمودینامیکی دستگاه پس از طی چند فرایند به حالت اولیه خود برمی گردد؛ چون در چرخه ترمودینامیکی حالت نهایی با حالت ابتدایی یکسان است تغییر انرژی درونی برابر صفر است ( $\Delta U = 0$ ). بنابراین از قانون اول ترمودینامیک برای چرخه های ترمودینامیکی داریم:



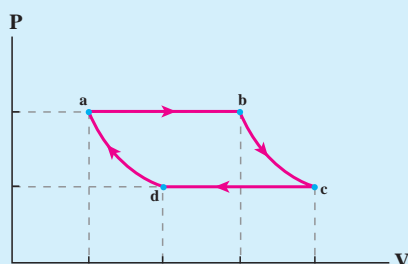
شکل ۱-۱۴ چرخه ترمودینامیکی، حلقه بسته ای را در صفحه P-V تشکیل می دهد.

$$Q = -W$$

$$(۱-۹) \text{ (چرخه ترمودینامیکی)}$$

## فعالیت ۱-۵

شکل زیر یک چرخه ترمودینامیکی فرضی را نشان می دهد که یک دستگاه ترمودینامیکی آن را طی کرده است.



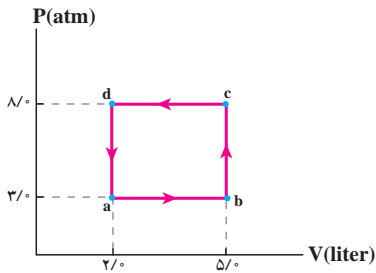
الف) کار انجام شده روی دستگاه در هر فرایند را برحسب سطح زیر نمودار آن بیان کنید.

ب) نشان دهید اندازه کار کل انجام شده روی دستگاه برابر با مساحت داخل چرخه است.

پ) کار کل انجام شده روی دستگاه مثبت است یا منفی؟ توضیح دهید.

با انجام فعالیت ۱-۵ دریافتیم اندازه کار انجام شده در چرخه برابر با مساحت داخل چرخه در صفحه  $P-V$  است و می توان نشان داد در چرخه های ساعتگرد در صفحه  $P-V$  کار انجام شده بر روی دستگاه، منفی و در چرخه های پاد ساعتگرد، مثبت است.

## مثال ۱-۱۵



گازی چرخه ترمودینامیکی فرضی نشان داده شده در شکل را طی می کند.

الف) کار انجام شده روی گاز در این چرخه چقدر است؟

ب) گرمای مبادله شده بین گاز و محیط در چرخه چقدر است؟

پاسخ:

الف) کار انجام شده برابر با مساحت سطح داخل چرخه است:

$$|W| = S_{abcd} = (8/0 - 3/0) \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times (5/0 - 2/0) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

چون چرخه در صفحه  $P-V$  پاد ساعتگرد است، داریم

$$W = +1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

ب) با توجه به رابطه ۱-۹ می توان نوشت:

$$Q = -W = -1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

بنابراین، گرمای مبادله شده بین گاز و محیط  $|Q| = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$  است و در این چرخه گاز به محیط گرما داده است.

## ۲-۱- ماشین های گرمایی

تا حدود ۲۵۰ سال پیش انرژی مکانیکی مورد نیاز انسان به طور عمده از طریق نیروی ماهیچه ای انسان ها و حیوان ها تأمین می شد. از نیروی حاصل از باد و جریان آب (مثلاً در آسیاب های بادی و آبی) نیز انرژی مکانیکی به دست می آمد. اما استفاده از این منابع انرژی فقط در زمان ها و مکان های خاصی امکان پذیر بود. امروزه بیشتر انرژی مورد نیاز انسان از طریق ماشین های گرمایی به دست می آید. این ماشین ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می کنند. از نظر تاریخی نخستین ماشین های گرمایی، **ماشین های برون سوز** مانند ماشین بخار بوده است. انرژی مکانیکی حاصل از این ماشین ها در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار، زیردریایی، فضاپیما و ... به طور مستقیم مورد استفاده قرار می گیرد. در نیروگاه ها این انرژی ابتدا به انرژی الکتریکی تبدیل می شود و سپس از طریق شبکه برق رسانی به مکان های مختلف منتقل می گردد. از این طریق انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی فراهم می آید.

**ماشین های درون سوز** نوع دیگری از ماشین های گرمایی هستند که با سوخت هایی چون بنزین، گاز یا گازوئیل کار می کنند. این نوع ماشین ها در موتور اتومبیل ها و کامیون ها و نیز در برخی هواپیماها به کار گرفته می شوند.

ماشین های گرمایی با ترکیب چند فرایند، مقداری گرما دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می کنند. از آنجا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین ها به این

صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیه خود برمی گردد؛ یعنی این ماشین‌ها در یک چرخه معین کار می‌کنند و این چرخه، در ضمن کار ماشین دائماً تکرار می‌شود.

اساس کار همه ماشین‌های گرمایی یکسان است. در ادامه با ذکر مثال‌هایی چگونگی کار ماشین‌های برون‌سوز و درون‌سوز را توضیح می‌دهیم و با اساس کار ماشین‌های گرمایی آشنا می‌شویم.

### الف) ماشین‌های گرمایی برون‌سوز:

ماشین‌های بخار و استرلینگ دو نوع آنها هستند. در ادامه به توضیح ماشین بخار می‌پردازیم.

**ماشین بخار:** ماشین بخار در نواحی مختلف جهان به طور گسترده برای تولید برق مورد استفاده

قرار می‌گیرد. دیدیم که در ماشین‌های گرمایی، دستگاه در یک چرخه مقداری گرما دریافت می‌کند و بر

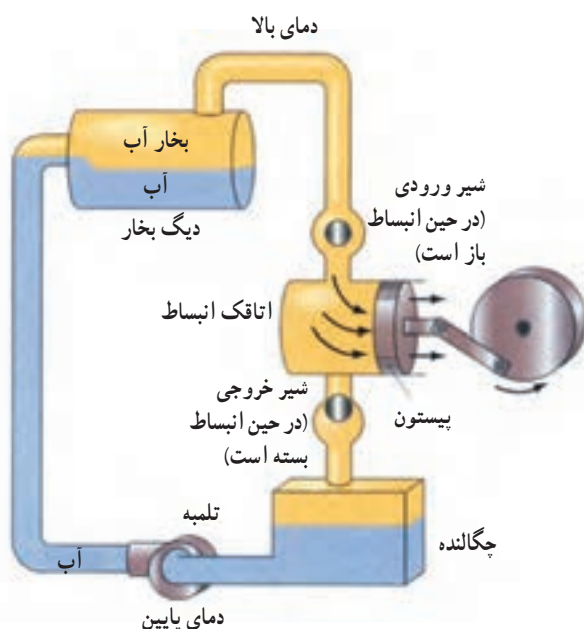
روی محیط کار انجام می‌دهد. در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور

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 اولیه خود در دیگ

بخار برمی‌گردد و این چرخه دائماً تکرار می‌شود. چون گرما توسط کوره (یعنی از بیرون دستگاه) به

آب داده می‌شود، ماشین بخار از ماشین‌های برون‌سوز محسوب می‌شود.



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

برای بررسی نحوه کار ماشین بخار، مقدار مشخصی از آب درون دیگ بخار را در نظر می‌گیریم،

و فرایندهایی را که این آب در ماشین بخار طی می‌کند با اندکی ساده‌سازی توضیح می‌دهیم. شکل

۱-۱۶ این فرایندها را به طور تقریبی نشان می‌دهد. تمام این فرایندها آرمانی فرض شده‌اند.

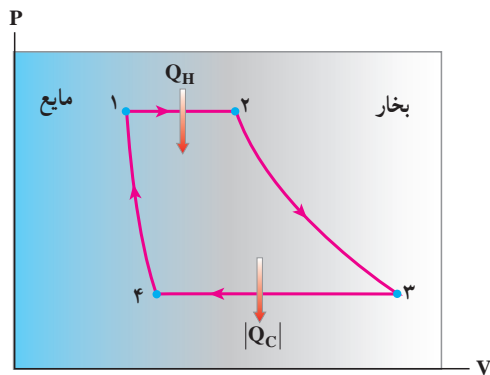
**الف) مرحله اول (از ۱ تا ۲):** در این مرحله آب، درون دیگ بخار در فشار ثابت و نسبتاً زیاد از

کوره گرما می‌گیرد و به بخار تبدیل می‌شود. دما و حجم بخار آب در این مرحله تا حد معینی افزایش می‌یابد.

**ب) مرحله دوم (از ۲ تا ۳):** 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 نتیجه

## ترمودینامیک



شکل ۱-۱۷ نمودار ساده شده چرخه ماشین بخار در صفحه P-V (چرخه رانکین). توجه کنید که تمام فرایندها در این چرخه، آرمانی فرض شده‌اند.

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.

**پ) مرحله سوم (از ۳ تا ۴):** 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 یا فن‌های خیلی قوی آن را خنک می‌کنند، هدایت می‌شود. در چگالنده، بخار آب در فشار ثابت گرمای دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود. در این فرایند، حجم بخار آب کاهش می‌یابد.

**ت) مرحله چهارم (از ۴ تا ۱):** تلمبه، آب حاصل از میعان را به دیگ بخار برمی‌گرداند و فشار آن را به طور بی‌دررو به فشار اولیه می‌رساند (فقط تغییرات کوچکی در دما و حجم مایع رخ می‌دهد) و بدین ترتیب یک چرخه ترمودینامیکی کامل می‌شود.

در حین کار ماشین بخار، این چرخه دائماً تکرار می‌شود. دستگاه در این چرخه به طور 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.

## تمرین ۱-۵

با استفاده از نمودار P-Vی ماشین بخار

الف) مشخص کنید که آب در مرحله‌های ۱→۲، ۲→۳، ۳→۴ و ۴→۱، گرما گرفته یا از دست داده است؟

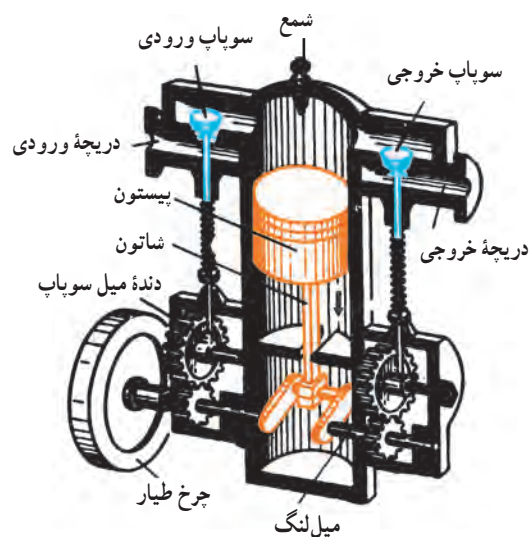
ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نشان دهید رابطه  $Q_{12} + Q_{34} + W_{\text{چرخه}} = 0$  برقرار است.

## فعالیت ۱-۷

ماشین استرلینگ در سال ۱۸۱۶ میلادی (۱۱۹۵ هجری شمسی) توسط رابرت استرلینگ اسکاتلندی اختراع شد. این ماشین که مدت‌ها به فراموشی سپرده شده بود، اکنون برای استفاده در خودروها، فضاپیماها و زیردریایی‌ها توسعه یافته است. درباره این ماشین و مراحل مختلف چرخه آن تحقیق کنید. برای ارائه این تحقیق سعی کنید از تصاویر و نمودارهای مناسب آموزشی استفاده و آن را به صورت پاورپوینت به کلاس گزارش کنید.

**ب) ماشین‌های گرمایی درون‌سوز:** موتور بیشتر خودروهای سواری، هواپیماهای ملخ‌دار، برخی کشتی‌ها، قطارها و نیروگاه‌های کوچک درون‌سوزاند. ماشین‌های گرمایی درون‌سوز انواع مختلفی دارند که دو نوع متداول آنها بنزینی و دیزلی نام دارند. در اینجا به توصیف ماشین‌های بنزینی می‌پردازیم.

موتور بنزینی از یک یا چند استوانه (سیلندر) تشکیل شده است که پیستون‌ها در داخل آنها حرکت می‌کنند. یکی از این استوانه‌ها و اجزای جانبی آن در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است. در این نوع موتور، بخشی از انرژی حاصل از سوخت، سبب حرکت پیستون می‌شود. این حرکت از طریق دسته (شاتون) و میل‌لنگ به حرکت دورانی تبدیل می‌شود. با انتقال این حرکت دورانی به چرخ‌ها، اتومبیل حرکت می‌کند. بخش دیگر انرژی از طریق رادیاتور، که موتور را سرد می‌کند، و لوله خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.



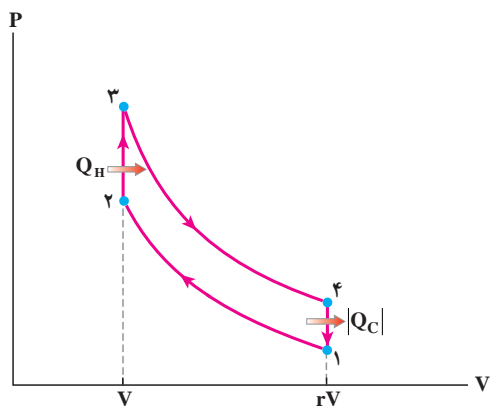
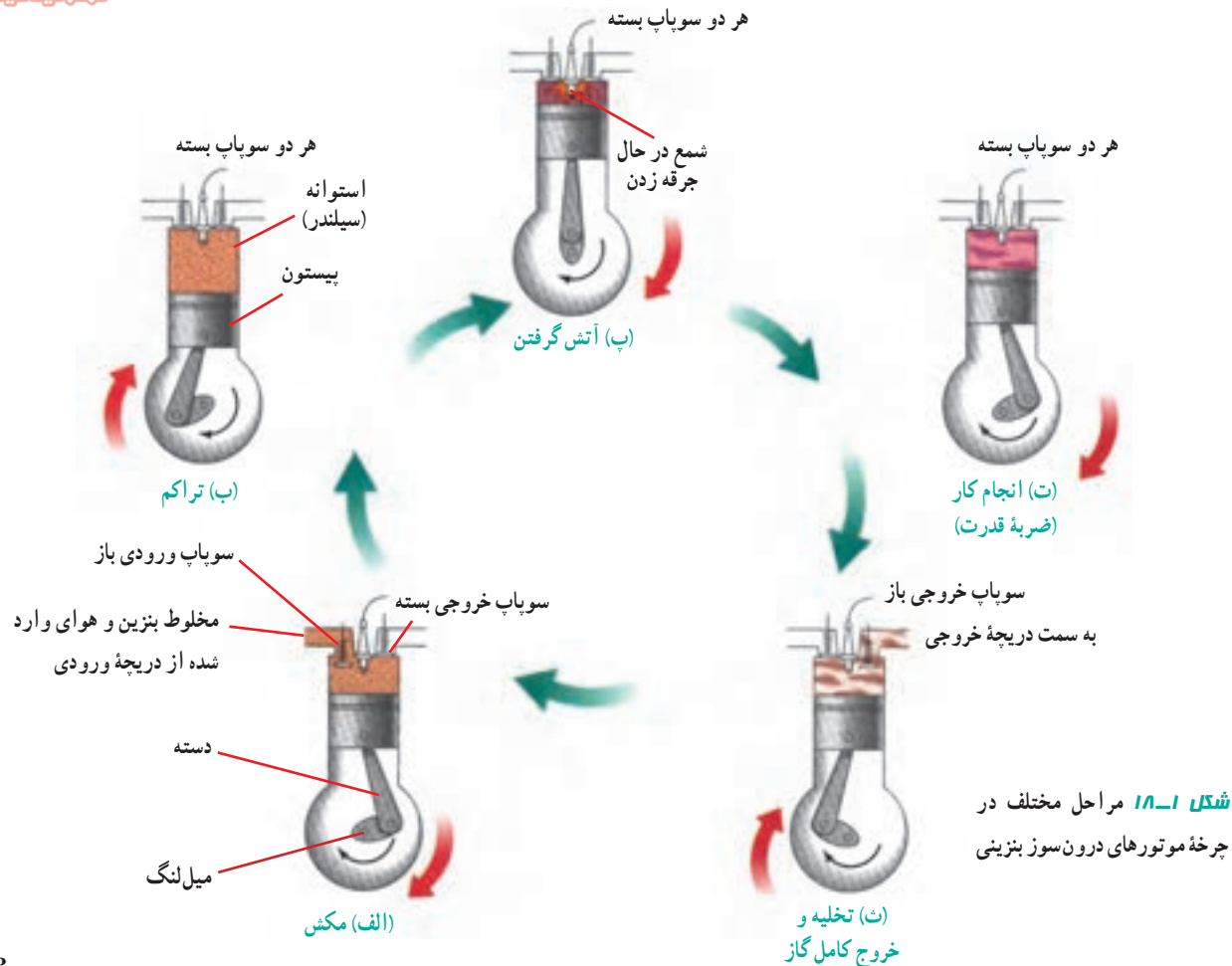
شکل ۱-۱۷ استوانه (سیلندر) و اجزای جانبی موتور

مراحل مختلف کار ماشین‌های گرمایی درون‌سوز بنزینی (شکل ۱-۱۸) به شرح زیر است:

**الف) مرحله مکش:** با پایین آمدن پیستون، مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه ورودی وارد استوانه می‌شود. وقتی پیستون بالاست حجم فضای بالای آن  $V$  و وقتی پیستون پایین است حجم این فضا  $rV$  است ( $r$  را ضریب یا نسبت تراکم می‌گویند). وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ دریچه ورودی بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا در داخل استوانه محبوس می‌شود. **ب) مرحله تراکم:** پیستون بالا می‌آید، مخلوط را متراکم می‌کند و آن را به حجم  $V$  می‌رساند. این تراکم به سرعت رخ می‌دهد و بنابراین می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در پایان این مرحله، دما و فشار مخلوط بسیار بالا رفته است.

**پ) مرحله آتش‌گرفتن:** هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط آتش می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت  $V$  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) مرحله انجام کار:** در این مرحله در اثر فشار زیاد، مخلوط منبسط می‌شود و حجم آن از  $V$  به  $rV$  می‌رسد. این انبساط به سرعت رخ می‌دهد و بنابراین می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در این انبساط، فشار و دمای مخلوط کاهش می‌یابد. در این مرحله مخلوط، پیستون را به شدت به پایین می‌راند و روی آن کار انجام می‌دهد. این کار توسط میل‌لنگ به اجزای دیگر ماشین منتقل می‌شود. **ث) مرحله تخلیه و خروج کامل گاز:** این مرحله از دو بخش تشکیل شده است. در بخش اول، در حالی که پیستون در پایین‌ترین وضعیت (حجم  $rV$ ) قرار دارد، سوپاپ دریچه خروجی باز می‌شود و قسمتی از محصولات احتراق به صورت دود از دریچه خروجی خارج می‌شود و فشار تا فشار جو کاهش پیدا می‌کند. در بخش دوم مرحله تخلیه، پیستون بالا می‌آید و بقیه محصولات احتراق را بیرون



شکل ۱۸-۱ چرخه اتو که با فرض آرمانی بودن همه فرایندها رسم شده است.

- ۱ تا ۲- دستگاه به سرعت متراکم می‌شود، فشار و دمای آن افزایش و حجم آن کاهش می‌یابد (مرحله تراکم).
- ۲ تا ۳- دستگاه گرمای  $Q_H$  را می‌گیرد و دما و فشار آن به مقدار زیادی بالا می‌رود (معادل مرحله آتش گرفتن).
- ۳ تا ۴- دستگاه به سرعت منبسط می‌شود، دما و فشار آن کاهش می‌یابد و پیستون را به طرف پایین می‌راند (مرحله انجام کار).
- ۴ تا ۱- دستگاه گرمای  $|Q_C|$  را از دست می‌دهد و دما و فشار آن کاهش می‌یابد (معادل مرحله تخلیه).

می‌راند و حجم فضای بالای پیستون به مقدار اولیه  $V$  می‌رسد. در مرحله تخلیه با خروج دود مقدار زیادی گرما به هوای بیرون داده می‌شود.

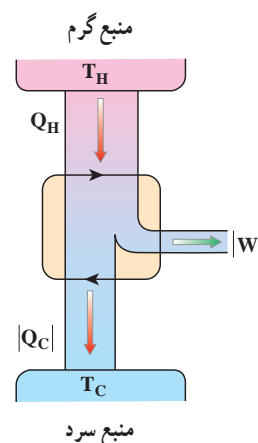
چرخه اتو: نحوه عمل یک ماشین درون سوز بنزینی را می‌توان با فرض مجموعه‌ای از شرایط به طور تقریبی بیان کرد و براساس این فرض‌ها چرخه‌ای موسوم به **چرخه اتو** را در صفحه  $P-V$  رسم کرد. این فرض‌ها عبارت‌اند از:

- ۱- دستگاه (مخلوط بنزین و هوا) همواره یک گاز کامل است و بنابراین، اشتعالی بر اثر واکنش شیمیایی در آن رخ نمی‌دهد. ولی با گرفتن گرمای  $Q_H$  از محیط به همان دما و فشار گاز در پایان مرحله آتش گرفتن ماشین واقعی می‌رسد.
  - ۲- تمام فرایندها آرمانی‌اند.
  - ۳- مرحله تخلیه گاز رخ نمی‌دهد، گاز در داخل استوانه باقی می‌ماند و با دادن گرمای  $|Q_C|$  به محیط، دما و فشار آن کاهش می‌یابد.
- چرخه اتو در شکل ۱۹-۱ رسم شده است.



### ۸-۱ - بازده ماشین گرمایی

در بررسی ماشین های بخار و درون سوز بنزینی دیدیم که با فرض آرمانی بودن همه فرایندها، دستگاه یک چرخه کامل را می پیماید و در طی آن مقداری گرما از یک منبع گرم می گیرد ( $Q_H$ )، مقداری کار انجام می دهد ( $|W|$ ) و مقداری گرما به یک منبع سرد می دهد ( $|Q_C|$ ). با توجه به آنچه گفته شد، طرز کار همه ماشین های گرمایی آرمانی را می توان مانند شکل ۱-۲ به صورت طرح وار نشان داد. هدف هر ماشین گرمایی آن است که انرژی گرمایی گرفته شده  $Q_H$  را تا آنجا که ممکن است به کار بیشتری تبدیل کند. برای اندازه گیری اینکه در چرخه ماشین گرمایی چقدر از انرژی داده شده به دستگاه، به کار مکانیکی تبدیل می شود، بازده گرمایی  $\eta$  را تعریف می کنیم. بازده یک ماشین گرمایی با نسبت کار انجام شده در چرخه ماشین به انرژی گرمایی که ماشین دریافت می کند، تعریف می شود:



شکل ۱-۲ طرز کار طرح وار یک ماشین گرمایی آرمانی

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \quad (1-1) \quad (\text{برای هر ماشین})$$

با فرض آرمانی بودن فرایندهای طی شده در چرخه ماشین و با چشم پوشی از اصطکاک و سایر اتلاف های انرژی، قانون اول ترمودینامیک برای چرخه این ماشین ها به صورت زیر نوشته می شود:

$$\Delta U = Q + W$$

همان طور که می دانیم تغییر انرژی درونی دستگاه در هر چرخه صفر است ( $\Delta U = 0$ ). از طرفی

$Q$  شامل دو جمله  $Q_H$  و  $Q_C$  است ( $Q = Q_H + Q_C$ ). پس می توان نوشت:

$$0 = Q_H + Q_C + W$$

در این رابطه،  $Q_H$  مثبت و  $Q_C$  و  $W$  منفی است. بنابراین:

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

بنابراین، بازده برای ماشین های گرمایی آرمانی به صورت زیر در می آید:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} \quad (1-2) \quad (\text{برای ماشین های آرمانی})$$

بازده واقعی ماشین های گرمایی با بازده ماشین های آرمانی متفاوت است. بازده واقعی ماشین های

درون سوز بنزینی در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، بازده واقعی ماشین های درون سوز دیزلی در حدود ۴۰ درصد و بازده ماشین های بخار نیز در حدود ۴۰ درصد است. رابطه ۱-۱۲ نشان می دهد که بازده ماشین های گرمایی نمی تواند بیشتر از یک باشد.



## فعالیت ۷-۱

محاسبه نشان می‌دهد که با بالا بردن نسبت تراکم  $r$  می‌توان به بازده بیشتری برای ماشین‌های درون‌سوز بنزینی دست یافت. اما در عمل ممکن نیست به نسبت تراکم بالاتر از ۴ یا ۵ دست یافت؛ زیرا در نسبت‌های تراکم بالاتر، مخلوط سوخت و هوا چنان گرم می‌شود که پیش از جرقه زدن شمع، آتش می‌گیرد. این مشکل را رودلف کریستین کارل دیزل<sup>۱</sup> مخترع و مهندس آلمانی با طراحی ماشین‌های در پایان سده نوزدهم تا حدودی برطرف کرد. در ماشین دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا، خود هوا متراکم می‌شود. نسبت تراکم به ۱۱ تا ۱۲ می‌رسد و هوا تا حدود  $600^{\circ}\text{C}$  گرم می‌شود. در پایان تراکم، سوخت مایع به درون سیلندر پاشیده می‌شود. دربارهٔ مرحله‌های مختلف چرخهٔ این ماشین و نمودار آن در صفحهٔ P-V تحقیق کنید.

## مثال ۱۴-۱

یک ماشین گرمایی آرمانی در هر چرخه  $4/0$  kJ گرما از منبع گرم دریافت می‌کند و  $2/4$  kJ گرما به منبع سرد می‌دهد. الف) در هر چرخه چقدر کار روی محیط انجام می‌شود؟  
ب) بازدهٔ این ماشین چقدر است؟  
پاسخ: الف) از رابطهٔ ۱-۱۱ داریم:

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

$$|W| = 4/0 \text{ kJ} - 2/4 \text{ kJ} = 1/6 \text{ kJ}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۱-۱۲ بازدهٔ این ماشین به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = \frac{1/6 \text{ kJ}}{4/0 \text{ kJ}} = 0/40$$

بنابراین در این ماشین گرمایی  $40\%$  درصد از گرمای دریافت شده از منبع گرم، به منبع سرد داده شده و تنها  $40\%$  درصد آن به کار تبدیل شده است.

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

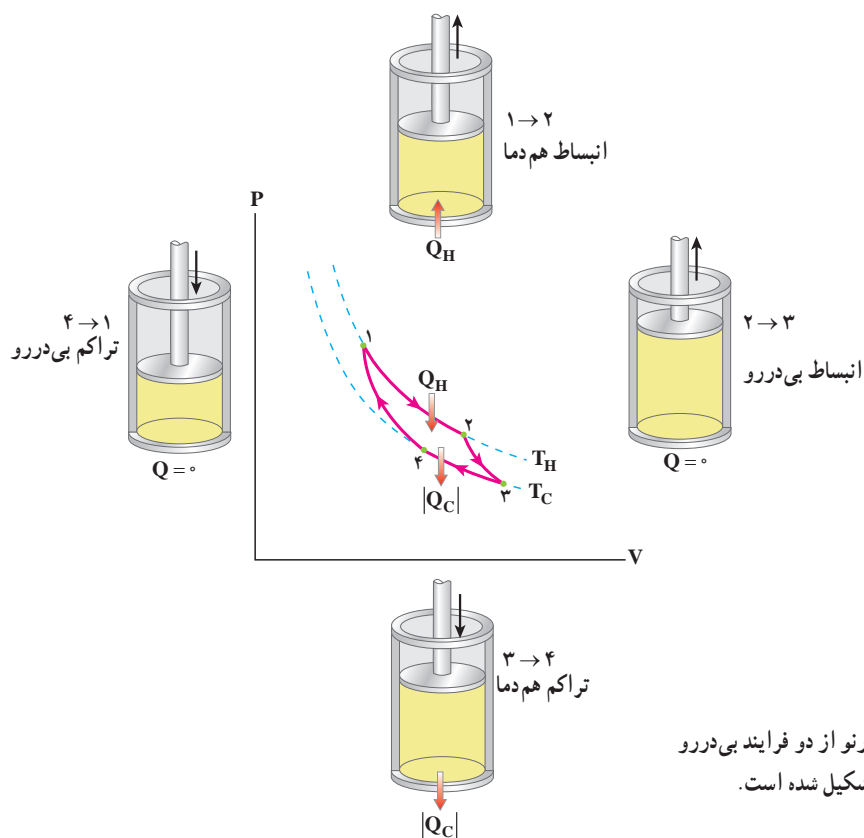
در بررسی ماشین‌های گرمایی در بخش قبل، دیدیم که همهٔ این ماشین‌ها با دو منبع گرما که دمای متفاوتی دارند، کار می‌کنند. در این ماشین‌ها، دستگاه گرمای  $Q_H$  را از یک منبع گرم می‌گیرد، مقداری از آن را به کار ( $|W|$ ) تبدیل می‌کند و بقیه ( $|Q_C|$ ) را به یک منبع سرد می‌دهد. در واقع، هیچ‌یک از ماشین‌های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

۱ - Christian Carl Rudolf Diesel (۱۸۵۸ - ۱۹۱۳)

بیان بالا، قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نامیده می‌شود؛ یعنی ممکن نیست بازده یک ماشین گرمایی برابر یک (۱۰۰ درصد) شود. توجه داریم که، اگر در چرخه یک ماشین گرمایی، تمام گرمای گرفته شده از منبع گرم 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.

**قضیه کارنو:** براساس قانون دوم ترمودینامیک بازده ماشین‌های گرمایی همواره از ۱۰۰ درصد کمتر است. اکنون این پرسش مطرح می‌شود که بیشترین بازده ممکن برای ماشین گرمایی‌ای که بین دو منبع گرم و سرد با دماهای  $T_H$  و  $T_C$  کار می‌کند چقدر است؟ پاسخ به این پرسش را **سدهی کارنو** مهندس جوان فرانسوی در سال ۱۸۲۴ میلادی ارائه داد. او یک ماشین فرضی و آرمانی را طراحی کرد که بازده آن بیشینه و سازگار با قانون دوم ترمودینامیک باشد. این ماشین فرضی را **ماشین کارنو** و چرخه‌ای را که ماشین براساس آن کار می‌کند **چرخه کارنو** می‌نامند. چرخه کارنو از دو فرایند بی‌دررو و دو فرایند هم‌دما تشکیل شده است (شکل ۱-۲۱).

مراحل عمل چرخه کارنو به این ترتیب است:



**شکل ۱-۲۱** چرخه کارنو از دو فرایند بی‌دررو و دو فرایند هم‌دما تشکیل شده است.



نیکلاس سدی کارنو

نیکلاس لئونارد سدی کارنو<sup>۱</sup> در اوّل ژوئن ۱۷۹۶ م. (۱۱۷۵ هجری شمسی) در پاریس و در خانواده‌ای که در آن علم و سیاست عجین شده بود، به دنیا آمد. او نخستین پسر لائزار کارنو یک ریاضی‌دان سرشناس بود که در عین حال از رهبران ارتش انقلابی فرانسه نیز محسوب می‌شد. لائزار بخش سوم نام فرزند خود را از شاعر معروف ایرانی، سعدی شیرازی برگرفته بود که از قضا بعدها به همین نام نیز شناخته شد. سدی کارنو در ۱۶ سالگی وارد انستیتو پلی تکنیک پاریس شد که هدفش تربیت افسران مهندس بود و در آنجا تحت تعلیم دانشمندان بنامی چون آمبر، آرگو، گی - لوساک و بواسون قرار گرفت. پس از فارغ‌التحصیلی در سال ۱۸۱۴ سدی به عنوان افسر وارد رشته مهندسی ارتش فرانسه شد. در همین دوران بود که تنها اثر خود را در رساله‌ای تحت عنوان «تأملاتی در باب توان محرکه گرما»<sup>۲</sup> به چاپ رساند و در آن برای نخستین بار نظریه بازده ماشین‌های گرمایی را ارائه نمود. در آن زمان کار کارنو توجه چندانی را جلب نکرد، ولی بعدها رودلف کلاسیوس و لرد کلوین با استفاده از این نظریه، قانون دوم ترمودینامیک را فرمول‌بندی کردند و به تبیین مفهومی به نام «تروپی برداختند. از این رو، از کارنو اغلب به عنوان پدر علم ترمودینامیک نیز یاد می‌شود.

کارنو در سال ۱۸۲۸ از ارتش استعفا داد و به تبعیدی خودخواسته رفت و چند سال بعد در حالی که از بیماری‌های روانی متعددی رنج می‌برد، در ۲۴ آگوست ۱۸۳۲ م (۱۲۱۱ هجری شمسی) در سن ۳۶ سالگی درگذشت.

- ۱- گاز در دمای  $T_H$  انبساط هم‌دما می‌یابد و گرمای  $Q_H$  را از منبع گرم می‌گیرد (۲→۱).
  - ۲- گاز به طور بی‌دررو منبسط می‌شود و دمای آن تا  $T_C$  کاهش می‌یابد (۳→۲).
  - ۳- گاز در دمای  $T_C$  به طور هم‌دما متراکم می‌شود و گرمای  $|Q_C|$  را به منبع سرد می‌دهد (۳→۴).
  - ۴- گاز به طور بی‌دررو متراکم می‌شود، دمای آن تا  $T_H$  افزایش می‌یابد و به حالت اول بازمی‌گردد (۴→۱).
- محاسبه نشان می‌دهد که بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (۱۳-۱)$$

که در آن  $T_C$  و  $T_H$  برحسب کلوین است. از رابطه ۱-۱۳ درمی‌یابیم بازده ماشین کارنو به جنس ماده‌ای که چرخه را می‌پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع سرد و گرم که ماشین بین آن دو کار می‌کند وابسته است.

بنا به قضیه کارنو، بازده یک ماشین گرمایی که بین دو منبع با دماهای  $T_H$  و  $T_C$  کار می‌کند هرگز نمی‌تواند بیشتر از بازده ماشین کارنویی باشد که بین همین دو منبع کار می‌کند؛ یعنی برای هر ماشین گرمایی کارنو  $\eta \leq \eta_{\text{کارنو}}$  است.

### مثال ۱-۱۷

فرض کنید در چرخه یک ماشین درون‌سوز بیشینه دمای مخلوط بنزین و هوا  $8/2 \times 10^2 \text{ K}$  و دمای محصولات احتراق هنگام خروج از سیلندر (دمای منبع سرد)  $3/2 \times 10^2 \text{ K}$  است. بازده ماشین کارنویی که بین دو منبع دماها کار می‌کند چقدر است؟

پاسخ:

با استفاده از رابطه ۱-۱۳ داریم:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{3/2 \times 10^2 \text{ K}}{8/2 \times 10^2 \text{ K}} = 0/61$$

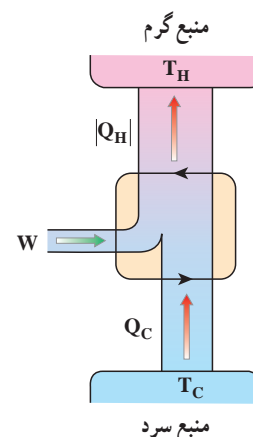
بازده یک ماشین درون‌سوز در عمل از این عدد کمتر است.

۱ - Nicolas Leonard Sadi Carnot

۲ - Reflections on motive power of fire

## ۱-۱۰- یخچال‌ها

یخچال وسیله‌ای است که با استفاده از کار، گرما را از منبعی سرد می‌گیرد و به منبعی گرم می‌دهد. در یخچال نیز مانند ماشین‌های گرمایی یک چرخهٔ ترمودینامیکی طی می‌شود. در این چرخه محیط روی دستگاه کار  $W$  را انجام می‌دهد، دستگاه گرمای  $Q_C$  را از منبع سرد می‌گیرد و گرمای  $|Q_H|$  را به منبع گرم می‌دهد. طرز کار یخچال به صورت طرح‌وار در شکل ۱-۲۲ نشان داده شده است؛ مثلاً در یخچال خانگی انرژی الکتریکی سبب انجام کار به وسیلهٔ کمپرسور می‌شود ( $W$ )، گرما از هوا و مواد داخل یخچال گرفته می‌شود ( $Q_C$ ) و گرما به هوای بیرون یخچال داده می‌شود ( $|Q_H|$ ). طرز کار کولرگازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که در کولرگازی منبع سرد، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع گرم، هوای بیرون از اتاق است. نحوهٔ عمل یخچال‌ها عکس نحوهٔ عمل ماشین گرمایی است؛ یعنی همهٔ انتقال‌های انرژی چه به صورت گرما و چه به صورت کار در مقایسه با ماشین گرمایی وارونه شده است.



شکل ۱-۲۲ طرز کار طرح‌وار یک یخچال آرمانی

با فرض آرمانی بودن فرایندهای طی شده در چرخهٔ یخچال و با چشم‌پوشی از اصطکاک و سایر اتلاف‌های انرژی می‌توانیم قانون اول ترمودینامیک را برای یخچال‌ها به شکل زیر بنویسیم:

$$\Delta U = Q + W$$

همان‌طور که می‌دانیم تغییر انرژی درونی دستگاه در هر چرخه صفر است ( $\Delta U = 0$ ). از طرفی

$Q$  شامل دو جملهٔ  $Q_C$  و  $Q_H$  است. پس می‌توان نوشت:

$$0 = Q_H + Q_C + W$$

در این رابطه،  $Q_H$ ، منفی و  $Q_C$  و  $W$  مثبت است. بنابراین:

$$|Q_H| = W + Q_C \quad (1-14)$$

در هر یخچال، می‌خواهیم حداکثر گرما را از منبع سرد با صرف کمترین کار ممکن بگیریم. بنابراین، ضریب عملکرد یخچال ( $K$ ) به صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع سرد به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_C}{W} \quad (1-15) \text{ (برای هر یخچالی)}$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیشتر باشد، استفاده از آن مقرون به صرفه‌تر است. ضریب عملکرد یخچال‌های خانگی در حدود ۵ و کولرهای گازی در حدود ۲/۵ است.

ضریب عملکرد یخچالی که در آن فرایندها آرمانی است، از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{|Q_H| - Q_C} \quad (1-16) \text{ (برای یخچال‌های آرمانی)}$$

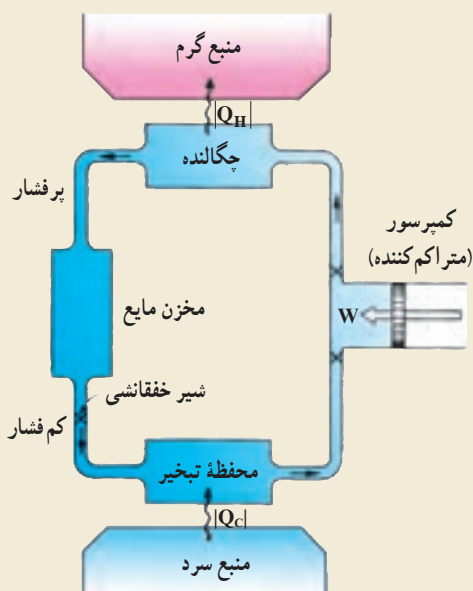
## ساز و کار یخچال خانگی

یخچال خانگی یکی از وسایل بسیار ضروری خانگی است. یخچال‌های خانگی 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.

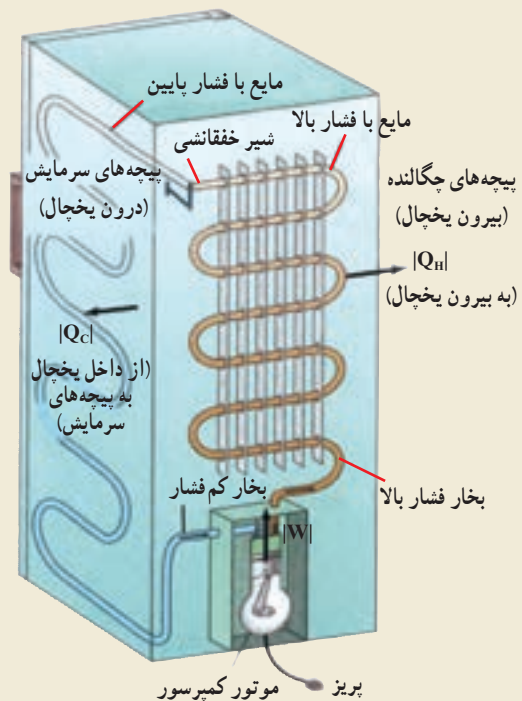
در شکل الف یک یخچال خانگی و در شکل ب نمایش طرح وار طرز کار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی یخچال خانگی عبارتند از: چگالنده، محفظه تبخیر، کمپرسور (متراکم کننده) و شیر خفقا نشی (شیر سوزنی یا منفذی باریک). چگالنده در تماس با منبع گرم (هوای بیرون یخچال) و محفظه تبخیر با منبع سرد (محتویات داخل یخچال) در تماس است. ماده‌ای که چرخه ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است. این گاز از جمله گازهایی است که به لایه ازن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به صورت مایع در فشار زیاد و در محفظه تبخیر به صورت گاز در فشار کم قرار دارد.

طرز کار یخچال خانگی به طور مختصر به شرح زیر است:

کمپرسور با انجام کار  $W$  گاز را از محفظه 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 (اتاق) بالاتر رفته است، گرمای  $Q_H$  را به این منبع می‌دهد و مایع می‌شود و وارد مخزن مایع می‌گردد. هنگامی که این مایع پرفشار از شیر خفقا نشی می‌گذرد به شدت سرد می‌شود، به طوری که از منبع سرد (غذا و یخ) هم سردتر می‌شود و از آن گرما می‌گیرد و بدین ترتیب، در محفظه تبخیر، به بخار تبدیل می‌گردد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.



(ب)

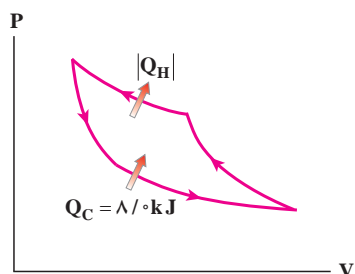


(الف)

## پرسش ۲-۱

چگونه می‌توان ضریب عملکرد یخچال را افزایش داد؟

## مثال ۱-۱۸



فرض کنید نمودار P-V ی چرخه‌ای که دستگاه در یک یخچال فرضی طی می‌کند، به صورت شکل روبه‌رو است. اگر دستگاه در هر چرخه ۸/۰ kJ گرما از منبع سرد بگیرد و مساحت داخل چرخه ۲/۰ kJ باشد، الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می‌دهد؟ و ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۱-۱۴ داریم:

$$\begin{aligned} |Q_H| &= W + Q_C \\ &= 2/0 \text{ kJ} + 8/0 \text{ kJ} = 10 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ب) با استفاده از رابطه ۱-۱۵:

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{8/0 \text{ kJ}}{2/0 \text{ kJ}} = 4/0$$

## ۱۱-۱ 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 به‌طور خودبه‌خود 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 به‌طور خودبه‌خود 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 خودبه‌خود 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.

توان یک یخچال  $100$  وات و ضریب عملکرد آن  $4/00$  است.

الف) چه مدت طول می کشد تا در این یخچال  $1/00 \text{ kg}$  آب  $25/0^\circ \text{C}$  به یخ  $10/0^\circ \text{C}$  تبدیل شود؟

ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می شود؟  $L_f = 3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}$  و  $c_{\text{یخ}} = 2/10 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$  و  $c_{\text{آب}} = 4/20 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$

پاسخ: الف) گرمای  $Q_C$  یی که آب از دست می دهد، برابر است با

$$\begin{aligned} Q_C &= mc_{\text{آب}} |\Delta\theta_1| + mL_f + mc_{\text{یخ}} |\Delta\theta_2| \\ &= (1/00 \text{ kg}) (4/20 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ \text{C}) (25/0^\circ \text{C}) \\ &\quad + (1/00 \text{ kg}) (3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}) \\ &\quad + (1/00 \text{ kg}) (2/10 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ \text{C}) (10/0^\circ \text{C}) \\ &= 4/61 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

اکنون با استفاده از رابطه ۱-۱۵ برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

$$W = \frac{Q_C}{K} = \frac{4/61 \times 10^5 \text{ J}}{4/00} = 1/15 \times 10^5 \text{ J}$$

حال با استفاده از رابطه توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به دست می آید:

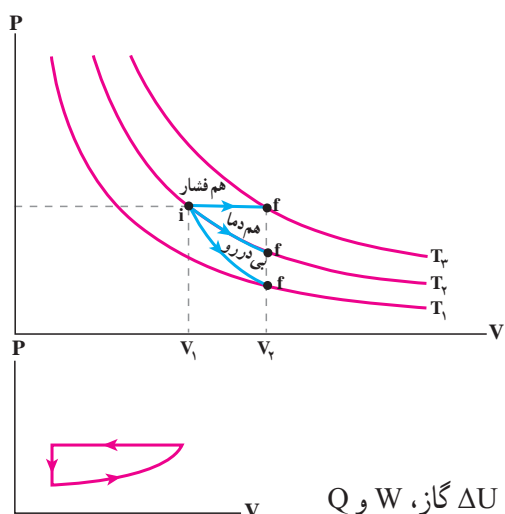
$$t = \frac{W}{P} = \frac{1/15 \times 10^5 \text{ J}}{100 \text{ J/s}} = 1/15 \times 10^3 \text{ s}$$

ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\begin{aligned} |Q_H| &= Q_C + W \\ &= 4/61 \times 10^5 \text{ J} + 1/15 \times 10^5 \text{ J} \\ &= 5/76 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

## پرسش‌ها

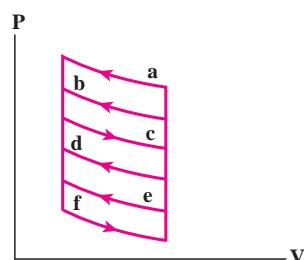
- ۱ در فرایند هم‌حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش یا کاهش داد؟
- ۲ الف) نشان دهید در فرایند هم‌دما، هر چه دمای گاز کامل بیشتر باشد، برای متراکم کردن آن تا یک اندازه معین باید کار بیشتری انجام داد.  
ب) نشان دهید در انبساط هم‌فشار گاز کامل، باید به آن گرما داد.
- ۳ ته یک سرنگ را می‌بندیم. آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به تدریج گرم می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟
- ۴ الف) آیا می‌توان با باز گذاشتن در یخچال، آشپزخانه را خنک کرد؟ در مورد پاسخ خود توضیح دهید.  
ب) وجود برفک روی بدنه داخلی محفظه یخ‌ساز یخچال چه اثری بر کارکرد یخچال دارد؟



- ۵ مطابق شکل روبه‌رو، حجم گاز کاملاً طی سه فرایند هم‌فشار، هم‌دما و بی‌دررو از  $V_1$  به حجم بزرگ‌تر  $V_2$  می‌رسد. الف) اندازه کار انجام شده توسط گاز را در این سه فرایند مقایسه کنید. ب) دمای نهایی را در این فرایندها مقایسه کنید. پ) گرمای داده شده به گاز را در این فرایندها مقایسه کنید.

- ۶ مخترعی مدعی است ماشینی ساخته که بین نقطه‌های جوش و انجماد آب کار می‌کند و بازده آن  $70^\circ$  درصد است. آیا ادعای این مخترع می‌تواند درست باشد؟ توضیح دهید.

- ۷ برای چرخه گازی که نمودار  $P-V$  آن در اینجا نشان داده شده است،  $\Delta U$ ،  $Q$  و  $W$  مثبت است یا منفی، و یا برابر صفر است؟



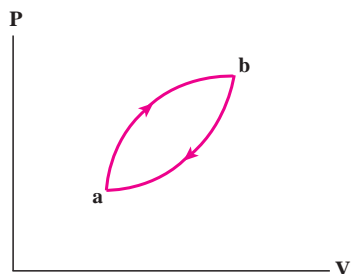
- ۸ شکل روبه‌رو نمودار  $P-V$ ی چند چرخه متفاوت را که توسط گازی پیموده می‌شود، نشان می‌دهد. در کدام چرخه‌ها، کار انجام شده (الف) توسط گاز و (ب) محیط بیشینه است؟

## مسئله‌ها

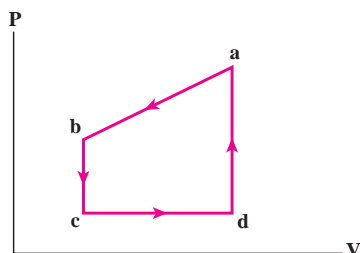
- ۱ حجم  $50^\circ$  مول از یک گاز کامل تک اتمی  $8/3$  لیتر و فشار آن  $1/5$  اتمسفر است. مقداری گرما به آن می‌دهیم تا فشار آن از طریق یک فرایند هم‌حجم دو برابر شود. کار و گرمای مبادله شده را برای این فرایند محاسبه کنید. اگر به جای گرما دادن به گاز، حجم گاز را از طریق یک فرایند هم‌فشار نصف کنیم اکنون کار و گرمای مبادله شده چقدر می‌شود؟



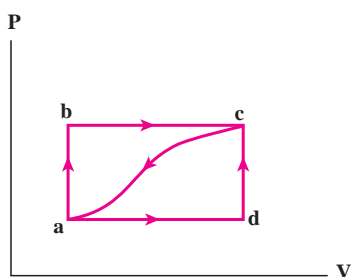
## ترمودینامیک



- ۲ در شکل روبه‌رو فرایندی چرخه‌ای برای یک گاز نشان داده شده است. الف) تعیین کنید که گاز در این چرخه گرما گرفته یا از دست داده است. ب) اگر قدرمطلق گرمای مبادله شده  $400\text{ J}$  باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟



- ۳ شکل روبه‌رو چرخه‌گازی را نشان می‌دهد. تغییر انرژی درونی گاز وقتی در مسیر abc از a به c می‌رود برابر  $200\text{ J}$  است. وقتی گاز از c به d می‌رود  $180\text{ J}$ ، و وقتی از d به a می‌رود،  $80\text{ J}$  گرما می‌گیرد. وقتی گاز از c به d می‌رود، چقدر کار انجام می‌دهد؟  
۴ یک ماشین کارنو بین دماهای  $280\text{ K}$  و  $360\text{ K}$  کار می‌کند. این ماشین در هر چرخه  $750\text{ J}$  گرما از منبع گرم می‌گیرد. الف) در هر چرخه،  $|W|$  چقدر است؟ ب) در هر چرخه چقدر گرما به منبع سرد داده می‌شود؟



- ۵ گازی مطابق شکل، از طریق مسیر abc از حالت a به c می‌رود.

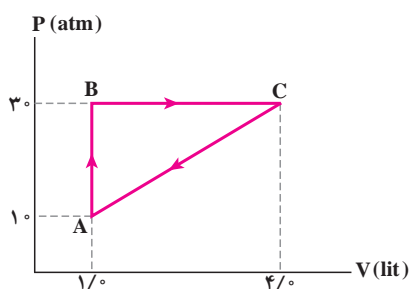
در این مسیر، گاز  $90^\circ$  ژول گرما می‌گیرد و  $70^\circ$  ژول کار انجام می‌دهد.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر abc چقدر است؟

ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرایند از مسیر adc انجام شود، کار انجام شده توسط گاز

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 از حالت c به حالت a برگردانیم، چقدر باید از آن انرژی بگیریم؟



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

- ۷ یک ماشین بخار در هر دقیقه  $10^5 \text{ MJ}$  از  $1/5$  گرمای دیگ بخار دریافت می‌کند و  $10^4 \text{ MJ}$  از  $9/10$  گرمای دیگ بخار را از دست می‌دهد.

الف) با فرض آرمانی بودن این ماشین، کار انجام شده توسط ماشین در هر دقیقه چند مگاژول است؟

ب) بازده این ماشین چقدر است؟

- ۸ یک ماشین گرمایی درون‌سوز در هر چرخه  $8000\text{ J}$  گرما از سوزاندن سوخت دریافت می‌کند و  $2000\text{ J}$  کار تحویل می‌دهد. گرمای حاصل از سوخت  $10^4 \text{ J/g}$  است و ماشین در هر ثانیه  $40^\circ$  چرخه را می‌پیماید. با فرض آرمانی بودن ماشین، کمیت‌های زیر را حساب کنید.

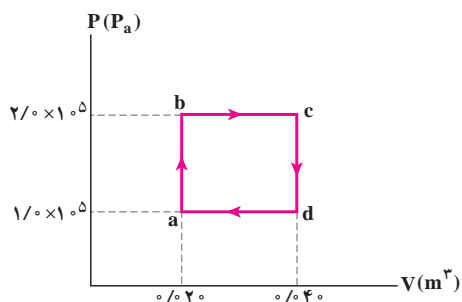
الف) بازده ماشین،

ب) گرمای تلف شده در هر چرخه،

پ) سوخت مصرف شده در هر چرخه،

ت) توان ماشین.

- ۹ ضرب عملکرد یک یخ‌ساز (فریزر)  $K = 4/0$  است. این یخ‌ساز در هر ساعت،  $1/5 \text{ kg}$  آب با دمای  $20^\circ \text{C}$  را به یخ با دمای  $\theta_1 = -10^\circ \text{C}$  تبدیل می‌کند.  $C_{\text{آب}} = 4/2 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$  ،  $C_{\text{یخ}} = 2/1 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$  و  $L_f = 3/3 \times 10^5 \text{ J/kg}$
- الف) چه مقدار گرما در هر ساعت باید از آب گرفته شود؟  
 ب) یخ‌ساز در هر ساعت چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف می‌کند؟  
 پ) چه مقدار گرما در هر ساعت به بیرون داده می‌شود؟
- ۱۰ یک کولر گازی در هر دقیقه  $9/0 \times 10^4 \text{ J}$  گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت،  $1/3 \times 10^5 \text{ J}$  گرما به فضای بیرون می‌دهد.
- الف) توان مصرفی این کولر چند وات است؟  
 ب) ضرب عملکرد آن چند است؟



- ۱۱ یک مول از یک گاز کامل تک اتمی در یک ماشین گرمایی آرمانی، چرخه‌ای را مطابق شکل روبه‌رو می‌پیماید. مطلوب است:
- الف) کار انجام شده توسط ماشین گرمایی در پیمودن یک چرخه،  
 ب) گرمای مبادله شده در فرایند abc،  
 پ) بازده ماشین گرمایی،  
 ت) بازده ماشین کارنویی که بین بالاترین و پایین‌ترین دمای چرخه عمل می‌کند.

- ۱۲ مخترعی ادعا می‌کند چهار ماشین ساخته است که هر یک بین منبع‌های با دمای ثابت  $300 \text{ K}$  و  $400 \text{ K}$  کار می‌کنند. داده‌های هر ماشین در هر چرخه عبارت‌اند از:

$W = -400 \text{ J}$ ، $Q_C = -1700 \text{ J}$ ، $Q_H = 2000 \text{ J}$	ماشین A
$W = -400 \text{ J}$ ، $Q_C = -200 \text{ J}$ ، $Q_H = 500 \text{ J}$	ماشین B
$W = -400 \text{ J}$ ، $Q_C = -200 \text{ J}$ ، $Q_H = 600 \text{ J}$	ماشین C
$W = -10 \text{ J}$ ، $Q_C = -90 \text{ J}$ ، $Q_H = 100 \text{ J}$	ماشین D

با فرض آرمانی بودن فرایندهای این چهار ماشین:

الف) کدام یک از ماشین‌ها قانون اول ترمودینامیک را نقض می‌کنند؟

ب) کدام یک از ماشین‌ها قابل ساخت هستند؟

- ۱۳ بازده یک ماشین آرمانی ۲۵ درصد است و در هر چرخه  $8/2 \times 10^3 \text{ J}$  کار انجام می‌دهد. الف)  $Q_H$  و  $|Q_C|$  را در هر چرخه به دست آورید. ب) اگر با تنظیم موتور، بازده ماشین به ۳۰ درصد افزایش یابد،  $Q_H$  و  $|Q_C|$  به‌ازای همان مقدار کار چقدر می‌شود؟
- ۱۴ می‌خواهیم یک ماشین گرمایی بسازیم که منبع گرم آن آب اقیانوس در دمای  $27^\circ \text{C}$  و منبع سرد آن آب اعماق اقیانوس در دمای  $7^\circ \text{C}$  باشد. حداکثر بازدهی که می‌توان به دست آورد چقدر است؟

## ترمودینامیک

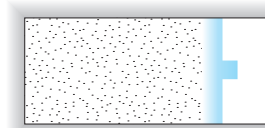


موتور ماشین‌های بنزینی بسیار ناکارآمد است و فقط حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد انرژی شیمیایی حاصل از سوختن بنزین را به کار مفید مکانیکی تبدیل می‌کند. دانشمندان و مهندسان در پی کارآمدتر کردن این ماشین‌ها هستند. با این حال، مَدّ بالایی برای بازدهی این ماشین‌ها وجود دارد که مانع از تبدیل کلّ انرژی شیمیایی به کار مفید می‌شود.

برای توصیف رفتار یک جسم باید برهم کنش آن جسم را با پیرامونش بررسی کنیم؛ مثلاً در مکانیک، جسم می‌تواند توپ در حال سقوطی باشد که با پیرامونش - یعنی زمین و هوا - برهم کنش دارد و برای توصیف رفتار آن باید کمیت‌های قابل مشاهده‌ای مانند مکان، سرعت و شتاب توپ را انتخاب کنیم که با عملیات آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شوند. در فرایندهایی که در آنها با مبادله گرما سروکار داریم، تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً گاز یا مایع است. این جسم را **دستگاه** و پیرامون آن را که می‌تواند با جسم تبادل انرژی داشته باشد، **محیط** می‌نامیم. بررسی‌های تجربی و نظری نشان می‌دهد رفتار یک دستگاه در پدیده‌های گرمایی را می‌توان برحسب کمیت‌هایی مانند فشار، حجم، دما، گرمای ویژه و ... توضیح داد. این کمیت‌ها به جزئیات رفتار تک تک مولکول‌های تشکیل دهنده دستگاه وابسته نیستند و تنها به وضعیت دستگاه در مقیاس بزرگ بستگی دارند؛ مثلاً اگر دستگاه را آب درون لیوانی در نظر بگیریم که به تعادل گرمایی رسیده است، دمای آب ثابت می‌ماند، در حالی که مولکول‌های تشکیل دهنده آن پیوسته به اطراف حرکت می‌کنند و سرعتهای تغییر می‌کند. کمیت‌هایی که وضعیت ماده را در مقیاس بزرگ توصیف می‌کنند، **کمیت‌های ماکروسکوپی** نامیده می‌شوند.

قوانینی که کمیت‌های ماکروسکوپی را در فرایندهای گرمایی به هم مربوط می‌کنند، اساس علمی به نام **ترمودینامیک** را می‌سازند. در واقع، علم ترمودینامیک علمی است که قوانین حاکم بین کمیت‌های ماکروسکوپی یک دستگاه در پدیده‌های گرمایی را بیان می‌کند و به مطالعه مبادله انرژی و کاربرد آن در چنین دستگاه‌هایی می‌پردازد. از این منظر، بسیاری از مطالبی که در فصل ششم کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم در حیطه علم ترمودینامیک می‌گنجد. علم ترمودینامیک از دیرباز در زندگی بشر نقش داشته است و نمونه بارز آن ماشین‌های گرمایی اند که گرما را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند و در پایان این فصل به آنها خواهیم پرداخت. مثال‌های بی‌شمار دیگری نیز وجود دارد که نشان می‌دهد چگونه علم ترمودینامیک در زندگی روزمره نقش بازی می‌کند. مثلاً مهندسان اتومبیل در پی بالا بردن بازده خودروها هستند، مهندسان هسته‌ای نگران آن‌اند که چطور دما و فشار بسیار بالای رآکتورهای هسته‌ای را کنترل کنند تا مبادا حوادث زیست محیطی فاجعه‌باری رخ دهد، مهندسان زیست محیطی به چگونگی مبادله گرما بین اقیانوس‌ها و جو علاقه‌مندند که می‌تواند بر شرایط جوی اثر بگذارد، مهندسان زیستی نگران آهنگ تولید گاز حاصل از تخمیر در زیست توده‌ها هستند و پزشکان در پی آن‌اند که چگونه دمای بدن یک بیمار می‌تواند نشانه‌ای از یک سرطان روبه‌رشد باشد.

(۱)



**شکل ۱-۱** گاز داخل استوانه در حالت تعادل ترمودینامیکی است.

### ۱-۱- معادله حالت

مقدار معینی گاز را مطابق شکل ۱-۱ در داخل یک استوانه در نظر بگیرید که با پیستونی مسدود شده است. پیستون می‌تواند در درون استوانه حرکت کند (در اینجا 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 همه نقاط گاز یکسان، مثلاً برابر  $P_1$  و  $T_1$ ، خواهد بود. در این صورت می‌گوییم که گاز در حالت **تعادل ترمودینامیکی** است. به عبارت دیگر یک دستگاه ترمودینامیکی در صورتی در حال تعادل است که مشخصه‌های قابل اندازه‌گیری آن مانند دما، فشار، حجم و ... به طور خودبه‌خودی تغییر نکند.

### فعالیت ۱-۱

اگر دما و فشار در داخل گاز شکل ۱-۱ در نقاط مختلف متفاوت باشند، چه رخ می‌دهد؟

در حالت تعادل هر یک از کمیت‌های فشار، حجم و دما گاز مقدار مشخصی دارد؛ مثلاً هنگامی که گاز درون استوانه در شکل ۱-۱ در وضعیت (۱) قرار دارد، مقدار این کمیت‌ها به ترتیب برابر با  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  است. حال اگر گاز را گرم یا سرد کنیم و یا پیستون را جابه‌جا کنیم، مقدار بعضی از این کمیت‌ها (یا همه آنها) تغییر خواهد کرد و پس از مدتی، این کمیت‌ها به مقدارهای مشخص دیگری چون  $P_2$ ،  $V_2$  و  $T_2$  خواهند رسید. از کمیت‌های  $P$ ،  $V$  و  $T$  برای توصیف **حالت** دستگاه استفاده می‌کنیم. این کمیت‌های ماکروسکوپی را که حالت دستگاه با آنها توصیف می‌شود، **متغیرهای ترمودینامیکی** می‌نامیم. مثلاً برای گاز درون استوانه شکل ۱-۱ با تغییراتی که ایجاد کردیم گاز از **حالت**  $(P_1, V_1, T_1)$  به **حالت**  $(P_2, V_2, T_2)$  می‌رسد.

متغیرهای ترمودینامیکی از یکدیگر مستقل نیستند و با هم رابطه دارند. رابطه بین متغیرهای ترمودینامیکی را **معادله حالت** می‌نامیم. معادله حالت یک دستگاه می‌تواند پیچیده باشد؛ ولی آزمایش نشان می‌دهد که اگر گازها بسیار رقیق باشند، معادله حالت آنها ساده و مستقل از نوع گاز است. در این صورت، گاز را **گاز کامل (آرمانی)** می‌نامیم.

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

$$\frac{PV}{T} \propto n$$

در این رابطه  $n$  تعداد مول گاز است و مقدار آن از نسبت جرم گاز ( $m$ ) به جرم مولی آن ( $M$ ) به دست می‌آید:

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

بنابراین، معادله حالت گاز کامل که کمیت‌های  $P$ ،  $V$  و  $T$  را به یکدیگر مربوط می‌کند، به صورت زیر است:

$$PV = nRT \quad (2-1)$$

که به **ثابت گازها** می‌گویند. اگر  $P$  برحسب پاسکال،  $V$  برحسب مترمکعب،  $n$  برحسب مول و  $T$  برحسب کلون باشد، مقدار  $R$  برابر  $8/314 \text{ J/mol.K}$  است.

## مثال ۱-۱

تعیین کنید که در شرایط متعارفی (فشار یک اتمسفر و دمای صفر درجه سلسیوس) در اتاقی به ابعاد  $36/0 \text{ m}^3$  چند مول هوا وجود دارد؟

پاسخ: تعداد مول را با استفاده از قانون گازهای کامل به دست می آوریم:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/00 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(36/0 \text{ m}^3)}{(8/31 \text{ J/mol.K})(273 \text{ K})} = 1/60 \times 10^3 \text{ mol}$$

## ۲-۱- فرایندهای ترمودینامیکی آرمانی

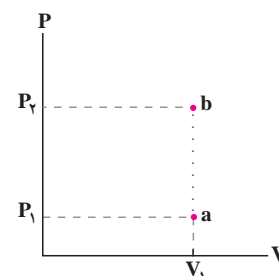
دیدیم که حالت (تعادل) یک دستگاه را می توان برحسب متغیرهای ترمودینامیکی  $P$ ،  $V$  و  $T$  بیان کرد. همچنین در اثر گرم شدن گاز یا جابه جاشدن پیستون حالت گاز تغییر می کند و گاز به حالت دیگری می رود. هنگامی که دستگاه از یک حالت به حالت دیگر می رود، می گوئیم که یک فرایند ترمودینامیکی انجام شده است.

اکنون فرض کنید که گاز ابتدا در حالت  $P_1$ ،  $V_1$  و  $T_1$  باشد و در اثر گرم کردن آن با ثابت نگه داشتن حجم، گاز به حالت  $P_2$ ،  $V_1$  و  $T_2$  برسد. 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.

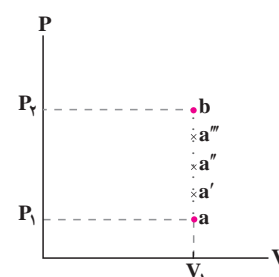
اگر حالت های بین a و b حالت های تعادلی نباشند، نمودار این فرایند ترمودینامیکی را نمی توان رسم کرد؛ زیرا در این حالت ها گاز در حال تعادل نیست و در نتیجه فشار و دمای گاز را نمی توان در این حالت ها تعیین کرد. به همین دلیل، این فرایند را با نقطه چین نمایش می دهیم (شکل ۲-۱).

اکنون فرض کنید دستگاه را در تماس با یک منبع گرما قرار می دهیم. ابتدا دمای منبع گرما را برابر با  $T_1$ ، یعنی دمای اولیه گاز، انتخاب می کنیم. در این صورت، تبادل گرما بین منبع و دستگاه رخ نمی دهد. سپس دمای منبع را کمی افزایش می دهیم. در این صورت گرمای اندکی به گاز منتقل می شود. چون این گرما بسیار کم است، تغییر کمی در حالت گاز ایجاد می شود و گاز پس از مدت کوتاهی به حالت تعادل می رسد. وضعیت دستگاه در این حالت با نقطه  $a'$  در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. هرچه اختلاف دما بین دستگاه و منبع کمتر باشد،  $a'$  به  $a$  نزدیک تر خواهد بود و رسیدن به حالت تعادل جدید سریع تر رخ خواهد داد. به عبارت دیگر می توان گفت که در فرایند تحول دستگاه از  $a$  به  $a'$ ، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می ماند. اگر گرمادهی را به همین روش ادامه دهیم، و در هر نوبت دمای منبع اندکی زیاد شود، نقاط  $a''$ ،  $a'''$  و ... به دست می آیند. هرچه دمای منبع را در هر نوبت کمتر تغییر دهیم، این نقاط به یکدیگر نزدیک تر خواهند بود و دستگاه زودتر به حالت تعادل می رسد.

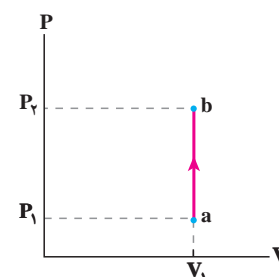
در حدی که گرمای داده شده به دستگاه در هر مرحله بسیار کوچک است، فرایند گرمادهی را می توان مانند شکل ۴-۱ به صورت یک خط نمایش داد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می ماند. چنین فرایندی را فرایند آرمانی می نامند.



شکل ۲-۱- گاز در فرایندی ترمودینامیکی از حالت a به حالت b رفته است.



شکل ۳-۱- دستگاه با دریافت مقادیر کوچک گرما، تغییر حالت می دهد.



شکل ۴-۱- نمودار تغییرات فشار برحسب حجم، هنگامی که دستگاه به صورت آرمانی در حجم ثابت گرمای Q را دریافت می کند و در نتیجه نمودار فرایند به صورت خط رسم می شود.

## ۳-۱- 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 دستگاه می‌گیرد، با علامت مثبت و گرمایی را که دستگاه از دست می‌دهد، با علامت منفی نشان می‌دهیم.

هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما می‌کند، معمولاً فرض می‌شود که با یک منبع گرما

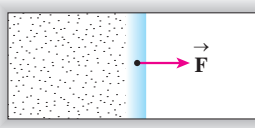
در تماس است. منبع گرما، جسمی است که اگر گرما از دست بدهد یا بگیرد، دمای آن به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نکند؛ مثلاً، هوای اتاق را برای یک استکان چای داغ می‌توان منبع گرما در نظر گرفت. با سرد شدن چای، دمای اتاق به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نمی‌کند.

## پرسش ۱-۱

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

**ب) کار:** شکل ۱-۵ گازی را درون یک استوانه با پیستونی نشان می‌دهد که اصطکاک آن

ناچیز است. اگر گاز را کمی گرم کنیم، گاز منبسط می‌شود و نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند، پیستون را که اصطکاک ناچیزی دارد به سمت راست جابه‌جا می‌کند. از کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه به یاد داریم هرگاه نیروی وارد بر جسم موجب جابه‌جایی آن جسم شود، کار انجام می‌دهد. بنابراین، در اینجا نیز گاز روی پیستون کار انجام داده است. در ترمودینامیک هر جا حجم دستگاه تغییر کند، بین دستگاه و محیط، کار مبادله شده است. در بخش‌های بعد رابطه‌ای برای این کار مبادله شده به دست خواهیم آورد.



شکل ۱-۵ در شکل بالا  $\vec{F}$  نیرویی است که گاز به پیستون وارد می‌کند.

## ۴-۱- انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک

انرژی درونی یک ماده با مجموع انرژی‌های اجزای تشکیل دهنده آن ماده برابر است. به طور

دقیق‌تر، می‌توان گفت که انرژی درونی  $U$  ماده با مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل ذره‌های آن ماده برابر است. هنگامی که دستگاه در حالت معینی قرار دارد، که مثلاً با  $P$  و  $T$  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 ترمودینامیکی با مبادله کار، گرما یا هر دو با محیط از یک حالت اولیه با انرژی درونی  $U_1$ ، به یک حالت دیگر می‌رود ممکن است انرژی درونی آن تغییر کند و مثلاً به مقدار  $U_2$  برسد. تغییر انرژی درونی، یعنی  $\Delta U = U_2 - U_1$ ، به گرما و کار مبادله شده بین دستگاه و محیط ارتباط دارد. این ارتباط، موضوع **قانون اول ترمودینامیک** است. 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 رابطه زیر نشان داده می شود<sup>۱</sup>:

$$\Delta U = Q + W \quad (3-1)$$

این رابطه که بیان می دارد انتقال انرژی بین دستگاه و محیط از طریق تبادل کار و گرما صورت می گیرد، **قانون اول ترمودینامیک** نامیده می شود. در این رابطه،  $Q$  می تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد.  $W$  نیز می تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد. بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل کار و گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ( $\Delta U > 0$ )، یا کاهش ( $\Delta U < 0$ ) یابد یا اینکه تغییر نکند ( $\Delta U = 0$ ). گرما و کاری که بین دستگاه و محیط مبادله می شود فقط در طی فرایند معنا دارد؛ یعنی نمی توانیم پس از انجام هر فرایند از کار یا گرمای موجود در دستگاه صحبت کنیم.

در رابطه ۳-۱ اگر  $W$  کار دستگاه روی محیط در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه در هر فرایند ترمودینامیکی، کار دستگاه روی محیط قرینه کار محیط روی دستگاه است، این رابطه به صورت  $\Delta U = Q - W$  نوشته می شود.

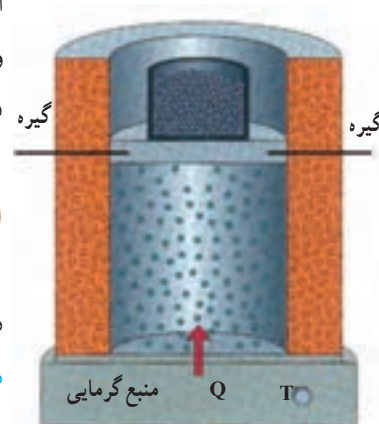
### مثال ۲-۱

در یک فرایند ترمودینامیکی دستگاه  $420 \text{ J}$  گرما از محیط می گیرد و انبساط می یابد. اگر کاری که دستگاه روی محیط انجام می دهد  $100 \text{ J}$  باشد، تغییر انرژی درونی دستگاه چقدر است؟

**پاسخ:** چون دستگاه از محیط گرما گرفته است  $Q = +420 \text{ J}$  و چون کار دستگاه روی محیط  $100 \text{ J}$  است پس کار محیط روی دستگاه  $W = -100 \text{ J}$  می شود. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم

$$\Delta U = Q + W = 420 \text{ J} + (-100 \text{ J}) = 320 \text{ J}$$

توجه کنید که در فرایندهای مختلفی که برای یک گاز رخ می دهد و از حالت اولیه یکسان ( $T_i, V_i, P_i$ ) آغاز می شوند و به حالت نهایی یکسان ( $T_f, V_f, P_f$ ) می رسند، تغییر انرژی درونی گاز ( $\Delta U$ ) یکسان است، ولی کار و نیز گرمای مبادله شده در این فرایندها می تواند متفاوت باشد. در بخش بعد به بررسی چند نوع از این فرایندها می پردازیم.



### ۱-۵- فرایندهای خاص

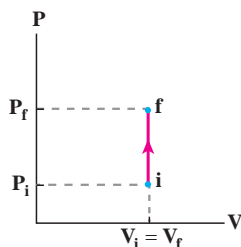
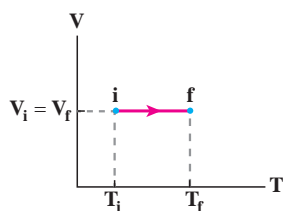
همان طور که گفتیم در ترمودینامیک بین دو حالت مشخص فرایندهای متفاوتی می تواند رخ دهد. در بین این فرایندها، فرایندهای خاصی وجود دارد که کاربرد آنها وسیع تر است؛ از جمله: **فرایند هم حجم، فرایند هم فشار، فرایند هم دما و فرایند بی دررو**. در ادامه به توصیف این فرایندها می پردازیم. **الف) فرایند هم حجم:** حجم گاز طی این فرایند ثابت نگه داشته می شود و بنابراین، کار صفر است. در این فرایند گاز با محیط فقط تبادل گرما می کند. به این منظور گاز را در تماس با منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم قرار می دهیم (شکل ۱-۶)، طوری که دمای اولیه منبع و گاز با هم برابر باشد. دمای

**شکل ۱-۶** دمای گاز را در حجم ثابت، با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم، به تدریج تغییر می دهیم.

۱- در برخی کتابها از جمله کتاب شیمی ۳، تغییر انرژی درونی با  $\Delta E$  نشان داده شده است.



## ترمودینامیک



شکل ۱-۷ نمودارهای V-T و P-V برای یک فرایند هم حجم آرمانی

منبع را به آرامی و به تدریج تغییر می‌دهیم تا گاز با گذار از حالت‌های تعادلی، طی یک فرایند آرمانی به حالت نهایی مورد نظر برسد. در شکل ۱-۷ نمودارهای P-V و V-T برای یک فرایند هم حجم نشان داده شده است که در آن گاز گرما می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت، بالا می‌رود. اگر در این مثال گاز به صورت هم حجم گرما از دست بدهد جهت پیکان‌های نمودارهای شکل ۱-۷ وارونه می‌شود.

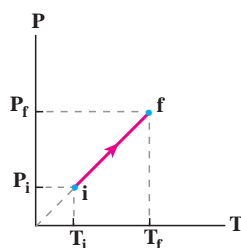
## مثال ۱-۳

نمودار P-T را برای فرایند هم حجم آرمانی یک گاز کامل رسم کنید.

**پاسخ:** چون گاز کامل است با استفاده از معادله حالت گاز کامل داریم

$$P = \left( \frac{nR}{V} \right) T$$

چون  $\frac{nR}{V}$  ثابت است، رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این رابطه در شکل زیر نشان داده شده است.



جدول ۱-۱ ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت برای برخی گازها در فشار کم بر حسب J/mol.K

گاز	$C_v$
Ar	۱۲/۵
He	۱۲/۵
Ne	۱۲/۵
هوا	۲۰/۸
CO	۲۰/۷
H <sub>۲</sub>	۲۰/۴
HCl	۲۱/۴
N <sub>۲</sub>	۲۰/۸
NO	۲۰/۹
O <sub>۲</sub>	۲۱/۲
Cl <sub>۲</sub>	۲۴/۸
CO <sub>۲</sub>	۲۸/۵
CS <sub>۲</sub>	۴۰/۹
H <sub>۲</sub> S	۲۵/۴
N <sub>۲</sub> O	۲۸/۵
SO <sub>۲</sub>	۳۱/۳

اکنون به محاسبه گرمایی می‌پردازیم که در فرایند هم حجم با دستگاه مبادله می‌شود. در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه  $\Delta T$  با رابطه  $Q = mc\Delta T$  داده می‌شود. با توجه به رابطه  $m = nM$  داریم،  $Q = nMc\Delta T$ . حاصل ضرب  $Mc$  را **ظرفیت گرمایی مولی** می‌نامیم. در مورد گازها، ظرفیت گرمایی مولی به نوع فرایند بستگی دارد. ظرفیت گرمایی مولی گاز در فرایند هم حجم را با  $C_v$  نشان می‌دهیم. بنابراین

$$Q = nC_v \Delta T \quad (۴-۱)$$

با توجه به این رابطه، یکای ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت، J/mol.K است. ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت چند گاز در جدول ۱-۴ آمده است. می‌توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت با تقریب خوبی برای گازهای کامل تک اتمی برابر با  $\frac{3}{2}R$  و برای اغلب گازهای کامل دو اتمی در دماهای معمولی برابر با  $\frac{5}{2}R$  است.

## مثال ۱-۴

به  $2/00$  مول از گازهای He،  $O_2$  و  $CO_2$ ، در حجم ثابت،  $100$  ژول گرما می‌دهیم؛ دمای هریک چقدر افزایش می‌یابد؟  
پاسخ: از رابطه ۴-۱ داریم:

$$\Delta T = \frac{Q}{nC_V}$$

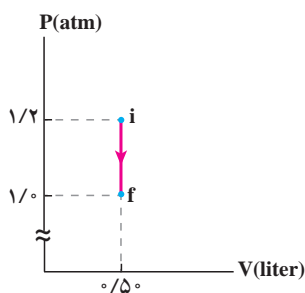
اکنون با استفاده از جدول ۱-۱ مقادیر  $C_V$  را برای این گازها در رابطه بالا قرار می‌دهیم:

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(12/5 \text{ J/mol.K})} = 4/00 \text{ K} \quad \text{برای He,}$$

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(21/2 \text{ J/mol.K})} = 2/36 \text{ K} \quad \text{برای } O_2,$$

$$\Delta T = \frac{100 \text{ J}}{(2/00 \text{ mol})(28/5 \text{ J/mol.K})} = 1/75 \text{ K} \quad \text{برای } CO_2,$$

## مثال ۱-۵



شکل روبه‌رو نمودار یک فرایند هم‌حجم آرمانی را نشان می‌دهد که در صفحه  $P-V$  رسم شده است. گاز را کامل و تک اتمی فرض کنید. در این صورت گرمای مبادله شده چقدر است؟ آیا در این فرایند گاز گرما گرفته یا گرما از دست داده است؟  
پاسخ: با استفاده از رابطه (۴-۱) داریم:

$$\begin{aligned} Q &= nC_V \Delta T = n \left( \frac{3}{2} R \right) \Delta T \\ &= \frac{3}{2} (nRT_f - nRT_i) = \frac{3}{2} (P_f V_f - P_i V_i) \\ &= \frac{3}{2} [(1/0 \times 10^5 \text{ Pa})(0/50 \times 10^{-3} \text{ m}^3) - (1/2 \times 10^5 \text{ Pa})(0/50 \times 10^{-3} \text{ m}^3)] \\ &= -15 \text{ J} \end{aligned}$$

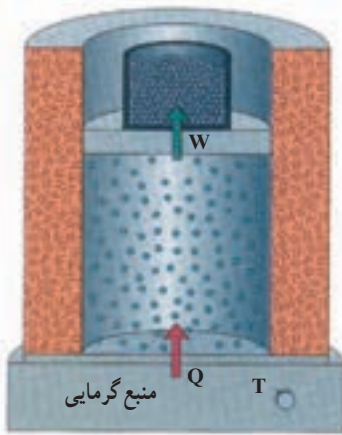
گرمای مبادله شده  $|Q| = 15 \text{ J}$  است. چون مقدار  $Q$  منفی شده است، بنابراین گاز گرما از دست داده است.

## تمرین ۱-۱

دمای  $n$  مول گاز با ظرفیت گرمایی مولی  $C_V$  در یک فرایند هم‌حجم از  $T_i$  به  $T_f$  رسیده است.  
الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرایند را بیابید.  
ب) اگر این گاز، گاز کامل و تک‌اتمی باشد، تغییر انرژی درونی آن به چه صورتی نوشته می‌شود؟

۱- نمودارهای ترمودینامیکی عموماً به مقیاس نیست و از این رو، در این مثال و مثال‌هایی از این دست قطعه‌ای از محور را بُرش

می‌دهیم و آن را با نماد  $\approx$  مشخص می‌کنیم.

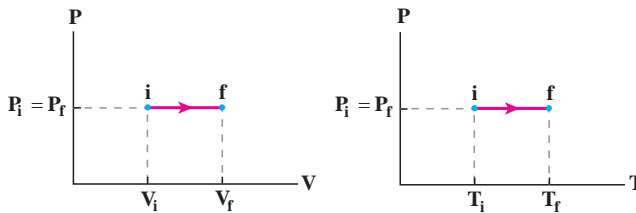


شکل ۸-۱ گرم کردن آرمانی گاز در فشار ثابت با استفاده از منبع گرمایی با دمای قابل تنظیم.

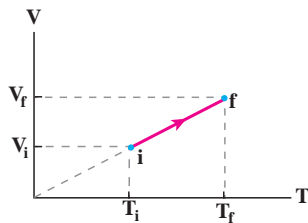
**(ب) فرایند هم فشار:** فشار گاز طی این فرایند ثابت می ماند. به عنوان مثالی از این فرایند، گازی را مطابق شکل ۸-۱ داخل استوانه‌ای که با یک منبع گرما با دمای قابل تنظیم در تماس است در نظر بگیرید. گاز ابتدا در فشار  $P_i$  و حجم  $V_i$  در حالت تعادل قرار دارد. فرض کنید اصطکاک بین پیستون و استوانه ناچیز است.

دمای منبع را اندکی بالا می‌بریم. به علت اختلاف دمای بین منبع و دستگاه مقدار کمی گرما به گاز منتقل می‌شود که در نتیجه آن گاز، کمی منبسط می‌شود و پیستون را اندکی به طرف بالا 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 بالا حرکت می‌کند. در این وضعیت، شتاب حرکت پیستون بسیار کوچک و نزدیک به صفر خواهد بود. بنابراین، می‌توان گفت که در طی گرمادادن همواره فشار گاز ثابت است؛ نمودارهای  $P-V$  و  $P-T$  این فرایند آرمانی در شکل ۹-۱ رسم شده است.

شکل ۹-۱ نمودارهای  $P-V$  و  $P-T$  برای یک فرایند هم فشار آرمانی



#### مثال ۴-۱



نمودار  $V-T$  را برای فرایند هم فشار آرمانی یک گاز کامل رسم کنید.

**پاسخ:** چون گاز، کامل است با استفاده از معادله حالت گاز کامل داریم:

$$V = \left( \frac{nR}{P} \right) T$$

چون  $\frac{nR}{P}$  ثابت است رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این رابطه در شکل روبه‌رو نشان داده شده است.

در این فرایند، هم گرما و هم کار مبادله می‌شود. ابتدا کار را محاسبه می‌کنیم. اگر فشار گاز  $P$  باشد با توجه به تعریف فشار در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه ( $P = \frac{F}{A}$ )، گاز طی این فرایند نیروی  $PA$  را به پیستون وارد می‌کند که در آن  $A$  مساحت پیستون است. اگر جابه‌جایی پیستون برابر با  $d$  باشد، با استفاده از تعریف کار در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه، کاری که گاز روی پیستون انجام می‌دهد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{کار گاز روی پیستون} = F d \cos \theta = (PA) d \cos 0^\circ = P(Ad)$$

ولی  $Ad$ ، تغییر حجم گاز درون استوانه است که برابر است با  $\Delta V = V_f - V_i$ ، در نتیجه،

$$\text{کار گاز روی پیستون} = P \Delta V \quad (۵-۱)$$

بنا به قانون سوم نیوتون، نیرویی که گاز به پیستون وارد می‌کند و نیرویی که پیستون به گاز وارد می‌کند هم اندازه و در خلاف جهت یکدیگرند. از سوی دیگر می‌دانیم جابه‌جایی پیستون و جابه‌جایی لایه‌ گاز مجاور آن هم اندازه و هم جهت‌اند؛ پس می‌توان نوشت

$$-P\Delta V = \text{منفی کار گاز روی پیستون} = \text{کار پیستون روی گاز}$$

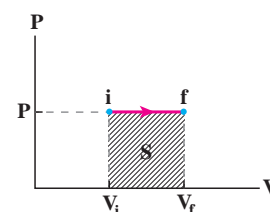
در این کتاب، کار محیط (در این مثال پیستون) روی دستگاه (در اینجا گاز) را با  $W$  نشان می‌دهیم. بنابراین، در فرایند هم فشار داریم:

$$W = -P\Delta V \quad (۶-۱)$$

بنا به رابطه فوق اگر گاز منبسط شود ( $\Delta V > 0$ ) کار محیط روی دستگاه ( $W$ ) منفی و اگر گاز متراکم شود ( $\Delta V < 0$ ) کار محیط روی دستگاه ( $W$ ) مثبت است.

از سوی دیگر در شکل ۱-۱ حاصل ضرب  $P\Delta V$  برابر با سطح زیر نمودار  $P-V$  (مساحت هاشورخورده) است. بنابراین، می‌توان گفت در فرایند هم فشار، قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر است با سطح زیر نمودار  $P-V$ .

گرچه این نتیجه برای یک فرایند هم فشار به دست آمد، ولی می‌توان نشان داد که در حالت کلی نیز برای هر فرایندی آرمانی برقرار است و همواره قدرمطلق کار محیط روی دستگاه برابر مساحت سطح زیر نمودار فرایند در صفحه  $P-V$  است.



شکل ۱-۱: سطح زیر نمودار  $P-V$  برابر با قدرمطلق کار محیط روی دستگاه (یا کار دستگاه) است.

### مثال ۱-۱

۱۰۰ لیتر گاز کامل در فشار ثابت  $10^5 \text{ Pa} \times 1/100$  مقداری گرما به محیط می‌دهد و حجم آن  $10^\circ$  درصد کاهش می‌یابد. اگر دمای اولیه گاز  $300^\circ \text{ K}$  باشد دمای نهایی گاز و کار انجام شده روی آن چقدر است؟

**پاسخ:** چون گاز، کامل است و حجم آن به طور هم فشار کاهش یافته است، داریم:

$$\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$$

$$\frac{1/100}{300} = \frac{0.900}{T_f}$$

$$\Rightarrow T_f = 270^\circ \text{ K}$$

در این فرایند، کار داده شده به گاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = -P\Delta V = -(10^5 \times 10^3 \text{ N/m}^2)(0.900 - 1.000) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 100 \text{ J}$$

### مثال ۱-۲

گرمای تبخیر آب در نقطه جوش  $226 \times 10^3 \text{ J/g}$  است. اگر  $10^\circ \text{ g}$  (یا  $10^\circ \text{ cm}^3$ ) آب بر اثر جوشیدن در فشار  $10^\circ \text{ atm}$  ( $10^6 \text{ Pa}$ ) به  $10^\circ \text{ cm}^3$  بخار تبدیل شود،

الف) کار محیط روی آب چقدر است؟

ب) افزایش انرژی درونی آب چقدر است؟

پاسخ:

الف) چون تبخیر آب در فشار ثابت رخ داده است می توان نوشت:

$$W = -P\Delta V = -(1/0 \cdot 0 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(1/67 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1/0 \cdot 0 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = -1/67 \times 10^2 \text{ J}$$

ب) برای محاسبه تغییر انرژی درونی از قانون اول ترمودینامیک استفاده می کنیم:

$$\Delta U = Q + W$$

کار (W) را در قسمت الف محاسبه کردیم، کافی است Q را در این فرایند محاسبه کنیم. از کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه به یاد داریم:

$$Q = +mL_v = (1/0 \cdot 0 \text{ g})(2/26 \times 10^2 \text{ J/g}) = 2/26 \times 10^2 \text{ J}$$

و در نتیجه

$$\Delta U = 2/26 \times 10^2 \text{ J} + (-1/67 \times 10^2 \text{ J}) = 2/09 \times 10^2 \text{ J}$$

اکنون به محاسبه گرمایی می پردازیم که در فرایند هم فشار با دستگاه مبادله می شود. در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم که گرمای لازم برای تغییر دمای یک جسم به اندازه  $\Delta T$ ، با رابطه  $Q = mc\Delta T$  داده می شود. با توجه به رابطه ۲-۱،  $m = nM$  است و در نتیجه داریم  $Q = nMc\Delta T$ . حاصل ضرب  $Mc$  را ظرفیت گرمایی مولی می نامیم و آن را در فرایند هم فشار با  $C_p$  نشان می دهیم. بنابراین:

$$Q = nC_p\Delta T \quad (7-1)$$

با توجه به این رابطه، یکای ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت،  $\text{J/mol}\cdot\text{K}$  است.

ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت چند گاز در جدول ۲-۱ آمده است.

می توان نشان داد که ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت با تقریب خوبی، برای گازهای کامل تک اتمی برابر با  $\frac{5}{2}R$  و برای اغلب گازهای کامل دو اتمی در دماهای معمولی برابر با  $\frac{7}{2}R$  است.

## مثال ۹-۱

مقدار گرمایی که  $1/0 \text{ liter}$  گاز کامل  $\text{O}_2$  در فشار  $1/0 \text{ atm}$  و دمای  $300 \text{ K}$  مبادله می کند تا دمایش به  $270 \text{ K}$  برسد چقدر است؟ آیا گاز گرما از دست می دهد یا گرما می گیرد؟

پاسخ: مقدار  $n$  برابر است با

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1/0 \times 10^5 \text{ Pa})(1/0 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8/3 \text{ J/mol}\cdot\text{K})(300 \text{ K})} = 0/04 \text{ mol}$$

اکنون با استفاده از جدول ۲-۱ و رابطه ۷-۱ داریم:

$$Q = nC_p(T_f - T_i) = (0/04 \text{ mol})(29/4 \text{ J/mol}\cdot\text{K})(270 \text{ K} - 300 \text{ K}) = -35 \text{ J}$$

مقدار گرمای مبادله شده  $|Q| = 35 \text{ J}$  است و با توجه به اینکه  $Q$  منفی شده است، نتیجه می گیریم که گاز (دستگاه) گرما از دست می دهد.

جدول ۲-۱ — ظرفیت گرمایی مولی چند گاز در فشار ثابت بر حسب  $\text{J/mol}\cdot\text{K}$

$C_p$	گاز
20/8	Ar
20/8	He
20/8	Ne
29/1	هوا
3/505R=29/1	CO
3/468R=28/8	H <sub>2</sub>
3/504R=29/1	HCl
29/1	N <sub>2</sub>
3/589R=29/8	NO
3/533R=29/4	O <sub>2</sub>
4/082R	Cl <sub>2</sub>
4/466R=36/9	CO <sub>2</sub>
5/494R	CS <sub>2</sub>
4/112R	H <sub>2</sub> S
4/671R	N <sub>2</sub> O
4/799R	SO <sub>2</sub>

## مثال ۱-۱

مقداری گاز کامل تک اتمی در یک انبساط هم فشار،  $۱۰۰\text{ J}$  کار انجام می دهد. الف) گرمایی که گاز در این فرایند مبادله کرده چقدر است؟ ب) تغییر انرژی درونی گاز را محاسبه کنید.

پاسخ:

الف) گرما از رابطه  $۱-۷$  به دست می آید:

$$Q = nC_p\Delta T = n\left(\frac{5}{2}\right)R\Delta T$$

که در آن از ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت گازهای کامل تک اتمی استفاده کرده ایم. در رابطه بالا  $n\Delta T$  مجهول است و آن را باید به طریقی محاسبه کنیم. به این منظور از رابطه کار در فرایند هم فشار استفاده می کنیم:

$$\begin{aligned} W &= -P\Delta V = -P(V_f - V_i) \\ &= -(PV_f - PV_i) = -(nRT_f - nRT_i) \\ &= -nR\Delta T \end{aligned}$$

که در آن از قانون گازهای کامل ( $PV=nRT$ ) استفاده کرده ایم. از صورت مسئله می دانیم که گاز منبسط شده و  $۱۰۰\text{ J}$  کار انجام داده است. بنابراین  $W = -۱۰۰\text{ J}$  است و در نتیجه داریم:

$$nR\Delta T = ۱۰۰\text{ J}$$

با قراردادن این مقدار در رابطه  $Q$  خواهیم داشت:

$$Q = \left(\frac{5}{2}\right)(nR\Delta T) = \left(\frac{5}{2}\right)(۱۰۰) = ۲۵۰\text{ J}$$

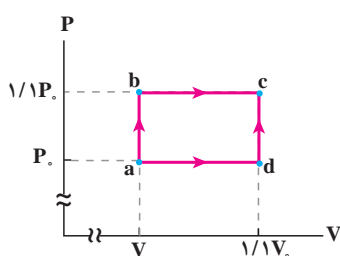
گرمای مبادله شده  $|Q| = ۲۵۰\text{ J}$  است. علامت مثبت  $Q$  نشان می دهد که این گرمایی است که گاز (دستگاه) گرفته است. ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W$$

که در آن  $Q$  گرمایی است که دستگاه گرفته و  $W$  کاری است که روی دستگاه انجام شده است. بنابراین:

$$\Delta U = ۲۵۰\text{ J} + (-۱۰۰\text{ J}) = ۱۵۰\text{ J}$$

## مثال ۱-۱



مقداری گاز کامل تک اتمی، مطابق شکل، از دو مسیر مختلف  $abc$  و  $adc$  به طور آرمانی از حالت اولیه  $a$  به حالت نهایی  $c$  رفته است.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر  $abc$  را بیابید.

ب) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر  $adc$  را بیابید.

پ) از مقایسه قسمت های الف) و ب) به چه نتیجه ای می رسید؟

پاسخ:

برای محاسبه انرژی درونی در هر دو قسمت از قانون اول ترمودینامیک

استفاده می کنیم که در آن  $Q$  گرمایی است که گاز (دستگاه) گرفته و  $W$  کار روی دستگاه است.  $(\Delta U = Q + W)$

(الف) کار در مسیر  $a \rightarrow b \rightarrow c$  برابر مجموع کار در مسیر  $ab$  و مسیر  $bc$  است :

$$W_{ab} = W_{\text{هم‌حجم}} = 0$$

$$W_{bc} = W_{\text{هم‌فشار}} = -P\Delta V = -1/1 P_0 (\cdot / 1 V_0) = -\cdot / 1 P_0 V_0$$

$$W_{abc} = W_{ab} + W_{bc} = -\cdot / 1 P_0 V_0$$

گرما در مسیر  $a \rightarrow b \rightarrow c$  برابر با مجموع گرما در مسیر  $ab$  و مسیر  $bc$  است :

$$\begin{aligned} Q_{ab} = Q_{\text{هم‌حجم}} &= nC_V \Delta T = n\left(\frac{3}{2}R\right)(T_b - T_a) = \frac{3}{2}(P_b V_b - P_a V_a) \\ &= \frac{3}{2}(1/1 P_0 V_0 - P_0 V_0) = \cdot / 15 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{bc} = Q_{\text{هم‌فشار}} &= nC_P \Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)(T_c - T_b) = \frac{5}{2}(P_c V_c - P_b V_b) \\ &= \frac{5}{2}(1/2 P_0 V_0 - 1/1 P_0 V_0) = \cdot / 25 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$Q_{abc} = Q_{ab} + Q_{bc} = \cdot / 40 P_0 V_0$$

در نتیجه تغییر انرژی درونی در مسیر  $a \rightarrow b \rightarrow c$  چنین می‌شود :

$$\Delta U_{abc} = W_{abc} + Q_{abc} = \cdot / 315 P_0 V_0$$

(ب) کار در مسیر  $a \rightarrow d \rightarrow c$  برابر مجموع کار در مسیر  $ad$  و  $dc$  است :

$$W_{ad} = W_{\text{هم‌فشار}} = -P\Delta V = -P_0 (\cdot / 1 V_0) = -\cdot / 1 P_0 V_0$$

$$W_{dc} = W_{\text{هم‌حجم}} = 0$$

$$W_{adc} = W_{ad} + W_{dc} = -\cdot / 1 P_0 V_0$$

گرما در مسیر  $a \rightarrow d \rightarrow c$  برابر مجموع گرما در مسیر  $ad$  و  $dc$  است :

$$\begin{aligned} Q_{ad} = Q_{\text{هم‌فشار}} &= nC_P \Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)(T_d - T_a) = \frac{5}{2}(P_d V_d - P_a V_a) \\ &= \frac{5}{2}(1/1 P_0 V_0 - P_0 V_0) = \cdot / 25 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{dc} = Q_{\text{هم‌حجم}} &= nC_V \Delta T = n\left(\frac{3}{2}R\right)(T_c - T_d) = \frac{3}{2}(P_c V_c - P_d V_d) \\ &= \frac{3}{2}(1/2 P_0 V_0 - 1/1 P_0 V_0) = \cdot / 165 P_0 V_0 \end{aligned}$$

$$Q_{adc} = Q_{ad} + Q_{dc} = \cdot / 415 P_0 V_0$$

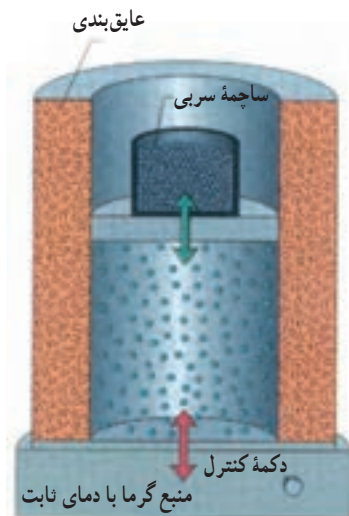
در نتیجه تغییر انرژی درونی در مسیر  $a \rightarrow d \rightarrow c$  چنین می‌شود :

$$\Delta U_{adc} = W_{adc} + Q_{adc} = \cdot / 315 P_0 V_0$$

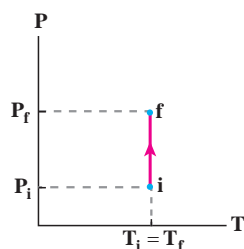
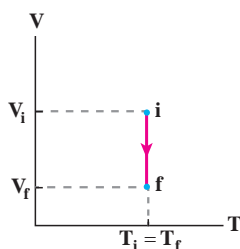
(پ) از نتیجه‌های به دست آمده در قسمت‌های (الف) و (ب)، چنانکه پیش‌تر نیز اشاره شد، درمی‌یابیم در فرایندهای مختلفی که برای گاز (دستگاه) رخ می‌دهد، اگر گاز از حالت اولیه یکسان به حالت نهایی یکسانی برسد، تغییر انرژی درونی گاز مقدار ثابتی است و اصطلاحاً در ترمودینامیک می‌گویند تغییر انرژی درونی به مسیر بستگی ندارد.

**پ) فرایند هم‌دما:** دمای دستگاه (گاز) طی این فرایند ثابت می‌ماند؛ مثلاً برای انجام دادن یک تراکم هم‌دما می‌توان مطابق شکل ۱۱-۱ استوانه حاوی گاز را در تماس با یک منبع گرما با دمای ثابت قرار داد و حجم گاز داخل استوانه را با افزودن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون به آهستگی کاهش داد.

در هر تراکم جزئی، کار کوچکی روی گاز درون استوانه انجام می‌شود و بنا به قانون اول ترمودینامیک دمای گاز کمی افزایش می‌یابد و اختلاف دمای آن با منبع گرمایی باعث می‌شود که گاز مقداری گرما از دست بدهد تا دمای آن با دمای منبع یکسان شود. با ادامه تراکم‌های جزئی، گاز را به‌طور هم‌دما به فشار و حجم مورد نظر خود می‌رسانیم. در فرایند تراکم هم‌دما، کار محیط روی دستگاه مثبت است و گاز گرما از دست می‌دهد. نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  این فرایند در شکل ۱۲-۱ رسم شده است.



**شکل ۱۱-۱** استوانه در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار دارد. با افزودن تدریجی گلوله‌های سربی؛ تراکمی هم‌دما رخ می‌دهد.



**شکل ۱۲-۱** نمودارهای  $V-T$  و  $P-T$  برای یک تراکم هم‌دما آرمانی

### تمرین ۲-۱

مشابه آزمایشی که برای تراکم هم‌دما شرح دادیم، آزمایشی برای یک انبساط هم‌دما طراحی کنید، نمودارهای  $P-T$  و  $V-T$  را برای آن رسم و علامت‌های  $Q$  و  $W$  را برای چنین فرایندی تعیین کنید.

### فعالیت ۲-۱

انتهای یک سرنگ بزرگ (مثلاً  $10^\circ\text{C}$ ) 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؟ توضیح دهید.

### مثال ۱۲-۱

گاز کاملی را در دمای ثابت از حالت اولیه  $V_1 = 4^\circ\text{liter}$  و  $P_1 = 1^\circ\text{atm}$  تا حالت نهایی با حجم  $V_2 = 1^\circ\text{liter}$  متراکم می‌کنیم.

الف) در طی این فرایند، فشار گاز را برای هر یک از حجم‌های  $3^\circ\text{liter}$ ،  $2^\circ\text{liter}$  و  $1^\circ\text{liter}$  حساب کنید و نمودار  $P-V$  را با استفاده از روش نقطه‌یابی و معلوم بودن مختصات هر نقطه رسم کنید.

ب) مساحت سطح زیر این نمودار  $5/5 \times 10^2\text{J}$  است.  $Q$  و  $W$  در این فرایند چقدر است؟



پاسخ:

الف) چون گاز، کامل و فرایند همدماست داریم:

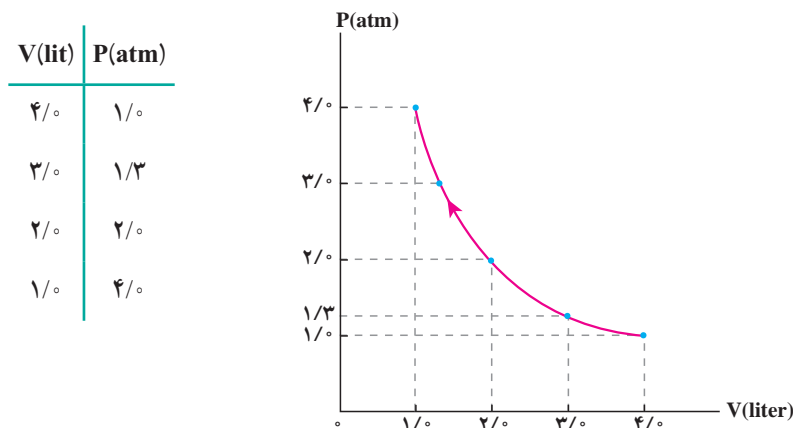
$$PV = nRT = \text{ثابت} \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots$$

$$V_2 = 3 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(3/0) \Rightarrow P_2 = 1/3 \text{ atm}$$

$$V_2 = 2 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(2/0) \Rightarrow P_2 = 2/0 \text{ atm}$$

$$V_2 = 1 \text{ liter} \Rightarrow (1/0)(4/0) = (P_2)(1/0) \Rightarrow P_2 = 4/0 \text{ atm}$$

مختصات نقطه‌های مربوط به نمودار P-V را در جدول یادداشت و نمودار را رسم می‌کنیم:



ب) چون گاز متراکم شده است، علامت کار انجام شده بر روی گاز مثبت است:

$$W = +5/5 \times 10^2 \text{ J}$$

برای گاز کامل انرژی درونی فقط تابع دمای مطلق آن است و در فرایند هم‌دما، دما ثابت می‌ماند. بنابراین داریم:

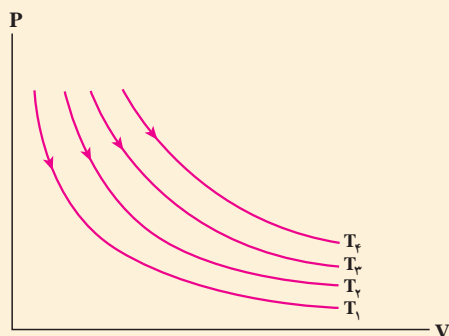
$$\Delta U = 0$$

آنگاه با استفاده از قانون اول ترمودینامیک گرمای داده شده به گاز به دست می‌آید:

$$\Delta U = Q + W \Rightarrow Q + 5/5 \times 10^2 = 0 \Rightarrow Q = -5/5 \times 10^2 \text{ J}$$

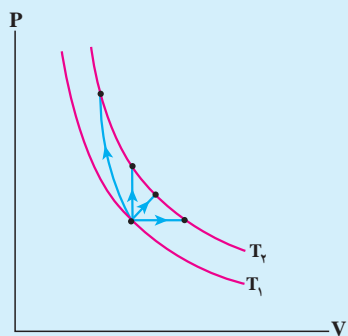
در حالت کلی، در فرایند هم‌دمای گاز کامل همواره  $Q = -W$  است.

## تمرین ۱-۳



در شکل مقابل، نمودار P-V مربوط به انبساط هم‌دمای یک گاز کامل در دماهای مختلف رسم شده است. نشان دهید:  $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$

## فعالیت ۱۳



در شکل روبه‌رو گاز کاملی را از طریق چند فرایند مختلف از جمله یک فرایند هم‌حجم و یک فرایند هم‌فشار از دمای  $T_1$  به دمای  $T_2$  رسانده‌ایم.

الف) نشان دهید تغییر انرژی درونی در تمام فرایندها از رابطه  $\Delta U = nC_V \Delta T$  به دست می‌آید.

ب) با استفاده از فرایندهای هم‌حجم و هم‌فشار نشان دهید

$$C_p - C_v = R$$

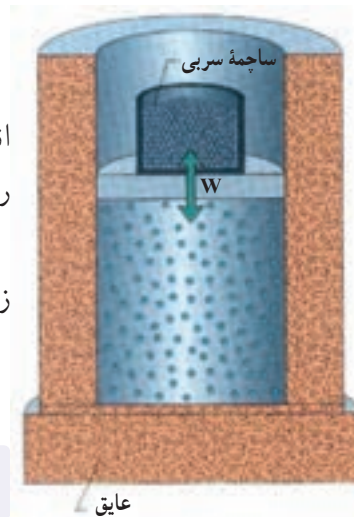
**ت) فرایند بی‌دررو:** در این فرایند بین دستگاه (گاز) و محیط، گرما مبادله نمی‌شود. برای انجام دادن این فرایند باید دستگاه را مطابق شکل ۱۳-۱ عایق بندی کنیم و سپس عمل تراکم یا انبساط را با افزودن یا کاستن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون به آهستگی انجام دهیم. در فرایند بی‌دررو  $Q=0$  است. بنابراین، قانون اول ترمودینامیک برای این فرایند به صورت زیر درمی‌آید:

$$\Delta U = Q + W = 0 + W$$

یا

$$W_{\text{بی‌دررو}} = \Delta U$$

(۱۳-۱)



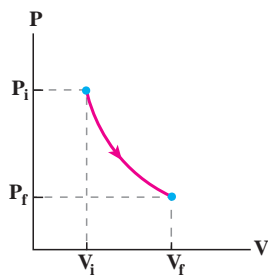
**شکل ۱۳-۱** با کاستن یا افزودن تدریجی ساچمه‌های سربی روی پیستون، گاز درون استوانه عایق‌پوش شده، انبساط یا تراکم بی‌دررو پیدا می‌کند.

همچنین هنگامی که یک گاز را به سرعت متراکم یا منبسط می‌کنیم، چون گاز فرصت تبادل گرما با محیط را پیدا نمی‌کند، فرایند به صورت بی‌دررو در نظر گرفته می‌شود.

## فعالیت ۱۴



گاهی اوقات وقتی یک نوشابه خیلی سرد را از یخچال بیرون می‌آوریم و در آن را بلافاصله باز می‌کنیم، مشاهده می‌شود که مه رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می‌شود. این پدیده را توجیه کنید.



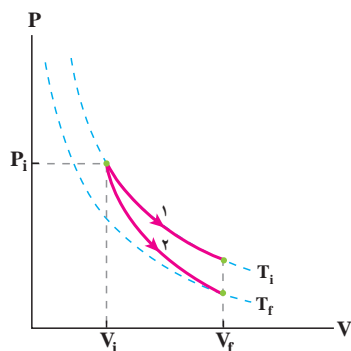
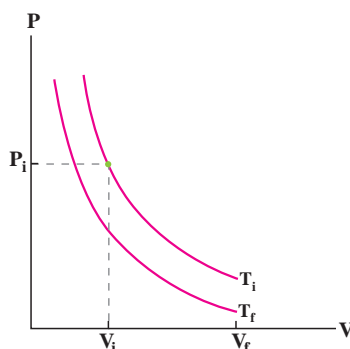
گاز کاملی را با حجم  $V_i$  و فشار  $P_i$  در نظر بگیرید. اگر این گاز را با یک فرایند بی‌دررو منبسط کنیم، نشان داده می‌شود که نمودار  $P-V$  آن خمی شبیه خم یک فرایند هم‌دما می‌شود. الف) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نشان دهید گاز کامل در انبساط بی‌دررو سرد می‌شود.

ب) گاز کاملی با حجم  $V_i$  و فشار  $P_i$  را تا حجم نهایی  $V_f$  یک بار به صورت هم‌دما و بار دیگر به صورت بی‌دررو منبسط می‌کنیم. با استفاده از نتیجه قسمت الف، نمودارهای این دو فرایند را در یک صفحه  $P-V$  رسم و با هم مقایسه کنید.

پ) در کدام فرایند  $|W|$  بیشتر است؟

پاسخ:

الف) با توجه به رابطه  $\Delta U = W_{\text{دررو}}$  و با توجه به اینکه در انبساط، کار محیط روی گاز (دستگاه) منفی است نتیجه می‌گیریم  $\Delta U < 0$  است؛ چون گاز، کامل است کاهش انرژی درونی گاز با کاهش دمای آن همراه است؛ یعنی دمای گاز کاهش می‌یابد. این را می‌توانستیم از رابطه  $\Delta U = nC_V \Delta T$  که در فعالیت ۳-۱ به دست آوردید نیز نتیجه بگیریم. ب) در شکل زیر دو منحنی هم‌دما با دماهای  $T_i$  و  $T_f$  رسم شده‌اند. از تمرین ۴-۱ می‌دانیم  $T_f < T_i$  است.



بدیهی است که در انبساط هم‌دما، دما تغییر نمی‌کند و همواره  $T = T_i$  است (مسیر ۱). ولی در قسمت الف نشان دادیم که در انبساط بی‌دررو دمای گاز کاهش می‌یابد، پس قاعدتاً گاز باید به دمایی پایین‌تر مثل دمای  $T_f$  در شکل برسد (مسیر ۲).

علاوه بر این برای رسم نمودار می‌توان فشارهای نهایی را با استفاده از قانون گازهای کامل با یکدیگر مقایسه کرد. همان‌طور که در مثال ۱۴-۱ خواهید دید فشار نهایی در انبساط بی‌دررو کمتر از فشار نهایی در انبساط هم‌دما می‌شود.

پ) چون سطح زیر نمودار مربوط به انبساط هم‌دما بیشتر است،  $|W|$  برای این فرایند مقدار بیشتری دارد.

مثال ۱۳-۱ را با فرض آنکه گاز به جای انبساط، تراکم یابد پاسخ دهید.

## مثال ۱-۱۴

۵/۰۰ mol از یک گاز کامل تک اتمی را از حالت اولیه ( $P_i, V_i, T_i = 300\text{ K}$ ) تا حجم نهایی  $V_f$  یک بار به صورت هم دما و بار دیگر به صورت بی دررو منبسط می کنیم. در انبساط بی دررو دمای مطلق گاز ۵/۰۰ درصد کاهش می یابد. الف) فشار نهایی گاز در انبساط بی دررو چند برابر فشار نهایی انبساط هم دما است؟ ب) کار انجام شده روی گاز در انبساط بی دررو را حساب کنید.

پاسخ:

$$\left(\frac{P_f V_f}{T_f}\right)_{\text{بی دررو}} = \left(\frac{P_f V_f}{T_f}\right)_{\text{هم دما}}$$

الف)

با توجه به اینکه حجم نهایی در دو فرایند یکسان است، داریم:

$$\left(\frac{P_f}{T_f}\right)_{\text{بی دررو}} = \left(\frac{P_f}{T_f}\right)_{\text{هم دما}} \Rightarrow \frac{P_f}{P_{\text{هم دما}}} = \frac{T_f}{T_{\text{بی دررو}}} = \frac{285\text{ K}}{300\text{ K}} = 0.95$$

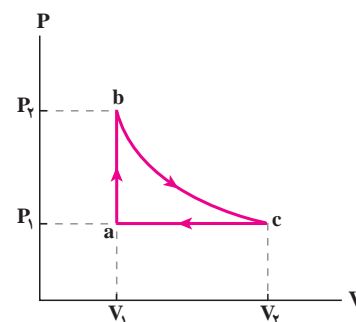
ب) با استفاده از رابطه ۸-۱ داریم:

$$W_{\text{بی دررو}} = \Delta U = nC_V \Delta T = n\left(\frac{3}{2}R\right)\Delta T$$

$$= (5.00\text{ mol})\left(\frac{3}{2} \times 8.31\text{ J/mol.K}\right)(-150\text{ K}) = -935\text{ J}$$

## ۱-۶- چرخه ترمودینامیکی

دستگاه می تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایندی را که در شکل ۱-۱۴ می بینید، از سه فرایند هم حجم، بی دررو و هم فشار تشکیل شده است. طی این فرایند، دستگاه نخست 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  $P_2$ ) می رود. سپس از طریق یک انبساط بی دررو به حالت c (با حجم  $V_2$  و فشار  $P_1$ ) می رسد. در ادامه، دستگاه با فرایندی هم فشار به حالت اولیه a بازمی گردد. مجموعه این فرایندها یک چرخه ترمودینامیکی را تشکیل می دهد. در چرخه ترمودینامیکی دستگاه پس از طی چند فرایند به حالت اولیه خود برمی گردد؛ چون در چرخه ترمودینامیکی حالت نهایی با حالت ابتدایی یکسان است تغییر انرژی درونی برابر صفر است ( $\Delta U = 0$ ). بنابراین از قانون اول ترمودینامیک برای چرخه های ترمودینامیکی داریم:



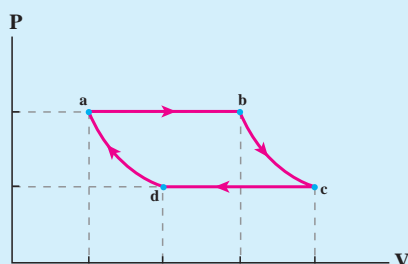
شکل ۱-۱۴ چرخه ترمودینامیکی، حلقه بسته ای را در صفحه P-V تشکیل می دهد.

$$Q = -W$$

$$(۱-۹) \text{ (چرخه ترمودینامیکی)}$$

## فعالیت ۱-۵

شکل زیر یک چرخه ترمودینامیکی فرضی را نشان می دهد که یک دستگاه ترمودینامیکی آن را طی کرده است.



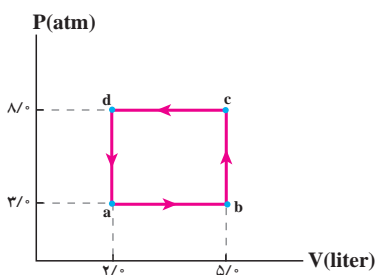
الف) کار انجام شده روی دستگاه در هر فرایند را برحسب سطح زیر نمودار آن بیان کنید.

ب) نشان دهید اندازه کار کل انجام شده روی دستگاه برابر با مساحت داخل چرخه است.

پ) کار کل انجام شده روی دستگاه مثبت است یا منفی؟ توضیح دهید.

با انجام فعالیت ۱-۵ دریافتیم اندازه کار انجام شده در چرخه برابر با مساحت داخل چرخه در صفحه  $P-V$  است و می توان نشان داد در چرخه های ساعتگرد در صفحه  $P-V$  کار انجام شده بر روی دستگاه، منفی و در چرخه های پاد ساعتگرد، مثبت است.

## مثال ۱-۱۵



گازی چرخه ترمودینامیکی فرضی نشان داده شده در شکل را طی می کند.

الف) کار انجام شده روی گاز در این چرخه چقدر است؟

ب) گرمای مبادله شده بین گاز و محیط در چرخه چقدر است؟

پاسخ:

الف) کار انجام شده برابر با مساحت سطح داخل چرخه است:

$$|W| = S_{abcd} = (8 - 3) \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times (5 - 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

چون چرخه در صفحه  $P-V$  پاد ساعتگرد است، داریم

$$W = +1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

ب) با توجه به رابطه ۱-۹ می توان نوشت:

$$Q = -W = -1/5 \times 10^3 \text{ J}$$

بنابراین، گرمای مبادله شده بین گاز و محیط  $|Q| = 1/5 \times 10^3 \text{ J}$  است و در این چرخه گاز به محیط گرما داده است.

## ۲-۱- ماشین های گرمایی

تا حدود ۲۵۰ سال پیش انرژی مکانیکی مورد نیاز انسان به طور عمده از طریق نیروی ماهیچه ای انسان ها و حیوان ها تأمین می شد. از نیروی حاصل از باد و جریان آب (مثلاً در آسیاب های بادی و آبی) نیز انرژی مکانیکی به دست می آمد. اما استفاده از این منابع انرژی فقط در زمان ها و مکان های خاصی امکان پذیر بود. امروزه بیشتر انرژی مورد نیاز انسان از طریق ماشین های گرمایی به دست می آید. این ماشین ها با استفاده از برخی فرایندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به کار تبدیل می کنند. از نظر تاریخی نخستین ماشین های گرمایی، **ماشین های برون سوز** مانند ماشین بخار بوده است. انرژی مکانیکی حاصل از این ماشین ها در مواردی از قبیل لکوموتیو، کشتی بخار، زیردریایی، فضاپیما و ... به طور مستقیم مورد استفاده قرار می گیرد. در نیروگاه ها این انرژی ابتدا به انرژی الکتریکی تبدیل می شود و سپس از طریق شبکه برق رسانی به مکان های مختلف منتقل می گردد. از این طریق انرژی مورد نیاز انسان در محل کار و زندگی فراهم می آید.

**ماشین های درون سوز** نوع دیگری از ماشین های گرمایی هستند که با سوخت هایی چون بنزین، گاز یا گازوئیل کار می کنند. این نوع ماشین ها در موتور اتومبیل ها و کامیون ها و نیز در برخی هواپیماها به کار گرفته می شوند.

ماشین های گرمایی با ترکیب چند فرایند، مقداری گرما دریافت و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می کنند. از آنجا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود، طراحی این ماشین ها به این

صورت است که دستگاه پس از پیمودن چند فرایند معین به حالت اولیه خود برمی گردد؛ یعنی این ماشین‌ها در یک چرخه معین کار می‌کنند و این چرخه، در ضمن کار ماشین دائماً تکرار می‌شود.

اساس کار همه ماشین‌های گرمایی یکسان است. در ادامه با ذکر مثال‌هایی چگونگی کار ماشین‌های برون‌سوز و درون‌سوز را توضیح می‌دهیم و با اساس کار ماشین‌های گرمایی آشنا می‌شویم.

### الف) ماشین‌های گرمایی برون‌سوز:

ماشین‌های بخار و استرلینگ دو نوع آنها هستند. در ادامه به توضیح ماشین بخار می‌پردازیم.

**ماشین بخار:** ماشین بخار در نواحی مختلف جهان به طور گسترده برای تولید برق مورد استفاده

قرار می‌گیرد. دیدیم که در ماشین‌های گرمایی، دستگاه در یک چرخه مقداری گرما دریافت می‌کند و بر

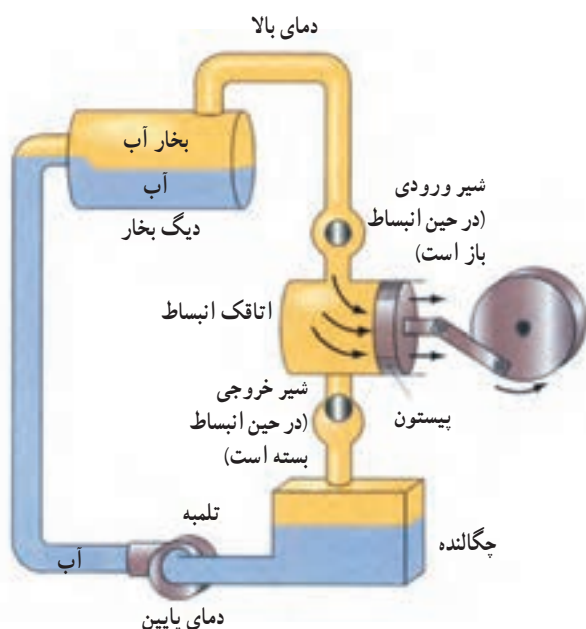
روی محیط کار انجام می‌دهد. در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند، آب است. همان‌طور

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 اولیه خود در دیگ

بخار برمی‌گردد و این چرخه دائماً تکرار می‌شود. چون گرما توسط کوره (یعنی از بیرون دستگاه) به

آب داده می‌شود، ماشین بخار از ماشین‌های برون‌سوز محسوب می‌شود.



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

برای بررسی نحوه کار ماشین بخار، مقدار مشخصی از آب درون دیگ بخار را در نظر می‌گیریم،

و فرایندهایی را که این آب در ماشین بخار طی می‌کند با اندکی ساده‌سازی توضیح می‌دهیم. شکل

۱-۱۶ این فرایندها را به طور تقریبی نشان می‌دهد. تمام این فرایندها آرمانی فرض شده‌اند.

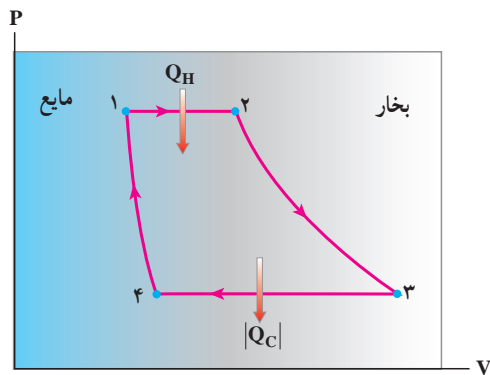
**الف) مرحله اول (از ۱ تا ۲):** در این مرحله آب، درون دیگ بخار در فشار ثابت و نسبتاً زیاد از

کوره گرما می‌گیرد و به بخار تبدیل می‌شود. دما و حجم بخار آب در این مرحله تا حد معینی افزایش می‌یابد.

**ب) مرحله دوم (از ۲ تا ۳):** 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 نتیجه

## ترمودینامیک



شکل ۱-۱۷ نمودار ساده شده چرخه ماشین بخار در صفحه P-V (چرخه رانکین). توجه کنید که تمام فرایندها در این چرخه، آرمانی فرض شده‌اند.

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.

پ) **مرحله سوم (از ۳ تا ۴):** 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 یا فن‌های خیلی قوی آن را خنک می‌کنند، هدایت می‌شود. در چگالنده، بخار آب در فشار ثابت گرمای دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود. در این فرایند، حجم بخار آب کاهش می‌یابد.

ت) **مرحله چهارم (از ۴ تا ۱):** تلمبه، آب حاصل از میعان را به دیگ بخار برمی‌گرداند و فشار آن را به طور بی‌دررو به فشار اولیه می‌رساند (فقط تغییرات کوچکی در دما و حجم مایع رخ می‌دهد) و بدین ترتیب یک چرخه ترمودینامیکی کامل می‌شود.

در حین کار ماشین بخار، این چرخه دائماً تکرار می‌شود. دستگاه در این چرخه به طور 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.

## تمرین ۱-۵

با استفاده از نمودار P-Vی ماشین بخار

الف) مشخص کنید که آب در مرحله‌های ۱→۲، ۲→۳، ۳→۴ و ۴→۱، گرما گرفته یا از دست داده است؟

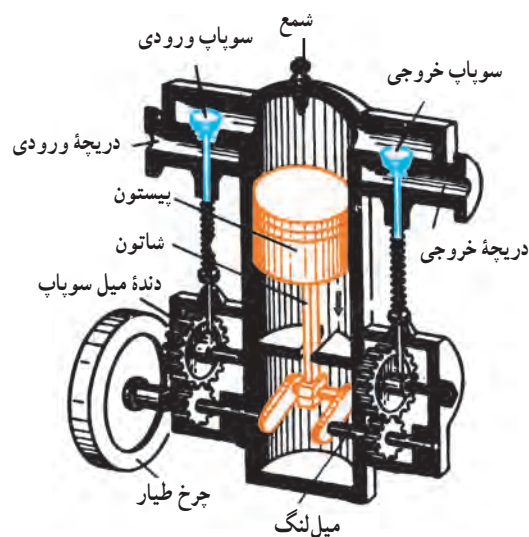
ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نشان دهید رابطه  $Q_{12} + Q_{34} + W_{\text{چرخه}} = 0$  برقرار است.

## فعالیت ۱-۷

ماشین استرلینگ در سال ۱۸۱۶ میلادی (۱۱۹۵ هجری شمسی) توسط رابرت استرلینگ اسکاتلندی اختراع شد. این ماشین که مدت‌ها به فراموشی سپرده شده بود، اکنون برای استفاده در خودروها، فضاپیماها و زیردریایی‌ها توسعه یافته است. درباره این ماشین و مراحل مختلف چرخه آن تحقیق کنید. برای ارائه این تحقیق سعی کنید از تصاویر و نمودارهای مناسب آموزشی استفاده و آن را به صورت پاورپوینت به کلاس گزارش کنید.

**ب) ماشین‌های گرمایی درون‌سوز :** موتور بیشتر خودروهای سواری، هواپیماهای ملخ‌دار، برخی کشتی‌ها، قطارها و نیروگاه‌های کوچک درون‌سوزاند. ماشین‌های گرمایی درون‌سوز انواع مختلفی دارند که دو نوع متداول آنها بنزینی و دیزلی نام دارند. در اینجا به توصیف ماشین‌های بنزینی می‌پردازیم.

موتور بنزینی از یک یا چند استوانه (سیلندر) تشکیل شده است که پیستون‌ها در داخل آنها حرکت می‌کند. یکی از این استوانه‌ها و اجزای جانبی آن در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است. در این نوع موتور، بخشی از انرژی حاصل از سوخت، سبب حرکت پیستون می‌شود. این حرکت از طریق دسته (شاتون) و میل‌لنگ به حرکت دورانی تبدیل می‌شود. با انتقال این حرکت دورانی به چرخ‌ها، اتومبیل حرکت می‌کند. بخش دیگر انرژی از طریق رادیاتور، که موتور را سرد می‌کند، و لوله خروجی (اگزوز) مستقیماً به هوا داده می‌شود.



شکل ۱-۱۷ استوانه (سیلندر) و اجزای جانبی موتور

مراحل مختلف کار ماشین‌های گرمایی درون‌سوز بنزینی (شکل ۱-۱۸) به شرح زیر است :

**الف) مرحله مکش :** با پایین آمدن پیستون، مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه ورودی وارد استوانه می‌شود. وقتی پیستون بالاست حجم فضای بالای آن  $V$  و وقتی پیستون پایین است حجم این فضا  $rV$  است ( $r$  را نسبت تراکم می‌گویند). وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ دریچه ورودی بسته می‌شود و مخلوط بنزین و هوا در داخل استوانه محبوس می‌شود.

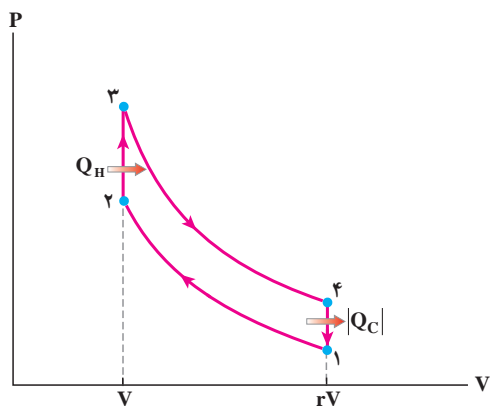
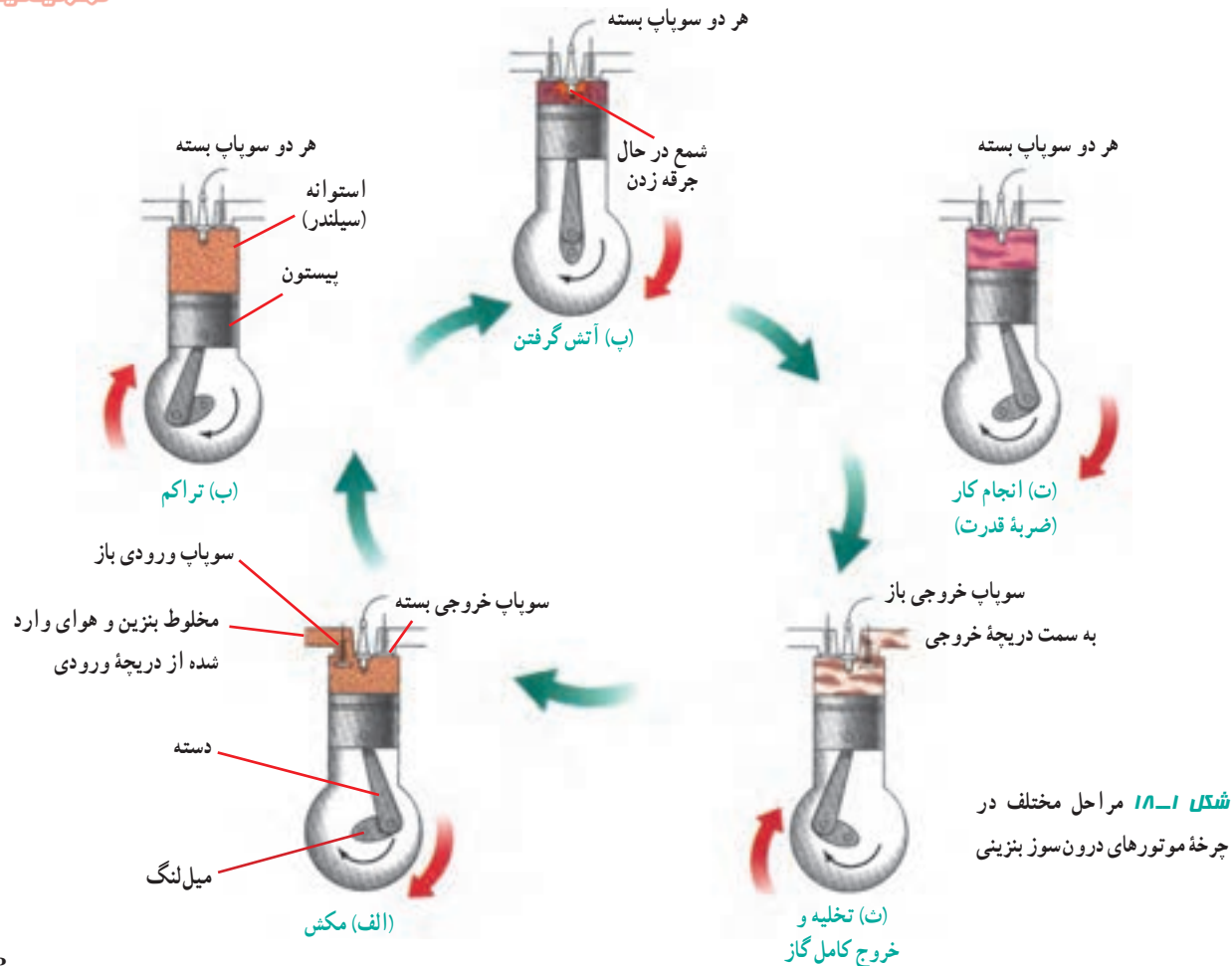
**ب) مرحله تراکم :** پیستون بالا می‌آید، مخلوط را متراکم می‌کند و آن را به حجم  $V$  می‌رساند. این تراکم به سرعت رخ می‌دهد و بنابراین می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در پایان این مرحله، دما و فشار مخلوط بسیار بالا رفته است.

**پ) مرحله آتش‌گرفتن :** هنگامی که پیستون به بالاترین وضعیت خود رسید، شمع جرقه می‌زند، مخلوط آتش می‌گیرد و دما و فشار آن در حجم ثابت  $V$  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) مرحله انجام کار :** در این مرحله در اثر فشار زیاد، مخلوط منبسط می‌شود و حجم آن از  $V$  به  $rV$  می‌رسد. این انبساط به سرعت رخ می‌دهد و بنابراین می‌توان آن را بی‌دررو در نظر گرفت. در این انبساط، فشار و دمای مخلوط کاهش می‌یابد. در این مرحله مخلوط، پیستون را به شدت به پایین می‌راند و روی آن کار انجام می‌دهد. این کار توسط میل‌لنگ به اجزای دیگر ماشین منتقل می‌شود.

**ث) مرحله تخلیه و خروج کامل گاز :** این مرحله از دو بخش تشکیل شده است. در بخش اول، در حالی که پیستون در پایین‌ترین وضعیت (حجم  $rV$ ) قرار دارد، سوپاپ دریچه خروجی باز می‌شود و قسمتی از محصولات احتراق به صورت دود از دریچه خروجی خارج می‌شود و فشار تا فشار جو کاهش پیدا می‌کند. در بخش دوم مرحله تخلیه، پیستون بالا می‌آید و بقیه محصولات احتراق را بیرون





شکل ۱۸-۱ چرخه اتو که با فرض آرمانی بودن همه فرایندها رسم شده است.

- ۱ تا ۲- دستگاه به سرعت متراکم می‌شود، فشار و دمای آن افزایش و حجم آن کاهش می‌یابد (مرحله تراکم).
- ۲ تا ۳- دستگاه گرمای  $Q_H$  را می‌گیرد و دما و فشار آن به مقدار زیادی بالا می‌رود (معادل مرحله آتش گرفتن).
- ۳ تا ۴- دستگاه به سرعت منبسط می‌شود، دما و فشار آن کاهش می‌یابد و پیستون را به طرف پایین می‌راند (مرحله انجام کار).
- ۴ تا ۱- دستگاه گرمای  $|Q_C|$  را از دست می‌دهد و دما و فشار آن کاهش می‌یابد (معادل مرحله تخلیه).

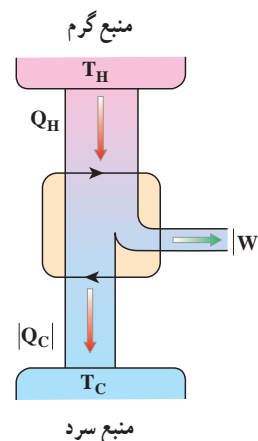
می‌راند و حجم فضای بالای پیستون به مقدار اولیه  $V$  می‌رسد. در مرحله تخلیه با خروج دود مقدار زیادی گرما به هوای بیرون داده می‌شود.

چرخه اتو: نحوه عمل یک ماشین درون سوز بنزینی را می‌توان با فرض مجموعه‌ای از شرایط به طور تقریبی بیان کرد و براساس این فرض‌ها چرخه‌ای موسوم به چرخه اتو را در صفحه  $P-V$  رسم کرد. این فرض‌ها عبارت‌اند از:

- ۱- دستگاه (مخلوط بنزین و هوا) همواره یک گاز کامل است و بنابراین، اشتعالی بر اثر واکنش شیمیایی در آن رخ نمی‌دهد. ولی با گرفتن گرمای  $Q_H$  از محیط به همان دما و فشار گاز در پایان مرحله آتش گرفتن ماشین واقعی می‌رسد.
  - ۲- تمام فرایندها آرمانی‌اند.
  - ۳- مرحله تخلیه گاز رخ نمی‌دهد، گاز در داخل استوانه باقی می‌ماند و با دادن گرمای  $|Q_C|$  به محیط، دما و فشار آن کاهش می‌یابد.
- چرخه اتو در شکل ۱۹-۱ رسم شده است.

### ۸-۱ - بازده ماشین گرمایی

در بررسی ماشین‌های بخار و درون‌سوز بنزینی دیدیم که با فرض آرمانی بودن همه فرایندها، دستگاه یک چرخه کامل را می‌پیماید و در طی آن مقداری گرما از یک منبع گرم می‌گیرد ( $Q_H$ )، مقداری کار انجام می‌دهد ( $|W|$ ) و مقداری گرما به یک منبع سرد می‌دهد ( $|Q_C|$ ). با توجه به آنچه گفته شد، طرز کار همه ماشین‌های گرمایی آرمانی را می‌توان مانند شکل ۱-۲ به صورت طرح‌وار نشان داد. هدف هر ماشین گرمایی آن است که انرژی گرمایی گرفته شده  $Q_H$  را تا آنجا که ممکن است به کار بیشتری تبدیل کند. برای اندازه‌گیری اینکه در چرخه ماشین گرمایی چقدر از انرژی داده شده به دستگاه، به کار مکانیکی تبدیل می‌شود، بازده گرمایی  $\eta$  را تعریف می‌کنیم. بازده یک ماشین گرمایی با نسبت کار انجام شده در چرخه ماشین به انرژی گرمایی که ماشین دریافت می‌کند، تعریف می‌شود:



شکل ۱-۲ طرز کار طرح‌وار یک ماشین گرمایی آرمانی

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} \quad (۱-۱) \quad (\text{برای هر ماشین})$$

با فرض آرمانی بودن فرایندهای طی شده در چرخه ماشین و با چشم‌پوشی از اصطکاک و سایر اتلاف‌های انرژی، قانون اول ترمودینامیک برای چرخه این ماشین‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta U = Q + W$$

همان‌طور که می‌دانیم تغییر انرژی درونی دستگاه در هر چرخه صفر است ( $\Delta U = 0$ ). از طرفی

$Q$  شامل دو جمله  $Q_H$  و  $Q_C$  است ( $Q = Q_H + Q_C$ ). پس می‌توان نوشت:

$$0 = Q_H + Q_C + W$$

در این رابطه،  $Q_H$  مثبت و  $Q_C$  و  $W$  منفی است. بنابراین:

$$Q_H = |W| + |Q_C| \quad (۱-۱)$$

بنابراین، بازده برای ماشین‌های گرمایی آرمانی به صورت زیر درمی‌آید:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} \quad (۱-۲) \quad (\text{برای ماشین‌های آرمانی})$$

بازده واقعی ماشین‌های گرمایی با بازده ماشین‌های آرمانی متفاوت است. بازده واقعی ماشین‌های

درون‌سوز بنزینی در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، بازده واقعی ماشین‌های درون‌سوز دیزلی در حدود ۴۰ درصد و بازده ماشین‌های بخار نیز در حدود ۴۰ درصد است. رابطه ۱-۱۲ نشان می‌دهد که بازده ماشین‌های گرمایی نمی‌تواند بیشتر از یک باشد.

## فعالیت ۷-۱

محاسبه نشان می‌دهد که با بالا بردن نسبت تراکم  $r$  می‌توان به بازده بیشتری برای ماشین‌های درون‌سوز بنزینی دست یافت. اما در عمل ممکن نیست به نسبت تراکم بالاتر از ۴ یا ۵ دست یافت؛ زیرا در نسبت‌های تراکم بالاتر، مخلوط سوخت و هوا چنان گرم می‌شود که پیش از جرقه زدن شمع، آتش می‌گیرد. این مشکل را رودلف کریستین کارل دیزل<sup>۱</sup> مخترع و مهندس آلمانی با طراحی ماشین‌های در پایان سده نوزدهم تا حدودی برطرف کرد. در ماشین دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا، خود هوا متراکم می‌شود. نسبت تراکم به ۱۱ تا ۱۲ می‌رسد و هوا تا حدود  $600^{\circ}\text{C}$  گرم می‌شود. در پایان تراکم، سوخت مایع به درون سیلندر پاشیده می‌شود. دربارهٔ مرحله‌های مختلف چرخه این ماشین و نمودار آن در صفحه P-V تحقیق کنید.

## مثال ۱۴-۱

یک ماشین گرمایی آرمانی در هر چرخه  $4/0$  kJ گرما از منبع گرم دریافت می‌کند و  $2/4$  kJ گرما به منبع سرد می‌دهد. الف) در هر چرخه چقدر کار روی محیط انجام می‌شود؟  
ب) بازده این ماشین چقدر است؟  
پاسخ: الف) از رابطه ۱-۱۱ داریم:

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

$$|W| = 4/0 \text{ kJ} - 2/4 \text{ kJ} = 1/6 \text{ kJ}$$

ب) با استفاده از رابطه ۱-۱۲ بازده این ماشین به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = \frac{1/6 \text{ kJ}}{4/0 \text{ kJ}} = 0/40$$

بنابراین در این ماشین گرمایی  $40\%$  درصد از گرمای دریافت شده از منبع گرم، به منبع سرد داده شده و تنها  $40\%$  درصد آن به کار تبدیل شده است.

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

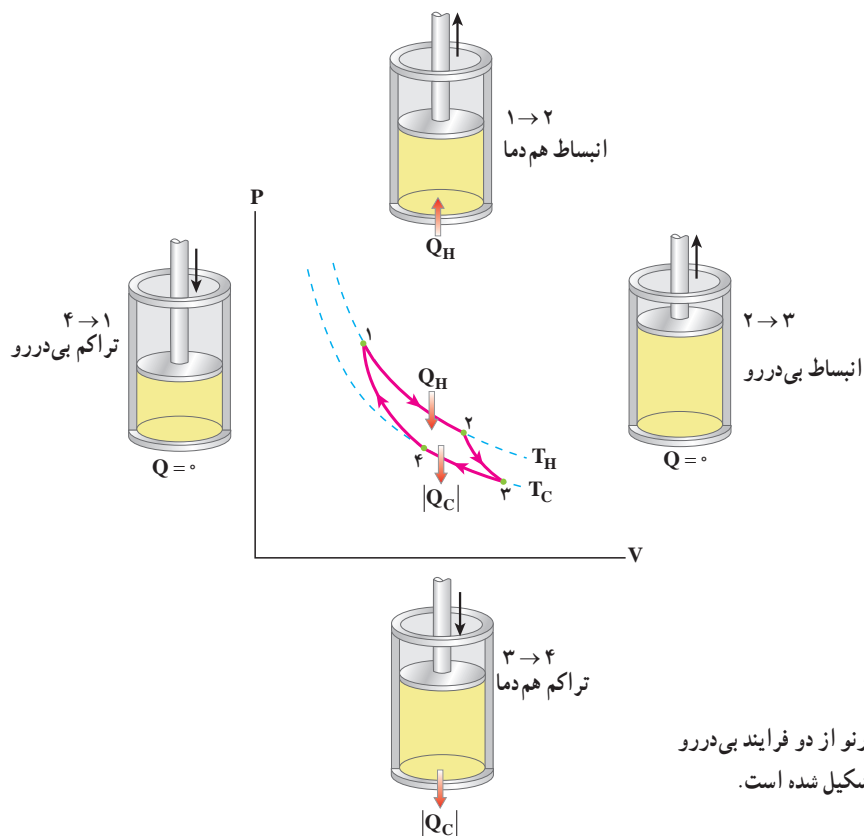
در بررسی ماشین‌های گرمایی در بخش قبل، دیدیم که همهٔ این ماشین‌ها با دو منبع گرما که دمای متفاوتی دارند، کار می‌کنند. در این ماشین‌ها، دستگاه گرمای  $Q_H$  را از یک منبع گرم می‌گیرد، مقداری از آن را به کار ( $|W|$ ) تبدیل می‌کند و بقیه ( $|Q_C|$ ) را به یک منبع سرد می‌دهد. در واقع، هیچ‌یک از ماشین‌های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

۱ - Christian Carl Rudolf Diesel (۱۸۵۸ - ۱۹۱۳)

بیان بالا، قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نامیده می‌شود؛ یعنی ممکن نیست بازده یک ماشین گرمایی برابر یک (۱۰۰ درصد) شود. توجه داریم که، اگر در چرخه یک ماشین گرمایی، تمام گرمای گرفته شده از منبع گرم 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.

**قضیه کارنو:** براساس قانون دوم ترمودینامیک بازده ماشین‌های گرمایی همواره از ۱۰۰ درصد کمتر است. اکنون این پرسش مطرح می‌شود که بیشترین بازده ممکن برای ماشین گرمایی‌ای که بین دو منبع گرم و سرد با دماهای  $T_H$  و  $T_C$  کار می‌کند چقدر است؟ پاسخ به این پرسش را **سدهی کارنو** مهندس جوان فرانسوی در سال ۱۸۲۴ میلادی ارائه داد. او یک ماشین فرضی و آرمانی را طراحی کرد که بازده آن بیشینه و سازگار با قانون دوم ترمودینامیک باشد. این ماشین فرضی را **ماشین کارنو** و چرخه‌ای را که ماشین براساس آن کار می‌کند **چرخه کارنو** می‌نامند. چرخه کارنو از دو فرایند بی‌دررو و دو فرایند هم‌دما تشکیل شده است (شکل ۱-۲۱).

مراحل عمل چرخه کارنو به این ترتیب است:



**شکل ۱-۲۱** چرخه کارنو از دو فرایند بی‌دررو و دو فرایند هم‌دما تشکیل شده است.



نیکلاس سدی کارنو

نیکلاس لئونارد سدی کارنو<sup>۱</sup> در اوّل ژوئن ۱۷۹۶ م. (۱۱۷۵ هجری شمسی) در پاریس و در خانواده‌ای که در آن علم و سیاست عجین شده بود، به دنیا آمد. او نخستین پسر لائزار کارنو یک ریاضی‌دان سرشناس بود که در عین حال از رهبران ارتش انقلابی فرانسه نیز محسوب می‌شد. لائزار بخش سوم نام فرزند خود را از شاعر معروف ایرانی، سعدی شیرازی برگرفته بود که از قضا بعدها به همین نام نیز شناخته شد. سدی کارنو در ۱۶ سالگی وارد انستیتو پلی تکنیک پاریس شد که هدفش تربیت افسران مهندس بود و در آنجا تحت تعلیم دانشمندان بنامی چون آمبر، آرگو، گی - لوساک و بواسون قرار گرفت. پس از فارغ‌التحصیلی در سال ۱۸۱۴ سدی به عنوان افسر وارد رشته مهندسی ارتش فرانسه شد. در همین دوران بود که تنها اثر خود را در رساله‌ای تحت عنوان «تأملاتی در باب توان محرکه گرما»<sup>۲</sup> به چاپ رساند و در آن برای نخستین بار نظریه بازده ماشین‌های گرمایی را ارائه نمود. در آن زمان کار کارنو توجه چندانی را جلب نکرد، ولی بعدها رودلف کلاسیوس و لرد کلوین با استفاده از این نظریه، قانون دوم ترمودینامیک را فرمول‌بندی کردند و به تبیین مفهومی به نام «اتروپی» پرداختند. از این‌رو، از کارنو اغلب به‌عنوان پدر علم ترمودینامیک نیز یاد می‌شود. کارنو در سال ۱۸۲۸ از ارتش استعفا داد و به تبعیدی خودخواسته رفت و چند سال بعد در حالی که از بیماری‌های روانی متعددی رنج می‌برد، در ۲۴ آگوست ۱۸۳۲ م (۱۲۱۱ هجری شمسی) در سن ۳۶ سالگی درگذشت.

- ۱- گاز در دمای  $T_H$  انبساط هم‌دما می‌یابد و گرمای  $Q_H$  را از منبع گرم می‌گیرد (۲→۱).
  - ۲- گاز به‌طور بی‌دررو منبسط می‌شود و دمای آن تا  $T_C$  کاهش می‌یابد (۳→۲).
  - ۳- گاز در دمای  $T_C$  به‌طور هم‌دما متراکم می‌شود و گرمای  $|Q_C|$  را به منبع سرد می‌دهد (۳→۴).
  - ۴- گاز به‌طور بی‌دررو متراکم می‌شود، دمای آن تا  $T_H$  افزایش می‌یابد و به حالت اول بازمی‌گردد (۴→۱).
- محاسبه نشان می‌دهد که بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (۱۳-۱)$$

که در آن  $T_C$  و  $T_H$  برحسب کلوین است. از رابطه ۱-۱۳ درمی‌یابیم بازده ماشین کارنو به جنس ماده‌ای که چرخه را می‌پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع سرد و گرم که ماشین بین آن دو کار می‌کند وابسته است. بنا به قضیه کارنو، بازده یک ماشین گرمایی که بین دو منبع با دماهای  $T_H$  و  $T_C$  کار می‌کند هرگز نمی‌تواند بیشتر از بازده ماشین کارنویی باشد که بین همین دو منبع کار می‌کند؛ یعنی برای هر ماشین گرمایی کارنو  $\eta \leq \eta_{\text{کارنو}}$  است.

### مثال ۱-۱۷

فرض کنید در چرخه یک ماشین درون‌سوز بیشینه دمای مخلوط بنزین و هوا  $8/2 \times 10^2 \text{ K}$  و دمای محصولات احتراق هنگام خروج از سیلندر (دمای منبع سرد)  $3/2 \times 10^2 \text{ K}$  است. بازده ماشین کارنویی که بین دو منبع دماها کار می‌کند چقدر است؟

پاسخ:

با استفاده از رابطه ۱-۱۳ داریم:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{3/2 \times 10^2 \text{ K}}{8/2 \times 10^2 \text{ K}} = 0/61$$

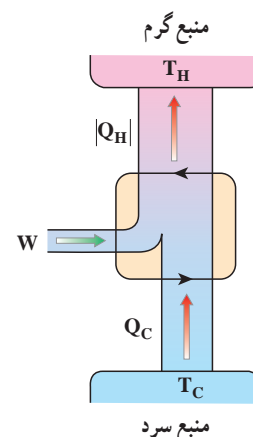
بازده یک ماشین درون‌سوز در عمل از این عدد کمتر است.

۱ - Nicolas Leonard Sadi Carnot

۲ - Reflections on motive power of fire

## ۱-۱۰- یخچال‌ها

یخچال وسیله‌ای است که با استفاده از کار، گرما را از منبعی سرد می‌گیرد و به منبعی گرم می‌دهد. در یخچال نیز مانند ماشین‌های گرمایی یک چرخهٔ ترمودینامیکی طی می‌شود. در این چرخه محیط روی دستگاه کار  $W$  را انجام می‌دهد، دستگاه گرمای  $Q_C$  را از منبع سرد می‌گیرد و گرمای  $|Q_H|$  را به منبع گرم می‌دهد. طرز کار یخچال به صورت طرح‌وار در شکل ۱-۲۲ نشان داده شده است؛ مثلاً در یخچال خانگی انرژی الکتریکی سبب انجام کار به وسیلهٔ کمپرسور می‌شود ( $W$ )، گرما از هوا و مواد داخل یخچال گرفته می‌شود ( $Q_C$ ) و گرما به هوای بیرون یخچال داده می‌شود ( $|Q_H|$ ). طرز کار کولرگازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که در کولرگازی منبع سرد، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع گرم، هوای بیرون از اتاق است. نحوهٔ عمل یخچال‌ها عکس نحوهٔ عمل ماشین گرمایی است؛ یعنی همهٔ انتقال‌های انرژی چه به صورت گرما و چه به صورت کار در مقایسه با ماشین گرمایی وارونه شده است.



شکل ۱-۲۲ طرز کار طرح‌وار یک یخچال آرمانی

با فرض آرمانی بودن فرایندهای طی شده در چرخهٔ یخچال و با چشم‌پوشی از اصطکاک و سایر اتلاف‌های انرژی می‌توانیم قانون اول ترمودینامیک را برای یخچال‌ها به شکل زیر بنویسیم:

$$\Delta U = Q + W$$

همان‌طور که می‌دانیم تغییر انرژی درونی دستگاه در هر چرخه صفر است ( $\Delta U = 0$ ). از طرفی

$Q$  شامل دو جملهٔ  $Q_C$  و  $Q_H$  است. پس می‌توان نوشت:

$$0 = Q_H + Q_C + W$$

در این رابطه،  $Q_H$ ، منفی و  $Q_C$  و  $W$  مثبت است. بنابراین:

$$|Q_H| = W + Q_C \quad (1-14)$$

در هر یخچال، می‌خواهیم حداکثر گرما را از منبع سرد با صرف کمترین کار ممکن بگیریم. بنابراین، ضریب عملکرد یخچال ( $K$ ) به صورت نسبت گرمای گرفته شده از منبع سرد به کاری که موتور یخچال انجام می‌دهد تعریف می‌شود:

$$K = \frac{Q_C}{W} \quad (1-15) \text{ (برای هر یخچالی)}$$

هرچه ضریب عملکرد یخچال بیشتر باشد، استفاده از آن مقرون به صرفه‌تر است. ضریب عملکرد یخچال‌های خانگی در حدود ۵ و کولرهای گازی در حدود ۲/۵ است.

ضریب عملکرد یخچالی که در آن فرایندها آرمانی است، از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{|Q_H| - Q_C} \quad (1-16) \text{ (برای یخچال‌های آرمانی)}$$

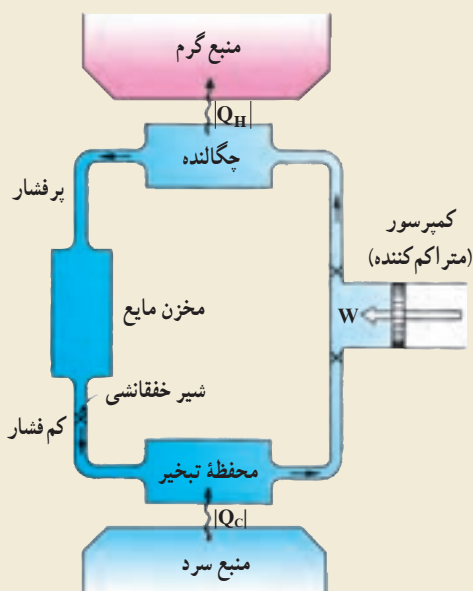
## ساز و کار یخچال خانگی

یخچال خانگی یکی از وسایل بسیار ضروری خانگی است. یخچال‌های خانگی 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.

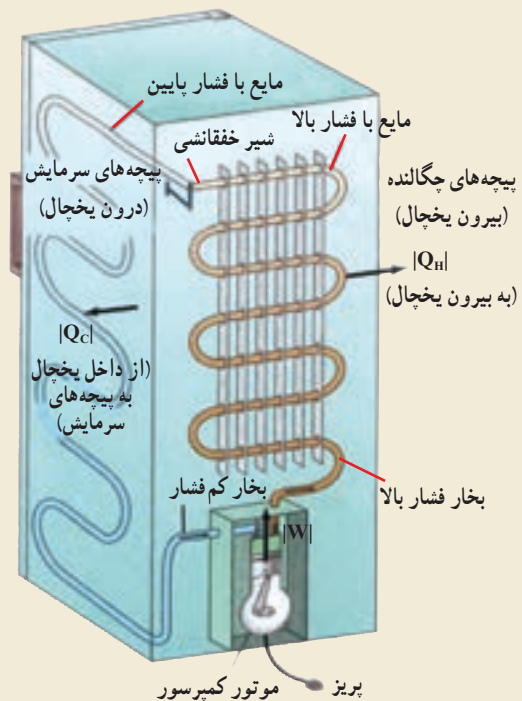
در شکل الف یک یخچال خانگی و در شکل ب نمایش طرح وار طرز کار آن را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است، قسمت‌های اصلی یخچال خانگی عبارتند از: چگالنده، محفظه تبخیر، کمپرسور (متراکم کننده) و شیر خفقانشی (شیر سوزنی یا منفذی باریک). چگالنده در تماس با منبع گرم (هوای بیرون یخچال) و محفظه تبخیر با منبع سرد (محتویات داخل یخچال) در تماس است. ماده‌ای که چرخه ترمودینامیکی را طی می‌کند، گاز فریون است. این گاز از جمله گازهایی است که به لایه ازن صدمه می‌زند و پژوهش‌های زیادی برای جایگزینی آن انجام شده است. فریون در چگالنده به صورت مایع در فشار زیاد و در محفظه تبخیر به صورت گاز در فشار کم قرار دارد.

طرز کار یخچال خانگی به طور مختصر به شرح زیر است:

کمپرسور با انجام کار  $W$  گاز را از محفظه 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 (اتاق) بالاتر رفته است، گرمای  $Q_H$  را به این منبع می‌دهد و مایع می‌شود و وارد مخزن مایع می‌گردد. هنگامی که این مایع پرفشار از شیر خفقانشی می‌گذرد به شدت سرد می‌شود، به طوری که از منبع سرد (غذا و یخ) هم سردتر می‌شود و از آن گرما می‌گیرد و بدین ترتیب، در محفظه تبخیر، به بخار تبدیل می‌گردد. در یخچال، این چرخه دائماً تکرار می‌شود.



(ب)

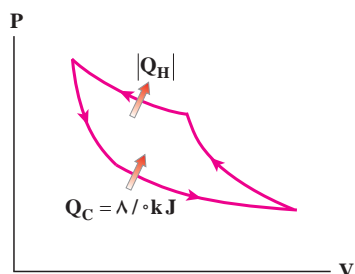


(الف)

## پرسش ۲-۱

چگونه می‌توان ضریب عملکرد یخچال را افزایش داد؟

## مثال ۱-۱۸



فرض کنید نمودار P-V ی چرخه‌ای که دستگاه در یک یخچال فرضی طی می‌کند، به صورت شکل روبه‌رو است. اگر دستگاه در هر چرخه ۸/۰ kJ گرما از منبع سرد بگیرد و مساحت داخل چرخه ۲/۰ kJ باشد، الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می‌دهد؟ و ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۱-۱۴ داریم:

$$\begin{aligned} |Q_H| &= W + Q_C \\ &= 2/0 \text{ kJ} + 8/0 \text{ kJ} = 10 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ب) با استفاده از رابطه ۱-۱۵:

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{8/0 \text{ kJ}}{2/0 \text{ kJ}} = 4/0$$

## ۱۱-۱ 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 به‌طور خودبه‌خود 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 به‌طور خودبه‌خود 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 خودبه‌خود 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.



توان یک یخچال  $100$  وات و ضریب عملکرد آن  $4/00$  است.

الف) چه مدت طول می کشد تا در این یخچال  $1/00 \text{ kg}$  آب  $25/0^\circ \text{C}$  به یخ  $10/0^\circ \text{C}$  تبدیل شود؟

ب) در این مدت، چه مقدار گرما به هوای بیرون داده می شود؟  $L_f = 3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}$  و  $c_{\text{یخ}} = 2/10 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$  و  $c_{\text{آب}} = 4/20 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$

پاسخ: الف) گرمای  $Q_C$  یی که آب از دست می دهد، برابر است با

$$\begin{aligned} Q_C &= mc_{\text{آب}} |\Delta\theta_1| + mL_f + mc_{\text{یخ}} |\Delta\theta_2| \\ &= (1/00 \text{ kg}) (4/20 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ \text{C}) (25/0^\circ \text{C}) \\ &\quad + (1/00 \text{ kg}) (3/35 \times 10^5 \text{ J/kg}) \\ &\quad + (1/00 \text{ kg}) (2/10 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ \text{C}) (10/0^\circ \text{C}) \\ &= 4/61 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

اکنون با استفاده از رابطه ۱-۱۵ برای ضریب عملکرد یخچال داریم:

$$W = \frac{Q_C}{K} = \frac{4/61 \times 10^5 \text{ J}}{4/00} = 1/15 \times 10^5 \text{ J}$$

حال با استفاده از رابطه توان، زمان لازم برای تبدیل آب به یخ به دست می آید:

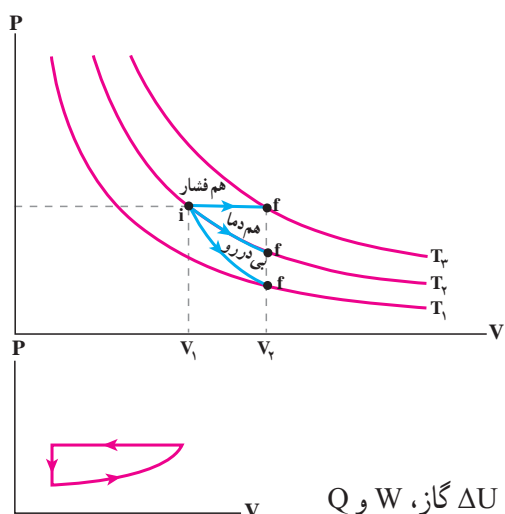
$$t = \frac{W}{P} = \frac{1/15 \times 10^5 \text{ J}}{100 \text{ J/s}} = 1/15 \times 10^3 \text{ s}$$

ب) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\begin{aligned} |Q_H| &= Q_C + W \\ &= 4/61 \times 10^5 \text{ J} + 1/15 \times 10^5 \text{ J} \\ &= 5/76 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

## پرسش‌ها

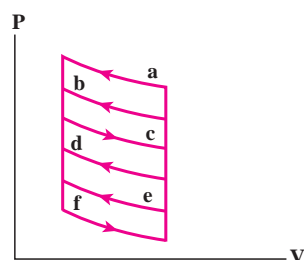
- ۱ در فرایند هم‌حجم چگونه می‌توان فشار گاز را افزایش یا کاهش داد؟
- ۲ الف) نشان دهید در فرایند هم‌دما، هر چه دمای گاز کامل بیشتر باشد، برای متراکم کردن آن تا یک اندازه معین باید کار بیشتری انجام داد.  
ب) نشان دهید در انبساط هم‌فشار گاز کامل، باید به آن گرما داد.
- ۳ ته یک سرنگ را می‌بندیم. آن را درون مقداری آب می‌اندازیم و آب را به تدریج گرم می‌کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می‌کند؟
- ۴ الف) آیا می‌توان با باز گذاشتن در یخچال، آشپزخانه را خنک کرد؟ در مورد پاسخ خود توضیح دهید.  
ب) وجود برفک روی بدنه داخلی محفظه یخ‌ساز یخچال چه اثری بر کارکرد یخچال دارد؟



- ۵ مطابق شکل روبه‌رو، حجم گاز کاملاً طی سه فرایند هم‌فشار، هم‌دما و بی‌دررو از  $V_1$  به حجم بزرگ‌تر  $V_2$  می‌رسد. الف) اندازه کار انجام شده توسط گاز را در این سه فرایند مقایسه کنید. ب) دمای نهایی را در این فرایندها مقایسه کنید. پ) گرمای داده شده به گاز را در این فرایندها مقایسه کنید.

- ۶ مخترعی مدعی است ماشینی ساخته که بین نقطه‌های جوش و انجماد آب کار می‌کند و بازده آن  $70^\circ$  درصد است. آیا ادعای این مخترع می‌تواند درست باشد؟ توضیح دهید.

- ۷ برای چرخه گازی که نمودار  $P-V$  آن در اینجا نشان داده شده است،  $\Delta U$ ،  $Q$  و  $W$  مثبت است یا منفی، و یا برابر صفر است؟

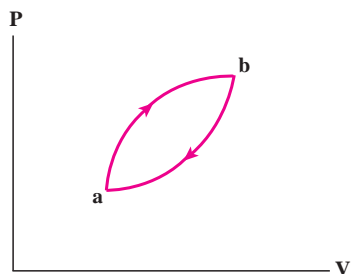


- ۸ شکل روبه‌رو نمودار  $P-V$ ی چند چرخه متفاوت را که توسط گازی پیموده می‌شود، نشان می‌دهد. در کدام چرخه‌ها، کار انجام شده (الف) توسط گاز و (ب) محیط بیشینه است؟

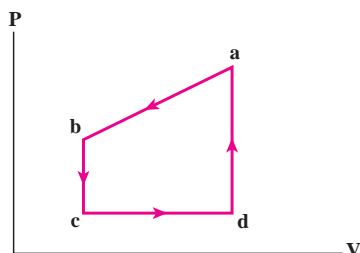
## مسئله‌ها

- ۱ حجم  $50^\circ$  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. اگر به جای گرما دادن به گاز، حجم گاز را از طریق یک فرایند هم‌فشار نصف کنیم اکنون کار و گرمای مبادله شده چقدر می‌شود؟

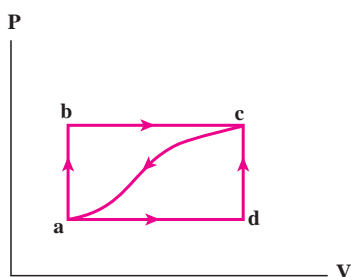
## ترمودینامیک



- ۲ در شکل روبه‌رو فرایندی چرخه‌ای برای یک گاز نشان داده شده است. الف) تعیین کنید که گاز در این چرخه گرما گرفته یا از دست داده است. ب) اگر قدرمطلق گرمای مبادله شده  $400\text{ J}$  باشد، کار انجام شده روی گاز چقدر است؟



- ۳ شکل روبه‌رو چرخه‌گازی را نشان می‌دهد. تغییر انرژی درونی گاز وقتی در مسیر abc از a به c می‌رود برابر  $200\text{ J}$  است. وقتی گاز از c به d می‌رود  $180\text{ J}$ ، و وقتی از d به a می‌رود،  $80\text{ J}$  گرما می‌گیرد. وقتی گاز از c به d می‌رود، چقدر کار انجام می‌دهد؟  
۴ یک ماشین کارنو بین دماهای  $280\text{ K}$  و  $360\text{ K}$  کار می‌کند. این ماشین در هر چرخه  $750\text{ J}$  گرما از منبع گرم می‌گیرد. الف) در هر چرخه،  $|W|$  چقدر است؟ ب) در هر چرخه چقدر گرما به منبع سرد داده می‌شود؟



- ۵ گازی مطابق شکل، از طریق مسیر abc از حالت a به c می‌رود.

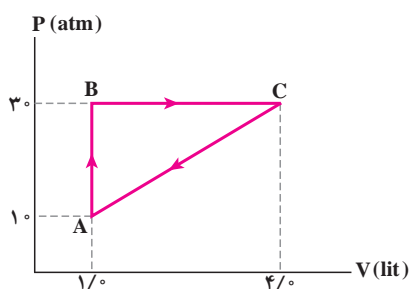
در این مسیر، گاز  $90^\circ$  ژول گرما می‌گیرد و  $70^\circ$  ژول کار انجام می‌دهد.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در مسیر abc چقدر است؟

ب) اگر برای رسیدن به حالت c فرایند از مسیر adc انجام شود، کار انجام شده توسط گاز

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 از حالت c به حالت a برگردانیم، چقدر باید از آن انرژی بگیریم؟



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

- ۷ یک ماشین بخار در هر دقیقه  $10^5 \text{ MJ}$  گرما از دیگ بخار دریافت می‌کند و  $9 \times 10^4 \text{ MJ}$  گرما در چگالنده از دست می‌دهد.

الف) با فرض آرمانی بودن این ماشین، کار انجام شده توسط ماشین در هر دقیقه چند مگاژول است؟

ب) بازده این ماشین چقدر است؟

- ۸ یک ماشین گرمایی درون‌سوز در هر چرخه  $8000\text{ J}$  گرما از سوزاندن سوخت دریافت می‌کند و  $2000\text{ J}$  کار تحویل می‌دهد. گرمای حاصل از سوخت  $10^4 \text{ J/g}$  است و ماشین در هر ثانیه  $40^\circ$  چرخه را می‌پیماید. با فرض آرمانی بودن ماشین، کمیت‌های زیر را حساب کنید.

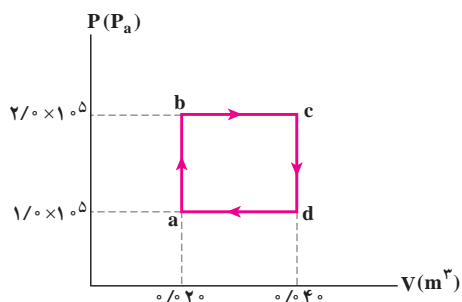
الف) بازده ماشین،

ب) گرمای تلف شده در هر چرخه،

پ) سوخت مصرف شده در هر چرخه،

ت) توان ماشین.

- ۹ ضرب عملکرد یک یخ‌ساز (فریزر)  $K = 4/0$  است. این یخ‌ساز در هر ساعت،  $1/5 \text{ kg}$  آب با دمای  $\theta_1 = 20^\circ \text{C}$  را به یخ با دمای  $\theta_2 = -10^\circ \text{C}$  تبدیل می‌کند.  $C_{\text{آب}} = 4/2 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$  ،  $C_{\text{یخ}} = 2/1 \times 10^3 \text{ J/kg.K}$  و  $L_f = 3/3 \times 10^5 \text{ J/kg}$
- الف) چه مقدار گرما در هر ساعت باید از آب گرفته شود؟  
 ب) یخ‌ساز در هر ساعت چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف می‌کند؟  
 پ) چه مقدار گرما در هر ساعت به بیرون داده می‌شود؟
- ۱۰ یک کولر گازی در هر دقیقه  $9/0 \times 10^4 \text{ J}$  گرما از اتاق می‌گیرد و در همان مدت،  $1/3 \times 10^5 \text{ J}$  گرما به فضای بیرون می‌دهد.
- الف) توان مصرفی این کولر چند وات است؟  
 ب) ضرب عملکرد آن چند است؟



- ۱۱ یک مول از یک گاز کامل تک اتمی در یک ماشین گرمایی آرمانی، چرخه‌ای را مطابق شکل روبه‌رو می‌پیماید. مطلوب است:
- الف) کار انجام شده توسط ماشین گرمایی در پیمودن یک چرخه،  
 ب) گرمای مبادله شده در فرایند abc،  
 پ) بازده ماشین گرمایی،  
 ت) بازده ماشین کارنویی که بین بالاترین و پایین‌ترین دمای چرخه عمل می‌کند.

- ۱۲ مخترعی ادعا می‌کند چهار ماشین ساخته است که هر یک بین منبع‌های با دمای ثابت  $300 \text{ K}$  و  $400 \text{ K}$  کار می‌کنند. داده‌های هر ماشین در هر چرخه عبارت‌اند از:

$W = -400 \text{ J}$ ، $Q_C = -1700 \text{ J}$ ، $Q_H = 2000 \text{ J}$	ماشین A
$W = -400 \text{ J}$ ، $Q_C = -200 \text{ J}$ ، $Q_H = 500 \text{ J}$	ماشین B
$W = -400 \text{ J}$ ، $Q_C = -200 \text{ J}$ ، $Q_H = 600 \text{ J}$	ماشین C
$W = -10 \text{ J}$ ، $Q_C = -90 \text{ J}$ ، $Q_H = 100 \text{ J}$	ماشین D

با فرض آرمانی بودن فرایندهای این چهار ماشین:

الف) کدام یک از ماشین‌ها قانون اول ترمودینامیک را نقض می‌کنند؟

ب) کدام یک از ماشین‌ها قابل ساخت هستند؟

- ۱۳ بازده یک ماشین آرمانی ۲۵ درصد است و در هر چرخه  $8/2 \times 10^3 \text{ J}$  کار انجام می‌دهد. الف)  $Q_H$  و  $|Q_C|$  را در هر چرخه به دست آورید. ب) اگر با تنظیم موتور، بازده ماشین به ۳۰ درصد افزایش یابد،  $Q_H$  و  $|Q_C|$  به‌ازای همان مقدار کار چقدر می‌شود؟
- ۱۴ می‌خواهیم یک ماشین گرمایی بسازیم که منبع گرم آن آب اقیانوس در دمای  $27^\circ \text{C}$  و منبع سرد آن آب اعماق اقیانوس در دمای  $7^\circ \text{C}$  باشد. حداکثر بازدهی که می‌توان به دست آورد چقدر است؟

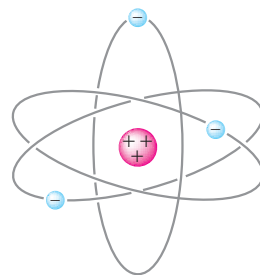
## الکتریسیته ساکن



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

در کتاب‌های علوم دوره راهنمایی و نیز کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، با بار الکتریکی و روش ایجاد بار در اجسام آشنا شدیم و آموختیم که دو نوع بار الکتریکی وجود دارد که مثبت و منفی نام‌گذاری شده‌اند. بر این اساس، بار الکترون منفی و بار پروتون مثبت است (شکل ۱-۲). علاوه بر این، در آزمایش‌های مختلف دیده‌ایم که بار الکتریکی به وجود نمی‌آید و از بین نمی‌رود و فقط از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شود. به این اصل، **بایستگی بار الکتریکی** گفته می‌شود. همچنین آموختیم اجسام باردار بر هم نیرو وارد می‌کنند. این نیروها ممکن است ربایشی (جاذبه) یا رانشی (دافعه) باشند. بیشتر نیروهایی که با آنها آشنا هستیم منشأ الکتریکی دارند. به کمک این نیروها می‌توان ساختار اجسام، پیوند بین ذره‌ها و بسیاری از پدیده‌هایی را که در طبیعت رخ می‌دهند، توصیف کرد. دامنه کاربرد الکتروسیسته در فناوری و صنعت به قدری گسترده است که نیازی به بیان ندارد.

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



**شکل ۱-۲** مدل ساده‌ای از اتم؛ بار الکترون‌ها منفی و بار پروتون‌ها مثبت است.

## ۱-۲- قانون کولن

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

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

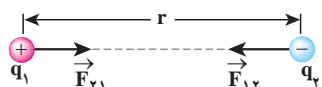


**شکل ۱-۲** ترازوی پیچشی کولن. در دو سر یک میله سبک افقی یک کره کوچک و یک قرص قرار دارد. یک کره مشابه از حفره‌ای به داخل برده می‌شود. نیروی مؤثر بین بارها از اندازه‌گیری زاویه چرخش ترازوی پیچشی تارسیدن به تعادل به دست می‌آید. (تصویر از کتاب مرجع سال ۱۳۸۵م.)

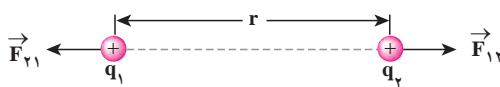
**شارل کولن**، دانشمند فرانسوی، برای اولین بار با انجام دادن آزمایش‌های ساده و هوشمندانه‌ای (شکل ۲-۲) توانست عامل‌هایی را که نیروهای الکتریکی به آنها بستگی دارند، شناسایی کند و نتیجه آزمایش‌های خود را، که امروزه به نام **قانون کولن** شناخته شده است، به صورت زیر بیان کرد:

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

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



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



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

**شکل ۱-۲**

## الکتروستاتیک ساکن

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

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

که در آن

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



## شارل آگوستین کولن

شارل آگوستین کولن فرانسوی در ۱۴ ژوئن سال ۱۷۳۶ میلادی (۱۱۱۵ هجری شمسی) به دنیا آمد. او در دانشگاه مباحث متنوعی از قبیل فلسفه، ریاضیات، نجوم و شیمی را آموخت و در سال ۱۷۶۱ از کالج مازارین در پاریس فارغ‌التحصیل شد. او در طی دوازده سال پس از فارغ‌التحصیلی شغل‌های متنوعی در شاخه‌های مختلف مهندسی داشت و مدتی را نیز در خارج از فرانسه گذراند. کولن پس از بازگشت به پاریس در سال ۱۷۸۵ میلادی تقریباً هم‌زمان با بنیامین فرانکلین آزمایش معروف خود را در مورد اینکه نیروی بین دو بار دزدهای به‌طور معکوسی با فاصله بین آنها تغییر می‌کند، به چاپ رساند. نتیجه این آزمایش که به قانون کولن معروف شده است از هر آزمون تجربی‌ای سربلند بیرون آمده است و تاکنون هیچ استثنایی برای آن یافت نشده است. کولن معتقد بود چنین قانونی برای قطب‌های مغناطیسی نیز برقرار است، گرچه هیچ وقت نتوانست به چنین رابطه‌ای برسد. کولن سرانجام در ۲۳ آگوست سال ۱۸۰۶ میلادی (۱۱۸۵ هجری شمسی) در هفتاد سالگی در پاریس درگذشت. نام کولن یکی از ۷۲ نفری است که روی برج ایفل ثبت شده است.

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

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

در شکل ۲-۳،  $\vec{F}_{12}$  به معنای نیرویی است که ذره اول به ذره دوم وارد می‌کند و  $\vec{F}_{21}$  نیرویی است که ذره دوم به ذره اول وارد می‌کند.

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

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

به کمک قانون کولن (رابطه ۲-۱) می‌توان اندازه نیروی الکتریکی‌ای را که دو ذره باردار به یکدیگر وارد می‌کنند، محاسبه کرد. ربایشی یا رانشی بودن نیروها را به کمک نوع بارها مشخص می‌کنیم.

## مثال ۱-۲

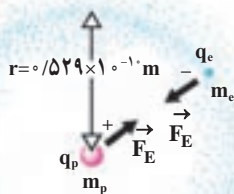
دو ذره با بارهای الکتریکی  $q_1 = +2/\mu\text{C}$  و  $q_2 = -5/\mu\text{C}$  در فاصله  $3/\text{m}$  از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی نیرویی که دو ذره به یکدیگر وارد می‌کنند و نوع آن را مشخص کنید. پاسخ: با استفاده از رابطه ۲-۱ داریم:

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

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

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

## مثال ۲-۲



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

پاسخ:

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

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

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

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

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

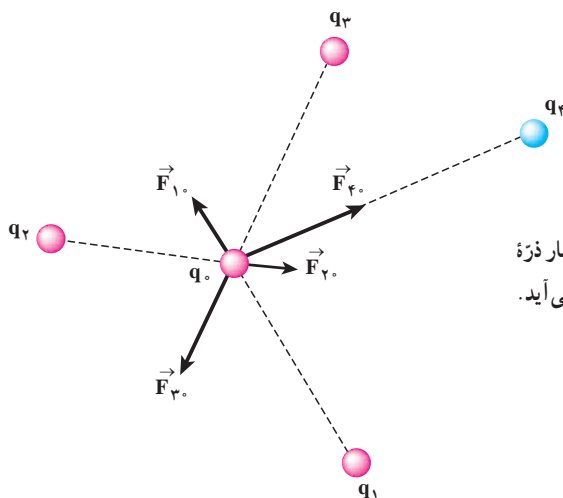
$$= 3/61 \times 10^{-47} \text{ N}$$

در نتیجه نسبت بزرگی این نیروها چنین می شود:

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

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

تجربه نشان می دهد اگر تعدادی ذره باردار در یک ناحیه از فضا قرار داشته باشند، نیروی الکتریکی وارد بر هر ذره، برآیند نیروهایی است که هر یک از ذره های دیگر در غیاب سایر ذره ها، بر آن ذره وارد می کند. برای مثال، شکل ۲-۴ نیروهای وارد بر بار  $q_0$  از سوی چهار بار دیگر را نشان می دهد. این موضوع که از آزمایش نتیجه شده است را اصل برهم نهی نیروهای کولنی می گویند.



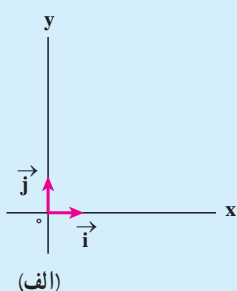
شکل ۲-۴ نیروی وارد بر بار  $q_0$ ، از جمع برداری نیروهایی که چهار ذره باردار دیگر در غیاب بقیه بارها به این ذره وارد می کنند، به دست می آید.

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



## یادداشت ریاضی

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

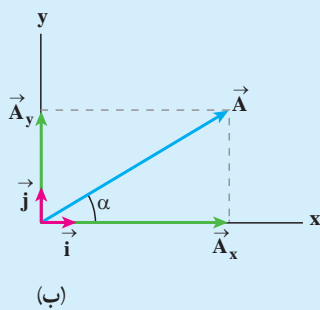


در درس ریاضی خود خوانده‌اید که با انتخاب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  به ترتیب روی محورهای  $x$  و  $y$  (شکل الف) می‌توان یک بردار را بر حسب بردارهای یکه نمایش داد. بردار یکه در راستای هر محور، برداری است به طول واحد و در جهت همان محور.

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

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

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



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

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

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

بنابراین

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

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

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

و در نتیجه:

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

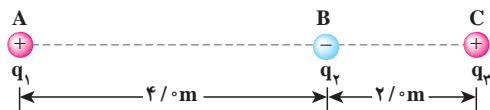
جهت بردار  $\vec{A}$  را با تعیین زاویه این بردار با سوی مثبت محور  $x$  به دست می‌آوریم. اگر در شکل ب تنازات زاویه  $\alpha$  را حساب کنیم، نتیجه می‌شود:

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

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

## مثال ۳-۲

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



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

فاصله بین بارهای  $q_1$  و  $q_3$  را با  $r_{13}$  و فاصله بین بارهای  $q_2$  و  $q_3$  را با  $r_{23}$  نشان می‌دهیم. با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

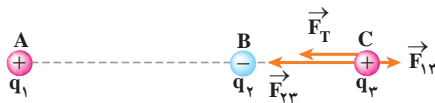
$$F_{13} = k \frac{|q_1| |q_3|}{r_{13}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/5 \times 10^{-6} \text{ C})(4/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(6/0 \text{ m})^2}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

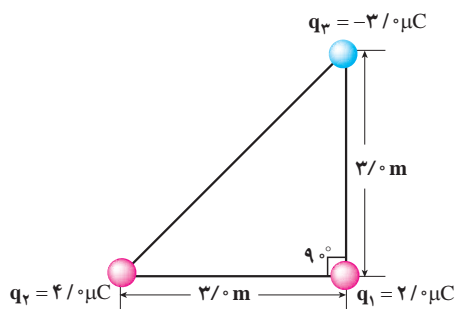
و جهت آن در جهت نیروی بزرگ‌تر ( $\vec{F}_{23}$ ) است. اگر محور x را روی خط واصل سه بار و جهت مثبت آن را به

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

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

## تمرین ۱-۲

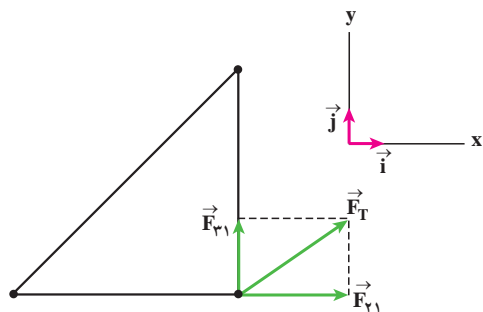
در مثال ۳-۲، نیروی وارد بر بار  $q_2$  را به دست آورید.



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

**پاسخ:** نیروی بین بارهای  $q_2$  و  $q_1$  رانشی و نیروی بین بارهای  $q_3$  و  $q_1$  ریابشی است. با استفاده از رابطه ۲-۱ داریم:

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



با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده،  $\vec{F}_{r_{21}}$  در جهت مثبت محور  $x$  است و بنابراین:

$$\vec{F}_{r_{21}} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i}$$

به همین ترتیب، برای نیروی بین بارهای  $q_3$  و  $q_1$  داریم:

$$F_{r_{31}} = k \frac{|q_3||q_1|}{r_{31}^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(3 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

با توجه به دستگاه مختصات انتخاب شده  $\vec{F}_{r_{31}}$  در جهت مثبت محور  $y$  است و بنابراین،

$$\vec{F}_{r_{31}} = (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

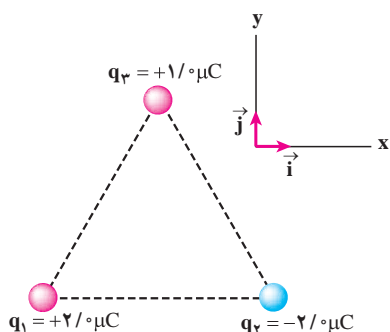
برایند نیروهای الکتریکی وارد بر بار  $q_1$  برابر است با

$$\vec{F}_T = \vec{F}_{r_{21}} + \vec{F}_{r_{31}} = (8 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (6 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

و بزرگی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

## مثال ۲-۵



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

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

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

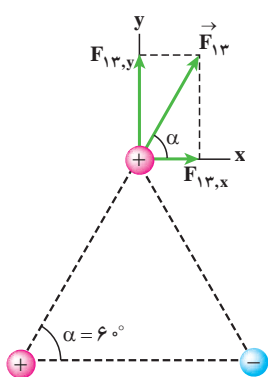
پ) برآیند نیروهای وارد بر بار  $q_3$  را به دست آورید.

پاسخ:

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

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

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



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

به طوری که:

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

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

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

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

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم:

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

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

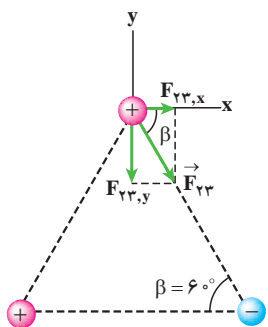
$$F_{23,x} = F_{23} \cos \beta = (18 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 9 \times 10^{-3} \text{ N}$$

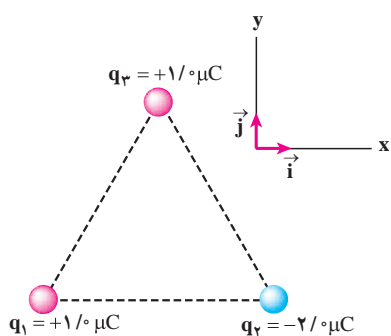
$$F_{23,y} = -F_{23} \sin \beta = -(18 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = -15.6 \times 10^{-3} \text{ N}$$

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

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

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





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

الف) نیروی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند ( $\vec{F}_{12}$ ) را برحسب بردارهای یکه  $\vec{i}$  و  $\vec{j}$  دستگاه مختصات نشان داده شده در شکل بنویسید.

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

پ) برآیند نیروهای وارد بر بار  $q_2$  را به دست آورید.

ت) بزرگی بردار برآیند نیروهای وارد بر بار  $q_2$  چقدر است و این بردار

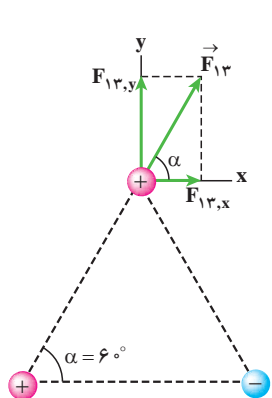
چه زاویه‌ای با محور  $x$  می‌سازد؟

پاسخ:

الف) بزرگی نیروی که بار  $q_1$  بر بار  $q_2$  وارد می‌کند را با استفاده از قانون کولن به دست می‌آوریم:

$$F_{12} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r_{12}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2}$$

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



همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نیروی  $\vec{F}_{12}$  دارای مؤلفه‌های  $x$  و  $y$  است،

به طوری که:

$$F_{12,x} = F_{12} \cos \alpha = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \cos 60^\circ = 2/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{12,y} = F_{12} \sin \alpha = (4/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \sin 60^\circ = 3/5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

بنابراین، نیروی  $\vec{F}_{12}$  برحسب بردارهای یکه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F}_{12} = (2/0 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{i} + (3/5 \times 10^{-3} \text{ N}) \vec{j}$$

ب) مانند قسمت الف می‌توانیم بنویسیم:

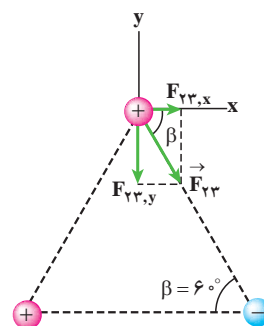
$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2} = (9/0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2/0 \times 10^{-6} \text{ C})(1/0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1/5 \text{ m})^2}$$

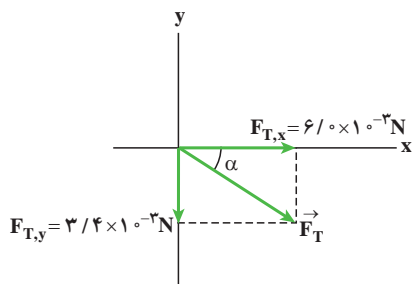
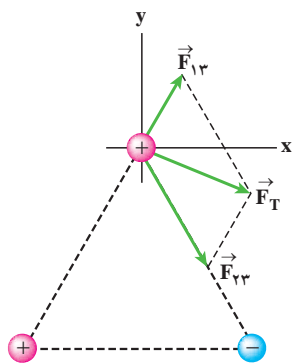
$$= 8/0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

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

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

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





پ) برابند نیروهای وارد بر بار  $q_2$  برابر است با

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

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

ت) بردار نیروی برابند  $\vec{F}_T$  که در شکل قبل دیدیم را جداگانه همراه با محورهای  $x$  و  $y$  در شکل روبه‌رو به مقیاس رسم می‌کنیم. در این شکل  $\alpha$  زاویه‌ای است که  $\vec{F}_T$  با محور  $x$  می‌سازد.

نخست با استفاده از قضیه فیثاغورس بزرگی  $\vec{F}_T$  را به دست می‌آوریم

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

و با استفاده از شکل، می‌توانیم تانژانت زاویه  $\alpha$  را محاسبه کنیم:

$$\tan \alpha = \frac{F_{T,y}}{F_{T,x}} = \frac{-3/4 \times 10^{-3} \text{ N}}{6/0 \times 10^{-3} \text{ N}} = -0/57$$

با توجه به مقدار به دست آمده برای  $\tan \alpha$ ، زاویه  $\alpha$  می‌تواند  $3^\circ$  یا  $15^\circ +$  باشد. در چنین مواردی با توجه به شکل مسئله مقدار درست زاویه  $\alpha$  را می‌یابیم. در این مسئله با توجه به شکل  $\alpha = -3^\circ$  می‌شود.

## تمرین ۲-۲

برابند نیروهای وارد بر بار  $q_1$  در مثال ۲-۶ را برحسب بردارهای یکه محاسبه کنید.

توجه کنید که رابطه ۲-۱ برای محاسبه نیروی الکتریکی بین دو ذره باردار به کار می‌رود. محاسبه نیروی الکتریکی بین دو جسم باردار که نتوان آنها را ذره فرض کرد (مانند دو کره باردار بزرگ که در فاصله کمی از هم قرار دارند) به چگونگی آرایش (یا توزیع) بار در دو جسم بستگی دارد و محاسبه آن نیازمند ریاضیات پیشرفته‌تری است. اگر فاصله جسم باردار از ذره باردار (یا جسم باردار دیگر) آن قدر زیاد باشد که ابعاد جسم در مقایسه با فاصله بین آنها قابل چشم‌پوشی باشد، می‌توان جسم را مانند یک ذره باردار در نظر گرفت و از رابطه ۲-۱ برای محاسبه نیروی الکتریکی استفاده کرد.

## ۲-۲- میدان الکتریکی

در بخش ۱-۲ دیدیم که دوبار الکتریکی  $q_1$  و  $q_2$  که در فاصله‌ای از یکدیگر قرار دارند، بر هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. ولی این پرسش مطرح می‌شود که بار  $q_2$  چطور حضور بار  $q_1$  را حس می‌کند. به عبارت دیگر این دو بار الکتریکی که در تماس با هم نیستند، چگونه می‌توانند بر یکدیگر نیرو وارد کنند؟ چطور ممکن است چنین کنش از راه دوری وجود داشته باشد، بی‌آنکه بارها هیچ تماسی با یکدیگر داشته باشند؟ به این پرسش این طور می‌توان پاسخ گفت که بار  $q_1$  خاصیتی در فضای پیرامون خود ایجاد می‌کند که به آن اصطلاحاً **میدان الکتریکی** بار  $q_1$  گفته می‌شود. در واقع اگر بار  $q_2$  را در هر نقطه‌ای از فضای پیرامون بار  $q_1$  قرار دهیم، تحت تأثیر میدان الکتریکی‌ای قرار می‌گیرد که بار  $q_1$  پیش‌تر در آن نقطه ایجاد کرده است. بنابراین، بار  $q_1$ ، نه با تماس با بار  $q_2$  بلکه به وسیله میدان الکتریکی خودش بر بار  $q_2$  نیرو وارد می‌کند.

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

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (۳-۲)$$

بنابه تعریف میدان الکتریکی (رابطه ۳-۲)، میدان الکتریکی کمیته برداری است که بزرگی آن برابر  $E = \frac{F}{q_0}$  و جهت آن همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون (بار کوچک و مثبت) است. در رابطه ۳-۲ یکای نیرو ( $\vec{F}$ )، نیوتون (N)، و یکای بار آزمون ( $q_0$ )، کولن (C) است و در نتیجه یکای میدان الکتریکی ( $\vec{E}$ )، نیوتون بر کولن (N/C) می‌شود.

## مثال ۷-۲

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

**پاسخ:** از رابطه ۳-۲ می‌توان بزرگی میدان الکتریکی در نقطه مورد نظر را محاسبه کرد.

$$E = \frac{F}{q_0} \\ = \frac{5/0 \times 10^{-3} \text{ N}}{20 \times 10^{-9} \text{ C}} = 2/5 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

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

## ۲-۳- میدان الکتریکی حاصل از یک ذره باردار

می خواهیم میدان الکتریکی ناشی از ذره‌ای با بار  $q$  را در نقطه  $A$  که به فاصله  $r$  از بار  $q$  قرار دارد، محاسبه کنیم (شکل ۲-۵). برای این محاسبه از رابطه ۲-۳ ( $\vec{E} = \vec{F}/q_0$ ) استفاده می‌کنیم. اگر بار آزمون  $q_0$  در نقطه  $A$  قرار گیرد، بار  $q$  به آن نیروی  $\vec{F}$  وارد می‌کند. با استفاده از قانون کولن، بزرگی نیروی  $\vec{F}$  را محاسبه می‌کنیم و با جای گذاری در رابطه ( $\vec{E} = \vec{F}/q_0$ )، بزرگی میدان الکتریکی بار  $q$  را در نقطه  $A$  به دست می‌آوریم.

شکل ۲-۵ می‌خواهیم میدان حاصل از بار  $q$  را در نقطه  $A$  محاسبه کنیم.



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

در نتیجه:

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad (۲-۴)$$

رابطه ۲-۴ عامل‌های مؤثر بر بزرگی میدان الکتریکی حاصل از ذره‌ای با بار  $q$  را مشخص می‌کند. طبق این رابطه، میدان با اندازه بار  $q$  نسبت مستقیم و با مجذور فاصله از آن، نسبت وارون دارد. همان‌طور که پیش‌تر دیدیم جهت بردار میدان الکتریکی  $\vec{E}$  در نقطه  $A$ ، در همان جهت نیروی وارد بر بار آزمون است که به‌طور ذهنی در نقطه  $A$  می‌گذاریم.

## مثال ۲-۸

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

پاسخ: با استفاده از رابطه ۲-۴ اندازه میدان را در نقطه‌های مورد نظر، به دست می‌آوریم:

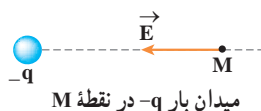
$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad \text{الف)}$$

$$E_1 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \text{ m})^2} = 4.5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

ب)

$$E_2 = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \text{ m})^2} = 4.5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

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





در بخش ۱-۲ دیدیم اگر چند بار نقطه‌ای مانند  $q_1, q_2, \dots$  داشته باشیم برآیند نیروهای الکتریکی حاصل از این بارها بر بار آزمون  $q_0$  با استفاده از اصل برهم نهی نیروهای کولنی از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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

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

$$\frac{\vec{F}_T}{q_0} = \frac{\vec{F}_1}{q_0} + \frac{\vec{F}_2}{q_0} + \dots$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (۵-۲)$$

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

### مثال ۲-۴

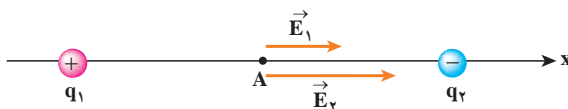
دو ذره با بارهای  $q_1 = 4 \mu\text{C}$ ،  $q_2 = -6 \mu\text{C}$  در فاصله  $8 \text{ m}$  از یکدیگر ثابت شده‌اند. بزرگی میدان الکتریکی را در نقطه‌های زیر به دست آورید:

الف) در وسط خط واصل دو ذره،

ب) در نقطه‌ای به فاصله  $8 \text{ m}$  از بار  $q_1$  و  $16 \text{ m}$  از بار  $q_2$  و روی خط واصل دوبار.

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

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



با استفاده از اصل برهم نهی میدان‌های الکتریکی داریم:

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

مقادیر  $E_1$  و  $E_2$  را با استفاده از رابطه ۴-۲ ( $E = k|q|/r^2$ ) به دست می‌آوریم:

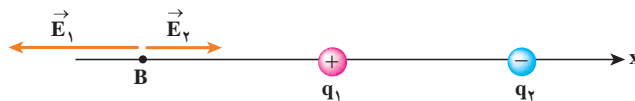
$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 2.25 \times 10^3 \text{ N/C}$$

$$E_r = k \frac{|q_r|}{r_r^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4 \text{ m})^2} = 3/4 \times 10^3 \text{ N/C}$$

بنابراین:

$$\vec{E}_A = (2/2 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} + (3/4 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i} = (5/6 \times 10^3 \text{ N/C}) \vec{i}$$

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



با استفاده از اصل برهم نهی میدان‌های الکتریکی داریم:

$$\vec{E}_B = \vec{E}_1 + \vec{E}_r = -E_1 \vec{i} + E_r \vec{i}$$

که در آن  $E_1$  و  $E_r$  برابرند با

$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{4 \times 10^{-6}}{(8 \text{ m})^2} = 5/6 \times 10^2 \text{ N/C}$$

$$E_r = k \frac{|q_r|}{r_r^2} = (9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2) \frac{6 \times 10^{-6} \text{ C}}{(16 \text{ m})^2} = 2/1 \times 10^2 \text{ N/C}$$

بنابراین:

$$\vec{E}_B = (-5/6 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i} + (2/1 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i} = (-3/5 \times 10^2 \text{ N/C}) \vec{i}$$

### مثال ۱-۲

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

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

$$r_1 = r_2 = \sqrt{a^2 + x^2} = \sqrt{(16 \text{ cm})^2 + (6 \text{ cm})^2} = 10 \text{ cm}$$

با استفاده از رابطه ۲-۲ داریم:

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

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

در نتیجه برای مؤلفه‌های میدان در نقطه M داریم:

## الکتروستاتیک ساکن

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

$$\cos \alpha = \frac{x}{r_1} = \frac{6 / \text{cm}}{10 \text{ cm}} = 0.6$$

$$E_{1x} = -E_{2x} = (4 / 5 \times 10^4 \text{ N/C})(0.6) = 2.7 \times 10^4 \text{ N/C}$$

و

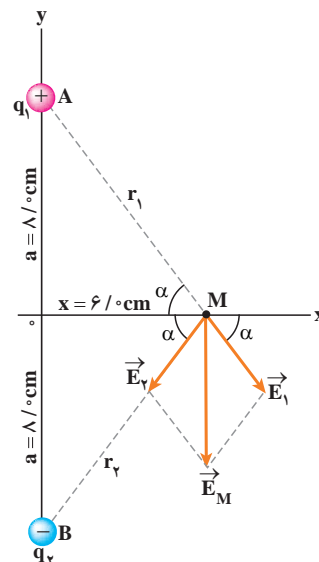
$$E_{1y} = E_{2y} = -E_1 \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{a}{r_1} = \frac{8 / \text{cm}}{10 \text{ cm}} = 0.8$$

$$E_{1y} = E_{2y} = -(4 / 5 \times 10^4 \text{ N/C})(0.8) = -3.2 \times 10^4 \text{ N/C}$$

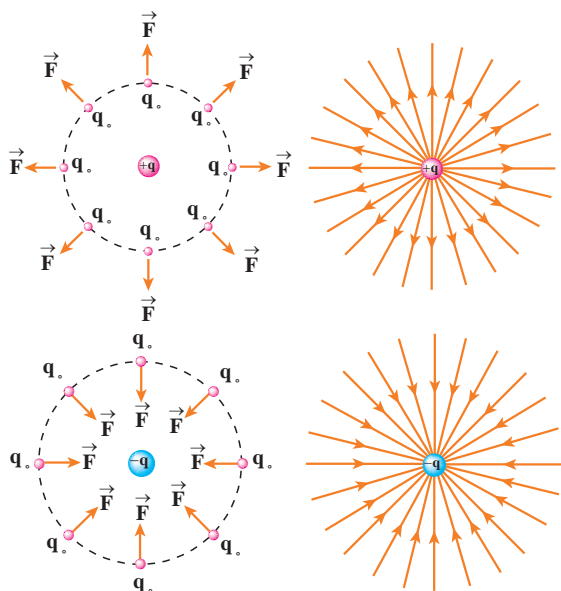
با توجه به اینکه  $E_{1x} = -E_{2x}$  است، مؤلفه  $x$  میدان الکتریکی برآیند صفر است، و با توجه به اینکه  $E_{1y} = E_{2y}$  است، مؤلفه  $y$  میدان الکتریکی برآیند  $2E_{1y}$  است و داریم:

$$\vec{E} = 2E_{1y} \vec{j} = 2 \times (-3.2 \times 10^4 \text{ N/C}) \vec{j} = (-6.4 \times 10^4 \text{ N/C}) \vec{j}$$



## تمرین ۳-۲

میدان الکتریکی حاصل از دو قطبی مثال ۲-۱ را در نقطه‌ای روی محور دو قطبی (محور  $y$ ) و به فاصله  $16 \text{ cm}$  از مرکز دو قطبی (نقطه مبدأ) به دست آورید.



## ۲-۴- خطوط میدان الکتریکی

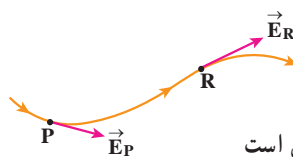
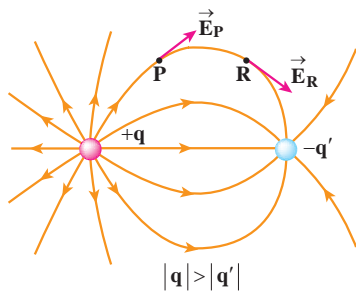
پیش از این دیدیم بارهای الکتریکی در فضای پیرامون خود میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند. برای مجسم کردن میدان الکتریکی در فضای اطراف اجسام دارای بار، از خط‌های جهت‌داری موسوم به خطوط میدان الکتریکی استفاده می‌کنیم.

این خط‌ها دارای ویژگی‌های زیرند:

۱- خط‌های میدان در هر نقطه، هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون (مثبت) واقع در آن نقطه‌اند. در نتیجه، جهت این خط‌ها برای بار مثبت روبه خارج و برای بار منفی روبه داخل است. (شکل ۲-۶)

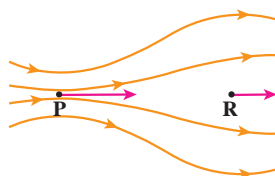
شکل ۲-۶ خط‌های میدان الکتریکی در هر نقطه هم جهت با نیروی وارد بر بار آزمون مثبت واقع در آن نقطه است.

۲- میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷ میدان در هر نقطه، برداری است مماس بر خط میدانی که از آن نقطه می‌گذرد و با آن خط میدان هم جهت است.

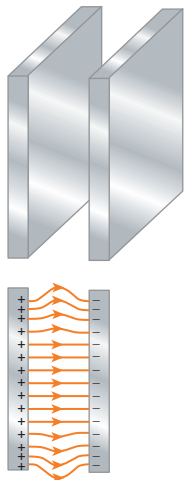
۳- در هر ناحیه که میدان قوی تر باشد، خط‌های میدان به یکدیگر نزدیک تر و فشرده ترند (شکل ۲-۸).



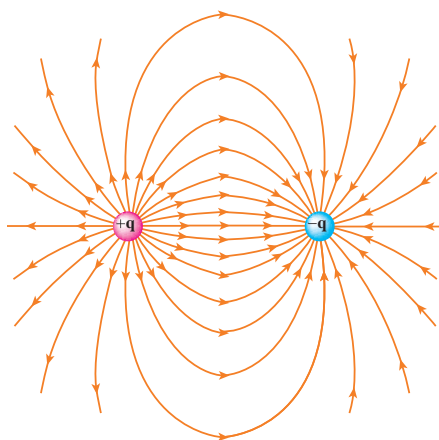
شکل ۲-۸ در نقطه P خطوط میدان به یکدیگر نزدیک ترند، و بنابراین  $E_P > E_R$  است.

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

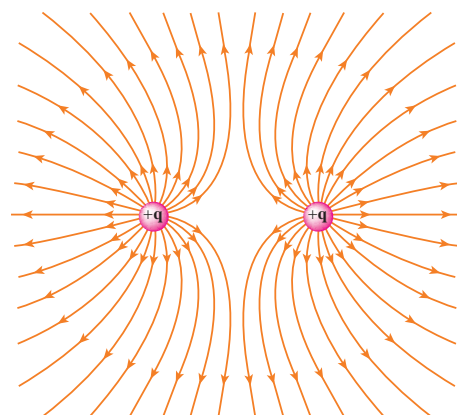
در شکل ۲-۹ خطوط میدان الکتریکی را در اطراف چند جسم باردار الکتریکی مشاهده می‌کنید.



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



(ب) دو بار الکتریکی ناهمنام و هم اندازه



(الف) دو بار الکتریکی مثبت و هم اندازه

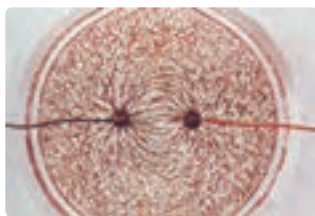
شکل ۲-۹ میدان الکتریکی در اطراف چند جسم باردار

## آزمایش ۱-۲

## مشاهده طرح خطوط میدان الکتریکی

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

## شرح آزمایش:



(الف)



(ب)

۱- روغن را در ظرف شیشه‌ای یا پلاستیکی بریزید.

۲- دو الکتروود را به صورت دو گلوله فلزی درآورید و درون روغن قرار دهید. سپس

الکترودها را با سیم‌های رابط به پایانه‌های خروجی مولد و اندوگراف وصل کنید.

۳- مولد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای بین دو الکتروود بپاشید.

۴- اکنون به سمت گیری دانه‌های بذر در فضای بین دو الکتروود توجه کنید (شکل الف)

و با استفاده از آن طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکتروود رسم کنید.

۵- این بار دو الکتروود را به صورت دو صفحه موازی درون ظرف روغن قرار دهید

و آنها را با سیم‌های رابط به پایانه‌های خروجی مولد و اندوگراف وصل کنید.

۶- مولد را روشن کنید و سپس بذر چمن را در فضای میان دو الکتروود بپاشید.

۷- دوباره به سمت گیری دانه‌های بذر در فضای میان دو الکتروود توجه کنید (شکل ب)

و با استفاده از آن، طرح خطوط میدان الکتریکی را در فضای میان دو الکتروود رسم کنید.

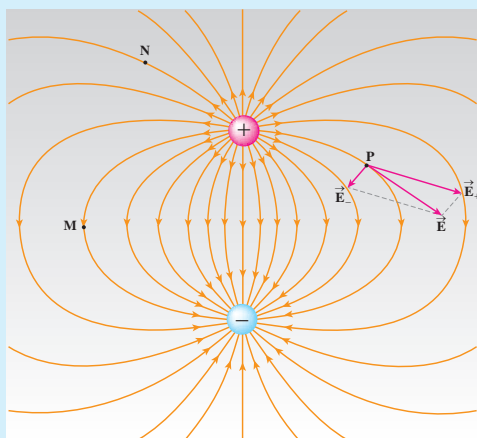
۸- برای آنکه بتوانید طرح خطوط میدان را به صورت سه‌بُعدی ببینید، به جای

بذر چمن از بریده‌های کوچک نخ استفاده کنید و آن را پیش از انجام آزمایش در ظرف

شیشه‌ای شفاف با عمق مناسب که حاوی روغن است کاملاً به هم بزنید و سپس الکترودها را مطابق آزمایش‌های قبل به مولد

و اندوگراف متصل کنید.

## فعالیت ۱-۲



۱- در شکل ۲-۹ پ میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه و

دور از لبه‌های آن، یکنواخت است. با توجه به تعریف میدان الکتریکی

و ویژگی‌های خط‌های میدان، برای میدان الکتریکی یکنواخت تعریفی

بیان کنید.

۲- در شکل روبه‌رو میدان الکتریکی برآیند یک دو قطبی

الکتریکی در نقطه P رسم شده است. میدان برآیند در نقطه‌های M و

N را به دقت رسم کنید.

## ۲-۵- نیروی وارد بر بار الکتریکی در میدان الکتریکی

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

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (۲-۶)$$

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

### مثال ۲-۱۱

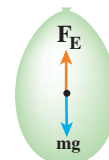
در بادکنکی به جرم  $g = ۱/۰$  بار الکتریکی  $۲۰۰ \text{ nC}$  ایجاد می‌کنیم و آن را در یک میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهیم، به طوری که نیروی وزن بادکنک با نیروی الکتریکی وارد بر آن موازنه شود. بزرگی و جهت این میدان الکتریکی را تعیین کنید. ( $g = ۹/۸۰ \text{ m/s}^2$ )

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

$$F_E = mg$$

$$|q|E = mg$$

$$\Rightarrow E = \frac{mg}{|q|} = \frac{(۱/۰ \times ۱۰^{-۳} \text{ kg})(۹/۸۰ \text{ N/kg})}{۲۰۰ \times ۱۰^{-۹} \text{ C}} = ۴/۹۰ \times ۱۰^۵ \text{ N/C}$$

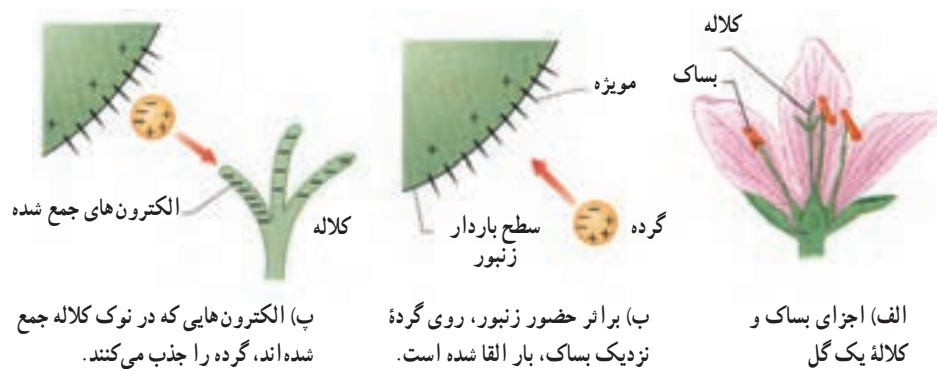


با توجه به رابطه  $\vec{F} = q\vec{E}$  و منفی بودن  $q$ ، جهت میدان الکتریکی در خلاف جهت نیروی الکتریکی و بنابراین، مستقیماً روبه پایین است.

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

مثبت می‌شوند و وقتی به گرده بدون باری روی بساک یک گل (شکل ۲-۱ الف) می‌رسند که از لحاظ الکتریکی خنثی است، میدان الکتریکی آنها روی گرده بارهای مثبت و منفی القا می‌کند، به طوری که آن سمت گرده که به طرف زنبر است دارای بار منفی می‌شود و به این ترتیب گرده به سوی زنبر کشیده می‌شود (شکل ۲-۱ ب). گرده‌ها روی موئدهای ریز زنبر قرار می‌گیرند و سپس وقتی زنبر در اطراف کلالة گل دیگری پرواز می‌کند، بارهایی منفی را بر روی کلالة القا می‌کند. هرگاه نیروی الکتریکی وارد از کلالة بزرگ‌تر از نیروی الکتریکی وارد از زنبر بر گرده باشد، گرده به سمت کلالة گل کشیده می‌شود (شکل ۲-۱ پ) و گرده افشانی صورت می‌پذیرد.

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



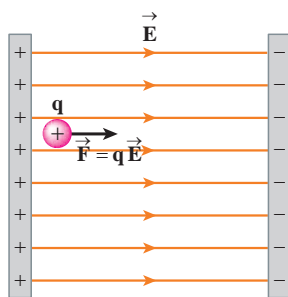
شکل ۱-۲

## فعالیت ۲-۲

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

## ۶-۲- انرژی پتانسیل الکتریکی

شکل ۲-۱ // ذره با بار  $+q_1$  در میدان الکتریکی فضای اطراف بار  $+q_2$  رها شده است.



شکل ۲-۲ // بار الکتریکی  $+q$  از مجاورت صفحه مثبت رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.



شکل ۲-۳ // جسم از نزدیکی سطح زمین رها می‌شود و به تدریج بر انرژی جنبشی آن افزوده می‌شود.

آرایش دو ذره باردار الکتریکی شکل ۲-۱ را در نظر بگیرید که در آن، بار  $+q_1$  در جای خود ثابت و بار  $+q_2$  در فضای اطراف آن رها شده است. می‌دانیم بار  $+q_2$  بر اثر میدان الکتریکی حاصل از بار  $+q_1$  از آن رانده و دارای انرژی جنبشی می‌شود. به نظر شما این انرژی جنبشی از کجا آمده است؟ طبق قانون پایستگی انرژی، انرژی جنبشی نمی‌تواند خود به خود به وجود آمده باشد. این انرژی، ناشی از انرژی پتانسیلی است که به نیروی الکتریکی بین دو ذره آرایش شکل ۲-۱ وابسته است و به آن **انرژی پتانسیل الکتریکی** می‌گوییم. برای آنکه به توصیفی کمی از این انرژی دست یابیم، میدان الکتریکی یکنواختی را مطابق شکل ۲-۲ در نظر می‌گیریم که در فضای میان دو صفحه باردار برقرار شده است. اگر بار الکتریکی  $+q$  را از مجاورت صفحه مثبت رها کنیم، به طرف صفحه منفی شروع به حرکت می‌کند و به تدریج سرعت و انرژی جنبشی آن افزایش می‌یابد. این وضعیت شبیه چیزی است که در کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه دیدیم. در آنجا نیز مشاهده کردیم که وقتی جسمی به جرم  $m$  از ارتفاع  $h$  رها می‌شود، جسم روبه پایین حرکت کرده و انرژی جنبشی آن بر اثر کاهش انرژی پتانسیل گرانشی به تدریج افزایش می‌یابد (شکل ۲-۳). همچنین دیدیم تغییر انرژی پتانسیل گرانشی برابر با منفی کار نیروی گرانشی است.

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

$$\Delta U_E = -W_E \quad (2-7)$$

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

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

ذره‌ای  $q$  را در میدان الکتریکی یکنواخت  $\vec{E}$  در نظر بگیرید که مطابق شکل ۲-۱۴ جابه‌جایی  $\vec{d}$  را انجام داده است. کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

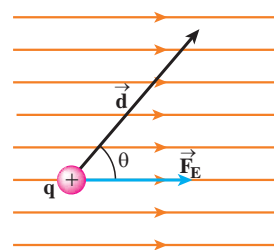
با توجه به اینکه  $\vec{F}_E = q\vec{E}$  است، این رابطه به صورت زیر می‌آید:

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

اکنون با استفاده از رابطه ۲-۷ تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار ذره‌ای  $q$  چنین محاسبه می‌شود:

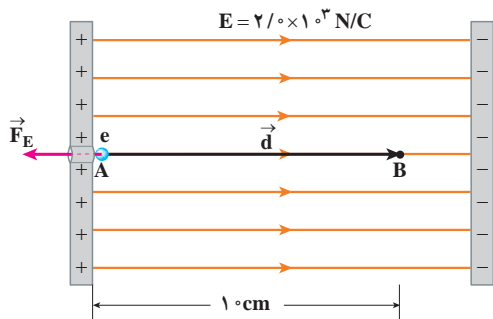
$$\Delta U_E = -W_E = -|q| E d \cos\theta \quad (۲-۸)$$

که در آن،  $\theta$  زاویه بین نیروی  $\vec{F}_E$  و جابه‌جایی  $\vec{d}$  است. در این رابطه، بار الکتریکی ( $q$ ) برحسب کولن (C)، بزرگی میدان الکتریکی ( $E$ ) برحسب نیوتون بر کولن (N/C)، اندازه جابه‌جایی ( $d$ ) برحسب متر (m) و تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی ( $\Delta U_E$ ) برحسب ژول (J) است. توجه کنید که رابطه ۲-۸ چه برای بار ذره‌ای مثبت و چه برای بار ذره‌ای منفی برقرار است. به این منظور، مثال زیر را ملاحظه کنید.



شکل ۲-۱۴ نیروی الکتریکی وارد بر بار  $+q$  در حین جابه‌جایی  $\vec{d}$  درون میدان الکتریکی یکنواخت.

### مثال ۲-۱۲



در میدان الکتریکی یکنواخت نشان داده شده در شکل، الکترونی از نقطه A با سرعت  $v$  پرتاب شده است. الکترون سرانجام در نقطه B متوقف می‌شود. بار الکترون  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  و جرم آن  $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$  است.

الف) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون در این جابه‌جایی

چه مقدار است؟

ب) سرعت پرتاب الکترون را پیدا کنید.

پاسخ:

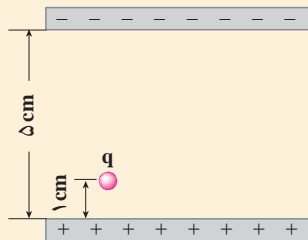
الف) با توجه به رابطه ۲-۸ داریم:

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

ب) طبق قضیه کار و انرژی می‌توان نوشت:

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





مطابق شکل، یک غبار که دارای بار الکتریکی  $۱۰^{-۱۵} \times ۱۰^{-۸} \text{C}$  و جرم  $۱۰^{-۸} \times ۱۰^{-۸} \text{g}$  است در میدان الکتریکی یکنواخت  $۱۰^۵ \text{N/C}$  بین دو صفحه افقی قرار گرفته است. اگر غبار در ابتدا ساکن و به فاصله  $۱ \text{ cm}$  از صفحه پایینی قرار داشته باشد، در چه مدتی به صفحه بالایی می‌رسد؟

### ۲-۷- پتانسیل الکتریکی

در رابطه ۲-۸ دیدیم که تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی برای هر ذره باردار (چه مثبت و چه منفی) علاوه بر بزرگی میدان الکتریکی و جابه‌جایی ذره، به بار الکتریکی آن نیز بستگی دارد؛ مثلاً با دوبرابر شدن بار ذره، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن نیز دوبرابر می‌شود. بنابراین، نسبت تغییر انرژی پتانسیل به بار ذره، مستقل از نوع و اندازه بار الکتریکی است. به این نسبت، **اختلاف پتانسیل الکتریکی** دو نقطه‌ای می‌گوییم که ذره میان آنها جابه‌جا شده است و آن را با  $\Delta V$  نمایش می‌دهیم:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} \quad (۲-۹)$$

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

توجه کنید که در این رابطه، علامت q در نظر گرفته می‌شود. همچنین دقت کنید که هر چند این رابطه برای میدان الکتریکی یکنواخت به‌دست آمده است، اما برای تمامی میدان‌های الکتروستاتیکی نیز برقرار است. با استفاده از روابط ۲-۸ و ۲-۹ می‌توان نشان داد در میدان الکتریکی یکنواخت شکل ۲-۱۵ داریم:

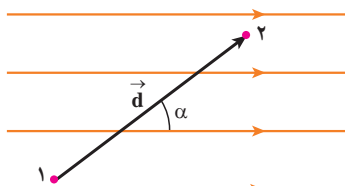
$$\Delta V = V_2 - V_1 = -E d \cos \alpha \quad (۲-۱۰)$$

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

### فعالیت ۲-۳

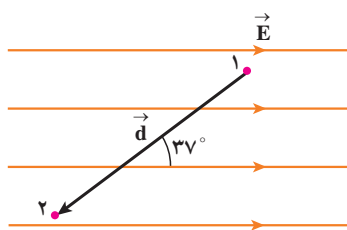
الف) درستی رابطه ۲-۱۰ را یک بار برای بار مثبت و یک بار برای بار منفی نشان دهید.  
ب) نشان دهید یک‌گانه‌های «نیوتون بر کولن» و «ولت بر متر» که برای میدان الکتریکی به کار می‌روند، معادل یکدیگرند.

از فعالیت ۲-۳ الف درمی‌یابیم با حرکت در سوی خطوط میدان، از پتانسیل الکتریکی بیشتر به پتانسیل الکتریکی کمتر رفته‌ایم و بالعکس.



شکل ۲-۱۵ در این شکل  $\alpha$  زاویه بین میدان الکتریکی و جابه‌جایی است.

## مثال ۲-۱۳



در میدان الکتریکی یکنواخت شکل مقابل که بزرگی آن  $E = 5/0 \times 10^5 \text{ V/m}$  است: (الف) اختلاف پتانسیل الکتریکی بین نقاط ۱ و ۲ را بیابید.

(ب) اگر بار نقطه‌ای  $q = +2/0 \text{ nC}$  از نقطه ۱ به نقطه ۲ جابه‌جا شود، تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی آن و کار انجام شده توسط نیروی الکتریکی را به دست آورید.  $d = 10 \text{ cm}$  و  $(\cos 37^\circ = 0/80)$

پاسخ: (الف) با استفاده از رابطه ۲-۱۰ داریم:

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

دقت کنید که زاویه بین خطوط میدان و جابه‌جایی و برابر با  $\alpha = 180^\circ - 37^\circ$  است؛ در نتیجه داریم:

$$\Delta V = -(5/0 \times 10^5 \text{ V/m})(10 \times 10^{-2} \text{ m})(-0/80) = 4/0 \times 10^4 \text{ V}$$

(ب) با استفاده از رابطه ۲-۹ داریم:

$$\Delta U = q\Delta V = (2/0 \times 10^{-9} \text{ C})(4/0 \times 10^4 \text{ V}) = 8/0 \times 10^{-5} \text{ J} = 80 \mu\text{J}$$

و از آنجا

$$W_E = -\Delta U = -80 \mu\text{J}$$

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

$$V = \frac{U}{q} \quad (2-11)$$

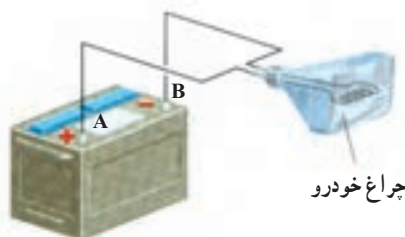
شما با انواع باتری‌ها که در وسیله‌های الکتریکی نظیر چراغ قوه یا رادیو از آنها استفاده می‌شود و نیز با باتری خودرو آشنایی دارید. باتری‌ها معمولاً ۱/۵ ولتی، ۴/۵ ولتی یا ۹ ولتی اند. باتری خودروهای سواری معمولاً ۱۲ ولتی و باتری کامیون‌ها ۲۴ ولتی یا بیشترند. هر باتری دو پایانه دارد که یکی مثبت و دیگری منفی است. وقتی می‌گوییم باتری خودرو ۱۲ ولت است، یعنی اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایانه‌های منفی و مثبت آن برابر ۱۲ ولت است. اگر پتانسیل پایانه منفی را با  $V_-$  و پتانسیل پایانه مثبت را با  $V_+$  نشان دهیم، داریم:

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

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

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

## مثال ۲-۱۴



اختلاف پتانسیل الکتریکی پایانه‌های باتری خودروی نشان داده شده در شکل برابر ۱۲۷ است. اگر در مدت ۱۰ s بار الکتریکی ۵۰- کولن از پایانه منفی به پایانه مثبت باتری جابه‌جا شود، انرژی پتانسیل الکتریکی آن چقدر تغییر می‌کند؟  
پاسخ: با استفاده از رابطه ۲-۹ داریم:

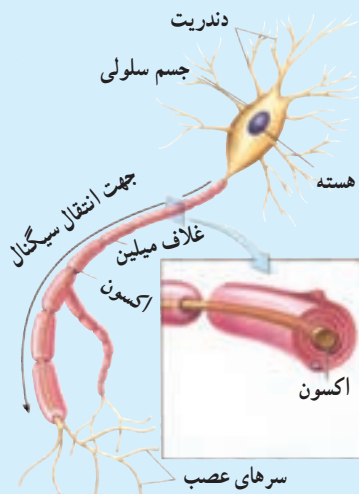
$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

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

$$= (-50C)(+127V) = -6350 J$$

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

## فعالیت ۲-۱۴



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

**کار انجام شده توسط نیروی خارجی:** فرض کنید در یک میدان الکتریکی ذره‌ای با

بار  $q$  را با اعمال نیرویی از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر جابه‌جا می‌کنیم (شکل ۲-۱۶). در حین این حرکت، نیروی خارجی ما کار خارجی  $W_{\text{خارجی}}$  را روی بار انجام می‌دهد، در حالی که نیروی الکتریکی نیز کار  $W_E$  را روی آن انجام داده است. با استفاده از قضیه کار-انرژی، تغییر انرژی جنبشی بار  $q$  چنین می‌شود:

$$\Delta K = W_{\text{خارجی}} + W_E$$

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

$$W_{\text{خارجی}} = -W_E = q \Delta V \quad (۱۲-۲)$$

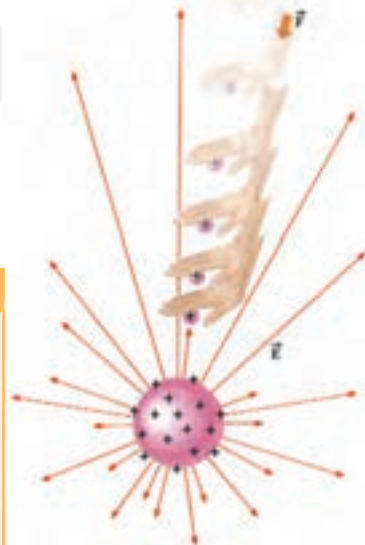
که در آن از رابطه های ۲-۷ ( $W_E = -\Delta U_E$ ) و ۲-۹ ( $\Delta U = q\Delta V$ ) استفاده کرده ایم. بسته به علامت و بزرگی  $q$  و  $\Delta V$ ، کار خارجی  $W_{\text{خارجی}}$  می تواند مثبت، منفی یا صفر باشد.

### تمرین ۲-۷

در شکل ۲-۱۶

الف) کار نیروی دست، مثبت است یا منفی؟

ب) آیا بار مثبت به نقطه ای با پتانسیل بیشتر حرکت کرده است یا به نقطه ای با پتانسیل کمتر؟ توضیح دهید.



شکل ۲-۱۶ نیروی دست، بار  $q$  را در خلاف جهت میدان الکتریکی جابه جا می کند.

## ۲-۸- توزیع و القای بار در رساناها

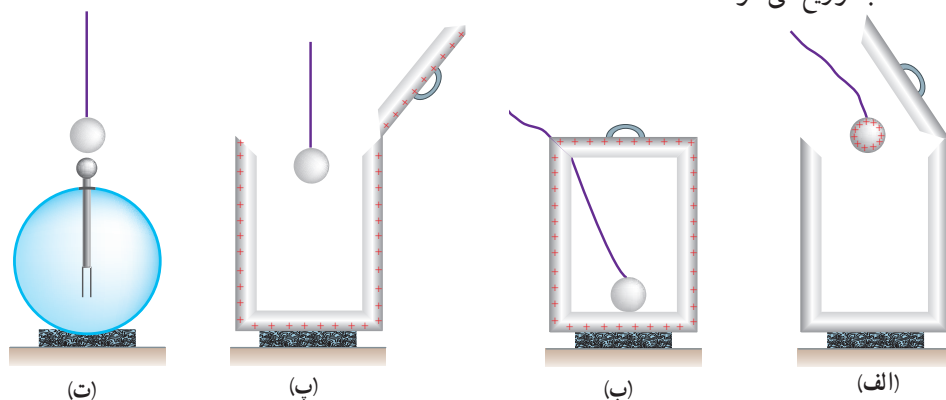
جسم رسانایی را در نظر بگیرید که توسط عایقی از محیط اطراف خود جدا شده است (به این رسانا اصطلاحاً **رسانای منزوی** گفته می شود). اگر باری اضافی به این جسم رسانا داده شود، و یا آن جسم در یک میدان الکتریکی خارجی قرار گیرد پس از مدت زمان کوتاهی (از مرتبه  $10^{-9}$  s) میدان الکتریکی داخل رسانا صفر می شود.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

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

**آزمایش فارادی:** ظرف رسانایی با درپوش فلزی را در نظر بگیرید که روی پایه نارسنایی قرار دارد و روی درپوش آن دسته ای عایق نصب شده است. ابتدا ظرف بدون بار است. یک گوی فلزی را که از نخ عایق آویزان است باردار و سپس وارد ظرف می کنیم (شکل ۲-۱۷ الف) آنگاه درپوش فلزی را می بندیم. اکنون گوی را با کف ظرف تماس می دهیم (شکل ۲-۱۷ ب) سپس گوی را کمی بالا می کشیم و بعد درپوش فلزی را با دسته عایقش برمی داریم (شکل ۲-۱۷ پ). پس از خارج کردن گوی فلزی از ظرف، آن را به کلاهک الکتروسکوپ نزدیک می کنیم. مشاهده می شود عقربه الکتروسکوپ تکان نمی خورد (شکل ۲-۱۷ ت).

از این آزمایش نتیجه می گیریم که **بار اضافی یک رسانای منزوی روی سطح خارجی آن توزیع می شود**. به عبارتی، وقتی در شکل ۲-۱۷ ب گوی با کف ظرف تماس پیدا می کند مجموعه گوی و ظرف، رسانایی را تشکیل می دهند که در سطح خارجی این جسم رسانای مرکب بار مشابه شکل

۱۷-۲- ب توزیع می شود.



شکل ۱۷-۲ شرحی تصویری از آزمایش فارادی

## فعالیت ۲-۵



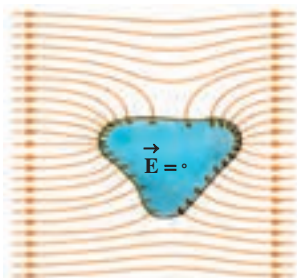
الف) قفس یا حفاظ فارادی، مبتنی بر آزمایش فارادی است. در مورد آن و کاربردهایش تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

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

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

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

در یک میدان الکتریکی خارجی قرار داده شود الکترون‌های آزاد رسانا طوری روی سطح خارجی آن توزیع می‌شوند که اثر میدان خارجی را درون رسانا خنثی کنند و میدان خالص درون رسانا صفر شود. (شکل ۱۸-۲)

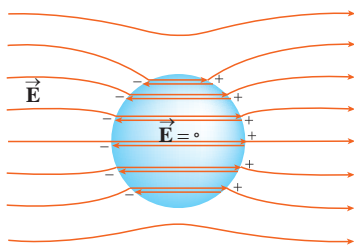


## میدان و پتانسیل الکتریکی در داخل و روی سطح رسانای منزوی: در هر دو مورد الف

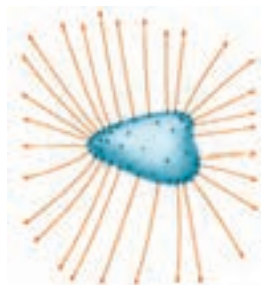
و ب میدان الکتریکی داخل رسانا پس از مدتی برابر صفر می‌شود؛ زیرا در غیر این صورت، این میدان باید نیروهایی بر الکترون‌های آزاد رسانا وارد کند و در نتیجه جریانی در داخل رسانا ایجاد شود؛ یعنی بارها از جایی به جای دیگر انتقال یابند. ولی چنین جریانی داخل یک رسانا وجود ندارد، که این بدین معناست که بارها در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

افزون بر این، اگر روی سطح رسانا که در تعادل الکترواستاتیکی است میدان الکتریکی وجود داشته باشد، این میدان باید عمود بر سطح رسانا باشد؛ چرا که در غیر این صورت میدان مؤلفه‌ای مماس بر سطح رسانا خواهد داشت و این مؤلفه باعث حرکت الکترون‌های آزاد بر سطح رسانا می‌گردد که این در تناقض با شرط تعادل الکترواستاتیکی است (شکل‌های ۱۹-۲- الف و ب).

شکل ۱۸-۲ یک رسانای بدون بار که در یک میدان الکتریکی خارجی قرار گرفته است. الکترون‌های آزاد خود را طوری در رسانا پخش کرده‌اند که میدان الکتریکی خالص داخل رسانا صفر شود.



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



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

شکل ۲-۱۹

چون میدان درون رسانایی که در تعادل الکتروستاتیکی است، برابر صفر است و میدان روی سطح رسانا عمود بر این سطح است، کار نیروی الکتریکی در هر جابه‌جایی بار در داخل و روی سطح رسانا صفر است و در نتیجه همه نقاط داخل و روی سطح رسانا، پتانسیل یکسانی دارند. به عبارتی دیگر:

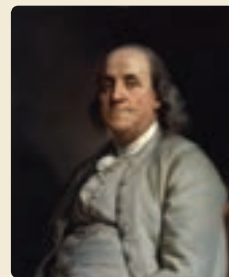
$$\Delta U = -W_E = 0 \Rightarrow \Delta V = \frac{\Delta U}{q} = 0$$

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

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (2-13)$$

در این رابطه، بار الکتریکی ( $q$ ) بر حسب کولن ( $C$ )، مساحت ( $A$ ) بر حسب متر مربع ( $m^2$ ) و در نتیجه چگالی سطحی بار ( $\sigma$ ) بر حسب کولن بر متر مربع ( $C/m^2$ ) است.

در نبود میدان الکتریکی خارجی، چگالی سطحی بار الکتریکی یک رسانای کروی در همه نقاط سطح خارجی آن یکسان است. اما در اجسامی که سطح خارجی آنها شکل تقارنی کروی ندارد چگالی سطحی بار در همه جای سطح خارجی یکسان نیست.



### بنیامین فرانکلین

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

## آزمایش ۲-۲

### چگونگی توزیع بار روی سطح خارجی جسم رسانای منزوی

**وسایل آزمایش:** مخروط فلزی یا ورقه آلومینیومی ضخیم، پایه عایق، گلوله فلزی کوچک با دسته عایق، الکتروسکوپ،

مولد واندوگراف یا دستگاه مشابه دیگر برای ایجاد بار

### شرح آزمایش:

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

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





۳- گلوله فلزی را با دسته عایق آن بگیرید و گلوله را با نوک تیز مخروط تماس دهید. سپس گلوله را به کلاهک الکتروسکوپ تماس دهید. چه چیزی مشاهده می کنید؟

۴- گلوله فلزی و الکتروسکوپ را با تماس با دستتان خنثی کنید، اینک گلوله را با دسته عایق آن بگیرید و با بدنه مخروط فلزی تماس دهید. سپس گلوله را با کلاهک الکتروسکوپ تماس دهید. اکنون چه چیزی مشاهده می کنید؟

۵- مراحل ۳ و ۴ را چندبار تکرار کنید. پیش از انجام دادن هریک از مراحل ۳ و ۴، گلوله فلزی و الکتروسکوپ را با تماس با دستتان خنثی کنید.

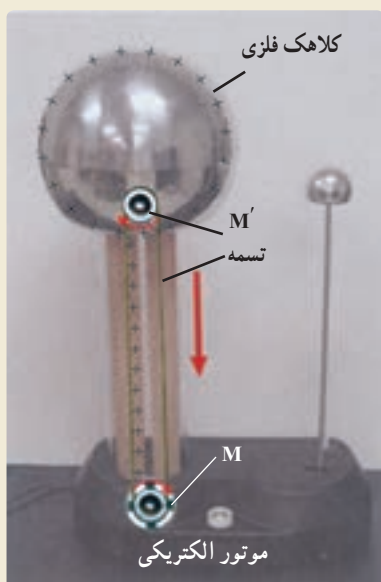
۶- از مشاهده های خود در انجام مراحل ۳ و ۴ و ۵ چه نتیجه ای می گیرید؟

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

## فعالیت ۲-۷

در مورد برقگیرهای ساختمان تحقیق کنید و بررسی کنید چگونه آنها ساختمان ها را از خطر آذرخش در امان نگه می دارند.

## مطالعه آزاد



## مولد واندوگراف

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

در نمونه ساده مولد واندوگراف، غلتک M توسط یک موتور الکتریکی می چرخد و تسمه روی دو غلتک چرخانده می شود. معمولاً غلتک M از جنس پلی اتیلن و غلتک M' از جنس پرسپکس است. بر اثر مالش تسمه با غلتک ها، غلتک M بار منفی و غلتک M' بار مثبت پیدا می کند. غلتک M که بار منفی دارد، در یک شانه فلزی که متصل به

زمین است، بار مثبت القا می‌کند. بار مثبت توسط این شانه روی سطح بیرونی تسمه قرار داده می‌شود. این بارهای مثبت، توسط تسمه که عایق است به کمک شانه فلزی دیگری که به کلاهک متصل است به سطح خارجی کلاهک منتقل می‌شود. به این ترتیب، بار الکتریکی مثبت روی سطح خارجی کلاهک انباشته می‌شود. اگر جای غلتهای  $M$  و  $M'$  با هم عوض شود، بار منفی در سطح خارجی کلاهک انباشته خواهد شد.

## ۹-۲- خازن

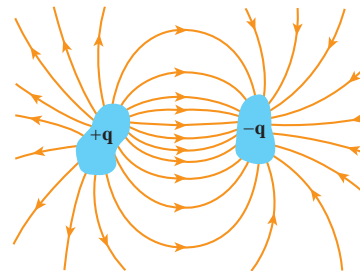
خازن وسیله‌ای الکتریکی است که می‌تواند بار الکتریکی و انرژی الکتریکی را در خود ذخیره کند. مثلاً باتری‌های یک دوربین با باردار کردن یک خازن، انرژی را در خازن فلاش دوربین ذخیره می‌کنند (شکل ۲-۲). توجه کنید باتری‌ها می‌توانند انرژی را فقط با آهنگ نسبتاً کمی به مدار بدهند که این برای گسیل جرقه نور از فلاش دوربین بسیار کم است، اما وقتی خازن باردار می‌شود، می‌تواند انرژی را با آهنگ بسیار بیشتری برای فلاش زدن آماده کند. شکل ۲-۲۱ چند خازن را در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۲-۲۲ اجزای اصلی هر خازن را نشان می‌دهد که شامل دو رسانا با هر شکلی است. بی‌توجه به شکل آنها و اینکه آیا تخت هستند یا نه، این رساناها را **صفحه خازن** می‌نامیم. شکل ۲-۲۳ آرایش خازنی موسوم به **خازن تخت**<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد که شامل دو صفحه رسانای موازی با مساحت  $A$  است که به فاصله  $d$  (که در برابر ابعاد صفحه‌ها ناچیز است) از هم قرار گرفته‌اند. گرچه نمادی که برای نشان دادن یک خازن به کار می‌بریم  $\left( \begin{array}{|c|} \hline \text{---} \\ \hline \end{array} \right)$  مبتنی بر شکل یک خازن تخت است، ولی از آن برای نشان دادن خازن‌ها با هر شکلی استفاده می‌شود. خازن‌ها به طور گسترده‌ای در مدارهای الکترونیکی و ساینده مانند رادیو، تلویزیون، رایانه و... به کار می‌روند؛ مثلاً شکل ۲-۲۴ مدار یک تقویت‌کننده (آمپلی‌فایر) را نشان می‌دهد که در آن چندین خازن به کار رفته است. برخی از این خازن‌ها با پیکان‌هایی مشخص شده‌اند.



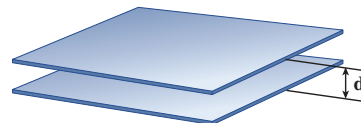
شکل ۲-۲۱ انرژی فلاش دوربین در یک خازن ذخیره شده است.



شکل ۲-۲۱ تصویری از چند خازن مختلف



شکل ۲-۲۲ دو رسانا که به طور الکتریکی از یکدیگر و محیط اطراف خود منزوی شده‌اند، تشکیل یک خازن را می‌دهند.



شکل ۲-۲۳ یک خازن تخت، از دو صفحه با مساحت  $A$  ساخته شده است که به فاصله  $d$  از هم قرار گرفته‌اند.

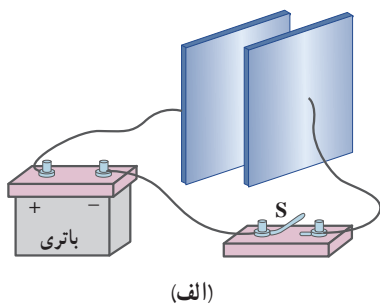


شکل ۲-۲۴ مدار یک تقویت‌کننده که شامل چند خازن است. برخی از خازن‌ها با پیکان مشخص شده‌اند.

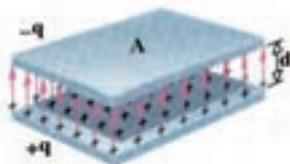
<sup>۱</sup> parallel - plate capacitor



## الکترواستاتیکی ساکن



(الف)



(ب)

**شکل ۲-۲۵ الف** برای باردار کردن خازن، آن را به باتری وصل کرده ایم. (ب) هر صفحه این خازن بارهایی با علامت مخالف قرار دارد و میدان الکترواستاتیکی عمود بر صفحه‌ها و از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است.

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

مدار الکترواستاتیکی ساده‌ای است که دارای یک باتری است (شکل ۲-۲۵ الف). وقتی کلید S بسته شود بار از طریق سیم رسانا جریان می‌یابد. این بار همان الکترون‌هایی هستند که توسط میدان الکترواستاتیکی ای که باتری در سیم‌ها ایجاد می‌کند در طول سیم‌ها به حرکت واداشته می‌شوند. میدان الکترواستاتیکی، الکترون‌ها را از صفحه متصل به پایانه مثبت باتری به حرکت در می‌آورد. در نتیجه، این صفحه با از دست دادن الکترون دارای بار مثبت می‌شود. این میدان، درست همین تعداد الکترون را از پایانه منفی باتری به صفحه‌ای می‌راند که از طریق کلید به پایانه منفی باتری متصل است. در نتیجه، این صفحه با به دست آوردن الکترون دارای بار منفی می‌شود که درست به همان اندازه‌ای است که صفحه دیگر با از دست دادن الکترون دارای بار مثبت شده است. این شارش بار تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که اختلاف پتانسیل میان دو صفحه خازن با اختلاف پتانسیل میان دو پایانه باتری یکسان شود. با توجه به اینکه صفحه‌های خازن رساناست تمام نقاط هر صفحه پتانسیل یکسانی دارد و خطوط میدان الکترواستاتیکی عمود بر این صفحه‌ها و از صفحه مثبت به سمت صفحه منفی است (شکل ۲-۲۵ ب). وقتی یک خازن باردار می‌شود، صفحه‌های آن دارای بارهایی با بزرگی یکسان، ولی علامت مخالف می‌شود:  $+q$  و  $-q$ . ولی بار یک خازن را به صورت  $q$  نشان می‌دهند که همان بار صفحه مثبت است.

**۱۰-۲ ظرفیت خازن**

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

$$C = \frac{q}{V} \quad (۱۴-۲)$$

در رابطه ۱۴-۲ یکای بار الکترواستاتیکی، کولن ( $C$ )، یکای اختلاف پتانسیل، ولت ( $V$ ) و بنابراین یکای ظرفیت، کولن بر ولت ( $C/V$ ) است که به پاس خدمات مایکل فارادی، **فاراد** ( $F$ ) نامیده شده است. **فاراد** یکای بسیار بزرگی است و عملاً ظرفیت اکثر خازن‌های متداول در محدوده میکوفاراد ( $10^{-12} F$ ) تا میلی‌فاراد ( $10^{-3} F$ ) است. گرچه امروزه فناوری ساخت خازن‌ها، دستیابی به ظرفیت‌هایی بسیار بیشتر را نیز ممکن ساخته است.

**مثال ۲-۱۵**

صفحه‌های خازنی را به پایانه‌های مولدی با اختلاف پتانسیل  $240V$  وصل می‌کنیم. اگر بار خازن  $120 \mu C$  شود الف) ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

ب) اگر این خازن را به اختلاف پتانسیل  $360V$  وصل کنیم، بار الکترواستاتیکی آن چقدر می‌شود؟

پاسخ:

الف) با استفاده از رابطه ۱۴-۲ داریم:

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

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

آنگاه با استفاده از رابطه ۱۴-۲ می‌توان نوشت:

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

## ۱۱-۲- خازن با دی الکتریک

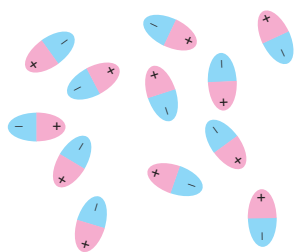
اگر فضای میان صفحه‌های یک خازن را با ماده‌ای عایق (مانند کاغذ یا پلاستیک) که به آن **دی الکتریک** گفته می‌شود پر کنیم برای ظرفیت خازن چه پیش می‌آید؟ **مایکل فارادی** نخستین بار در سال ۱۸۳۷ میلادی، با استفاده از وسایل ساده‌ای دریافت که ظرفیت خازن با ضریبی موسوم به ثابت دی الکتریک ماده عایق (که آن را با  $\kappa$  نشان می‌دهند) افزایش می‌یابد؛ یعنی اگر ظرفیت خازن بدون دی الکتریک را با  $C_0$  نمایش دهیم آنگاه ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر با  $C = \kappa C_0$  می‌شود. جدول ۱-۲ ثابت دی الکتریک چند ماده عایق را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲- برخی از ویژگی‌های دی الکتریک‌ها در دمای  $20^\circ C$ 

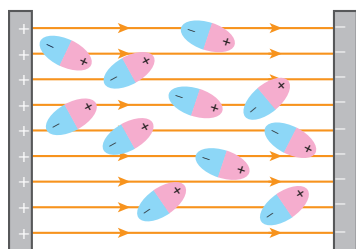
قدرت دی الکتریک (kV/mm)	ثابت دی الکتریک	ماده دی الکتریک
۳	۱/۰۰۰۶	هوای ۱ atm
۶۰	۲/۱	تفلون
۱۰	۲/۲	پارافین
۲۴	۲/۶	پلی استیرن
۲۸۰	۳/۱	میلار
۲۹	۳/۴	PVC (پلی وینیل کلراید)
۱۶	۳/۵	کاغذ
۸	۴/۳	کوارتز
۱۴	۵	شیشه پیرکس
۱۵۰	۷	میکا
۶۵	۸۰	آب
۸	۳۱۰	تیتانید استرانسیوم

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

## الکترواستاتیکی ساکن

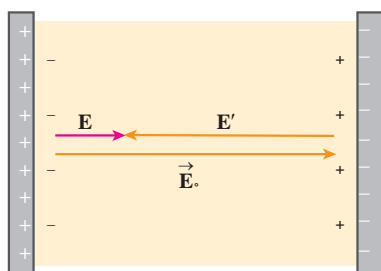


الف) در نبود میدان الکتریکی، سمتگیری مولکول‌های دو قطبی نامنظم است.

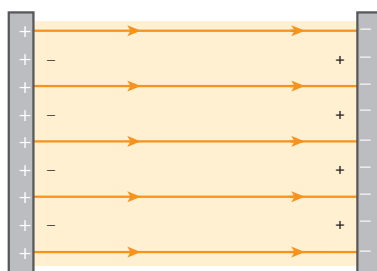


ب) در حضور میدان الکتریکی، مولکول‌های دو قطبی می‌کوشند خود را در جهت میدان الکتریکی خارجی هم‌دیف کنند.

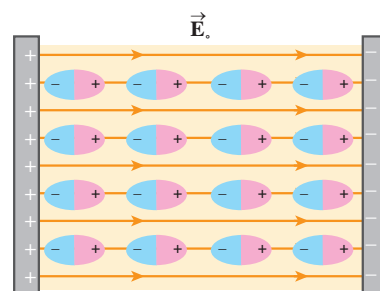
شکل ۲-۲۷



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

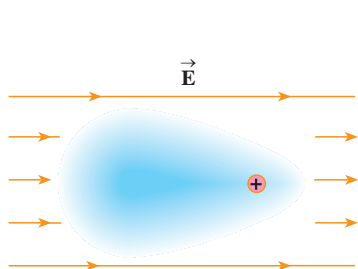


ب) این هم‌دیفی، بارهایی سطحی را روی دو وجه دی‌الکتریک ایجاد می‌کند که موجب تضعیف میدان الکتریکی خارجی می‌شود.



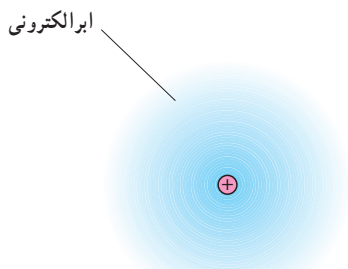
الف) مولکول‌های دو قطبی در حضور میدان الکتریکی خارجی  $\vec{E}_0$  هم‌دیف شده‌اند.

شکل ۲-۲۷



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

شکل ۲-۲۸



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

آنچه گفته شد برای دی‌الکتریک‌های غیرقطبی (مانند متان، بنزن و...) نیز برقرار است. وقتی مولکول‌های چنین دی‌الکتریک‌ی در میدان بین دو صفحه‌خازن قرار می‌گیرند بر اثر القاء قطبیده می‌شوند؛ یعنی میدان الکتریکی باعث می‌شود که ابر الکترونی این مولکول‌ها در خلاف جهت میدان جابه‌جا شود (شکل ۲-۲۸) و به این ترتیب، مرکز بارهای مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند و اصطلاحاً مولکول‌ها **قطبیده** می‌شوند.

پس از آن مانند مولکول‌های دی‌الکتریک قطبی، میدان بین دو صفحه خازن را تضعیف می‌کنند. دیدیم که در هر دو حالت با توجه به اینکه خازن متصل به باتری نیست، با قرار دادن دی‌الکتریک (چه قطبی و چه غیرقطبی) بین صفحه‌های خازن، میدان اولیه بین این صفحه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف پتانسیل بین دو صفحه نیز کاهش می‌یابد (شکل ۲۹-۲). بنابراین، طبق رابطه ۱۴-۲ و با توجه به اینکه بار ثابت مانده است، ظرفیت خازن افزایش می‌یابد:

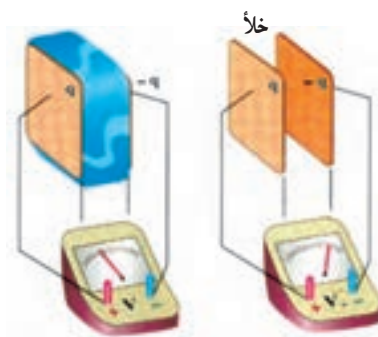
$$C = \kappa C_0 \quad (15-2)$$

اثر دیگر حضور دی‌الکتریک‌ها در خازن، افزایش حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن است. اما در هر حال برای هر دی‌الکتریکی، بیشینه میدان و در نتیجه اختلاف پتانسیلی وجود دارد که از آن به بعد دی‌الکتریک اصطلاحاً دستخوش **فروریزش الکتریکی**<sup>۱</sup> می‌شود و به آن اختلاف پتانسیل بیشینه، **پتانسیل فروریزش** می‌گویند. مقدار بیشینه میدان الکتریکی ای که دی‌الکتریک می‌تواند بدون فروریزش تحمل کند را **قدرت (استقامت) دی‌الکتریک**<sup>۲</sup> می‌نامند. برخی از قدرتهای دی‌الکتریک برحسب  $kV/mm$  در ستون دوم در جدول ۱-۲ داده شده است. به لحاظ میکروسکوپی، فروریزش الکتریکی ناشی از کنده شدن الکترون‌های اتم‌های ماده دی‌الکتریک توسط میدان الکتریکی و سپس رانده شدن این الکترون‌ها توسط میدان الکتریکی و ایجاد یک مسیر رسانایی بین دو صفحه خازن است که با ایجاد یک جرقه همراه است و معمولاً خازن را می‌سوزاند. خازن‌ها معمولاً با مقدار ظرفیت آنها و اختلاف پتانسیل بیشینه ای که می‌توانند تحمل کنند مشخص می‌شوند (شکل ۳۱-۲). به‌عنوان مثالی از کاربرد دی‌الکتریک، خازن تختی را در نظر بگیرید. آزمایش و محاسبه نشان می‌دهد که ظرفیت یک خازن تخت با مساحت صفحه‌های  $A$  و فاصله جدایی صفحه‌های  $d$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (16-2)$$

که در آن  $\epsilon_0$  همان ضریب گذردهی الکتریکی خالص ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$ ) است. حال اگر فضای بین صفحه‌های این خازن را با یک دی‌الکتریک با ثابت دی‌الکتریک  $\kappa$  کاملاً پر کنیم، رابطه (۱۶-۲) همان  $C$  رابطه (۱۵-۲) می‌شود و در نتیجه برای ظرفیت خازن جدید داریم:

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (17-2)$$



شکل ۲۹-۲ با وارد شدن دی‌الکتریک در بین صفحه‌های خازن، اختلاف پتانسیل اولیه  $V_0$  به مقدار کوچک‌تر  $V$  کاهش یافته است.



شکل ۳۰-۲ فروریزش الکتریکی باعث تشکیل مسیرهای رسانایی سرخس‌شکلی در دی‌الکتریک شده است.



شکل ۳۱-۲ تصویری از یک خازن که روی آن ظرفیت و اختلاف پتانسیل قابل تحمل بیشینه نوشته شده است.

۱- Electrical breakdown

۲- Dielectric strength

## مثال ۱۷-۲

مساحت هریک از صفحه‌های خازن تختی  $4/0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$  و فاصله جدایی صفحه‌های آن  $1/0 \times 10^{-1} \text{ mm}$  است. فضای بین صفحه‌ها را با صفحه کاغذی پر می‌کنیم. با استفاده از جدول ۱-۲ کتاب، الف) ظرفیت خازن و ب) پتانسیل فروریزش الکتریکی آن را محاسبه کنید.

پاسخ:

الف) ظرفیت خازن با دی الکتریک برابر است با

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

ثابت دی الکتریک کاغذ با استفاده از جدول ۱-۲ برابر با  $3/5$  است و از آنجا برای ظرفیت خازن داریم:

$$C = (3/5)(8/85 \times 10^{-12} \text{ F/m}) \frac{(4/0 \times 10^{-2} \text{ m}^2)}{(1/0 \times 10^{-4} \text{ m})} = 1/2 \times 10^{-8} \text{ F} = 12 \text{ nF}$$

ب) با استفاده از رابطه  $10^{-2}$  به ازای  $\alpha = 0$  (تانسیل فروریزش را به دست می‌آوریم. همان طور که گفتیم در نمادگذاری این کتاب از نماد  $V$  برای نشان دادن قدرمطلق اختلاف پتانسیل صفحه‌های خازن استفاده می‌کنیم. بنابراین، منظور از پتانسیل فروریزش همان اختلاف پتانسیل بیشینه‌ای است که به فروریزش دی الکتریک خازن می‌انجامد. آنگاه با استفاده از جدول ۱-۲ داریم:

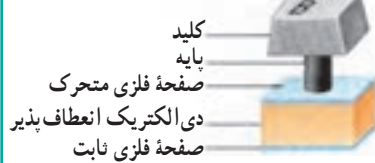
$$V_{\text{فروریزش}} = E_{\text{فروریزش}} d = (16 \times 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}})(1/0 \times 10^{-4} \text{ m}) = 1/6 \times 10^3 \text{ V} = 1/6 \text{ kV}$$

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

## مثال ۱۷-۲



(الف)



(ب)

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

فاصله بین صفحه‌ها عموماً  $5/0 \times 10^{-2} \text{ m}$  است که این فاصله با فشار دادن کلید به  $1/5 \times 10^{-2} \text{ m}$  می‌رسد. مساحت صفحه‌ها  $9/5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  است و خازن از ماده‌ای با ثابت دی الکتریک  $3/5$  پر شده است. تغییر ظرفیتی که با فشار دادن کلید، توسط مدارهای الکترونیکی رایانه آشکار می‌شود چقدر است؟

**پاسخ:** با استفاده از رابطه ۲-۱۷ ظرفیت خازن پیش از فشار دادن کلید برابر است با

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

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

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

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

## فعالیت ۲-۷



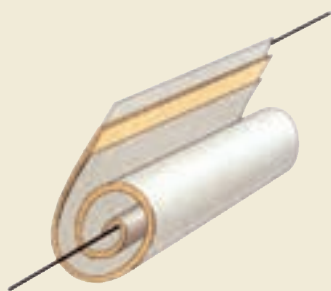
کیسه هوای خودرو

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

## مطالعه آزاد

### انواع خازن‌ها

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



طرحی از یک خازن کاغذی

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

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

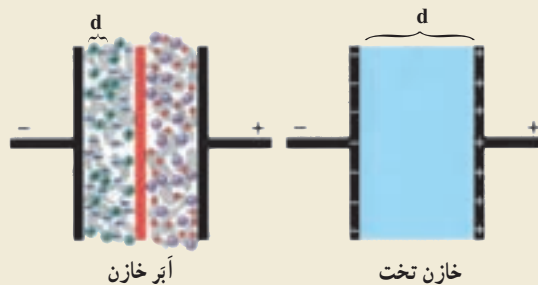
**خازن‌های سرامیکی:** دی الکتریک این خازن‌ها سرامیک است که با استفاده از انواع سیلیکات‌ها در دمای بالا تهیه می‌شود. ثابت دی الکتریک این خازن‌ها زیاد و در حدود  $1000$  است. خازن‌های سرامیکی به شکل عدس تهیه می‌شوند و



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

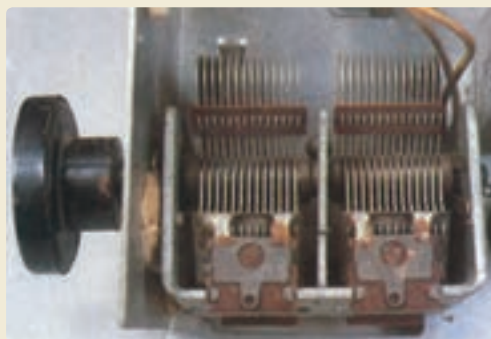
**خازن‌های الکترولیتی:** این نوع خازن‌ها از صفحه‌های آلومینیومی تشکیل شده‌اند که در میان آنها الکترولیت‌هایی از انواع مختلف فسفات یا کربنات قرار می‌دهند. در بین صفحه‌ها ماده‌ای اسفنجی است که الکترولیت را به خود جذب می‌کند. ظرفیت این خازن‌ها بالاست و تا حدود  $10^5$  F می‌رسد.

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



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

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



تصویری از یک خازن متغیر

۱- Supercapacitor (ultra capacitor)

## ۲-۱۲- انرژی خازن

وقتی صفحه‌های خازن دارای بار الکتریکی می‌شوند در خازن انرژی نیز ذخیره می‌شود؛ مثلاً در هنگام شارژ شدن خازن توسط باتری، دائماً باری جزئی از یک صفحه خازن جدا و به همان اندازه به صفحه دیگر منتقل می‌شود. در این فرایند طبق رابطه ۲-۱۲ باتری روی این بار کار انجام می‌دهد. هنگام انتقال بار، اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن نیز به آهستگی افزایش می‌یابد. بنابراین، برای انتقال بارهای بعدی به کار بیشتری نیاز است. بنا به رابطه ۲-۱۴ ( $V = q/C$ ) و با توجه به اینکه در این فرایند ظرفیت خازن همواره مقدار ثابتی است، می‌توانیم اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن را تابعی خطی از بار ذخیره شده در آن بدانیم که به طور یکنواخت از صفر تا  $V$  افزایش می‌یابد. بنابراین، در هنگام باردار شدن خازن می‌توان اختلاف پتانسیل متوسطی را به صورت  $\bar{V} = \frac{V+0}{2} = \frac{V}{2}$  برای دو صفحه خازن در نظر گرفت. آنگاه با استفاده از رابطه ۲-۱۲، کار انجام شده برای باردار شدن کامل خازن برابر با حاصل ضرب کل بارهای جزئی منتقل شده ( $q$ ) در اختلاف پتانسیل متوسط است:

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

این کار به صورت انرژی پتانسیل الکتریکی در میدان الکتریکی فضای بین صفحه‌های خازن ذخیره می‌شود. بنابراین:

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

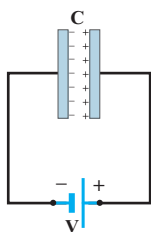
که در آن انرژی پتانسیل الکتریکی خازن ( $U_{\text{خازن}}$ ) برحسب ژول ( $J$ )، بار خازن ( $q$ ) برحسب کولن ( $C$ ) و اختلاف پتانسیل دو صفحه خازن ( $V$ ) برحسب ولت ( $V$ ) است. از طرفی با استفاده از رابطه ۲-۱۴ می‌توان نوشت:

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

و

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

## مثال ۲-۱۸



دو سربیک خازن  $50 \mu\text{F}$  را به ولتاژ  $12\text{V}$  وصل می‌کنیم. بار و انرژی ذخیره در آن را محاسبه کنید.

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

$$q = CV = (50 \times 10^{-6}\text{F})(12\text{V}) = 60 \times 10^{-6}\text{C} = 60 \mu\text{C}$$

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

$$U = \frac{1}{2}qV = \frac{1}{2}(60 \times 10^{-6}\text{C})(12\text{V}) = 36 \times 10^{-6}\text{J} = 36 \mu\text{J}$$



## دستگاه رفع لرزش نامنظم قلب (دیفیبریلاتور)



توانایی خازن برای ذخیره انرژی پتانسیل الکتریکی، اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها مانند دستگاه‌های رفع لرزشی است که توسط گروه‌های فوریت‌های پزشکی برای توقف لرزش بطنی افرادی که دچار حمله قلبی شده‌اند به کار می‌رود. در این بیماری انقباض و انقباض ناهماهنگ و آشفته قلب باعث می‌شود خون به درستی به مغز فرستاده نشود. در دستگاه‌های رفع لرزشی قابل حمل، یک باتری، خازنی را تا اختلاف پتانسیل حدود  $6\text{kV}$  باردار می‌کند و خازن در زمانی کمتر از یک دقیقه مقدار زیادی انرژی ذخیره می‌کند. صفحه‌های رابط

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

اگر خازن این دستگاه به ظرفیت  $11 \mu\text{F}$  با ولتاژ  $6 \times 10^3 \text{V}$  شارژ شود و سپس تمام انرژی آن از طریق کفشک‌ها به درون بدن بیمار تخلیه شود،

(الف) چقدر انرژی در بدن بیمار تخلیه شده است؟

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

(پ) اگر تخلیه انرژی تقریباً در مدت  $2 \text{ms}$  صورت پذیرفته باشد توان پالس جریان چقدر بوده است؟

**پاسخ:** الف) انرژی ذخیره شده در خازن با استفاده از رابطه (۲-۱۹) به دست می‌آید:

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

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

(ب) بار اولیه روی صفحات خازن برابر است با

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

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

(پ) توان پالس (تپ) برابر است با

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

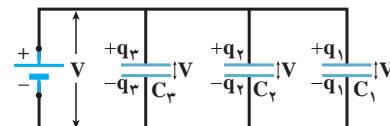
## فعالیت ۸-۲

انرژی پتانسیلی که باتری فراهم می‌آورد از رابطه  $qV = U_{\text{باتری}}$  به دست می‌آید. از طرفی طبق رابطه ۲-۱۸ انرژی

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

## ۲-۱۳- به هم بستن خازن‌ها در مدار

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



شکل ۲-۳ سه خازن که به‌طور موازی بسته شده‌اند.

**الف) بستن خازن‌ها به صورت موازی:** شکل ۲-۳ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که در آن سه خازن به صورت موازی به باتری متصل شده‌اند. توجه کنید واژه «موازی» ارتباط چندانی به چگونگی ترسیم صفحه‌های خازن‌ها ندارد، بلکه «به صورت موازی» به این معناست که صفحه بالایی خازن‌ها به یکدیگر و صفحه پایینی آنها نیز به یکدیگر متصل شده است و اختلاف پتانسیل یکسان  $V$  به دو سر این دسته صفحه‌ها اعمال شده است. بنابراین، هریک از خازن‌ها در اختلاف پتانسیل یکسان  $V$  قرار دارد:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V$$

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

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

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

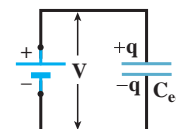
$$q = q_1 + q_2 + q_3 = C_1 V + C_2 V + C_3 V = (C_1 + C_2 + C_3) V$$

در نتیجه ظرفیت معادل ترکیب خازن‌های موازی چنین می‌شود:

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

و بنابراین، ترکیب این سه خازن موازی را می‌توان با خازن معادل شکل ۲-۳ جایگزین کرد. در حالت کلی برای  $n$  خازن موازی رابطه بالا به صورت زیر تعمیم می‌یابد:

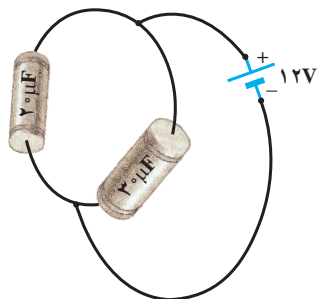
$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2-21)$$



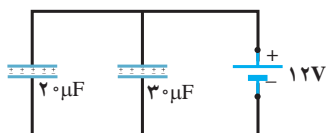
شکل ۲-۳ خازن معادل با ظرفیت  $C_{eq}$

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

۱- eq مخفف واژه equivalent به معنای معادل است.



(الف)



(ب)

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

**پاسخ:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

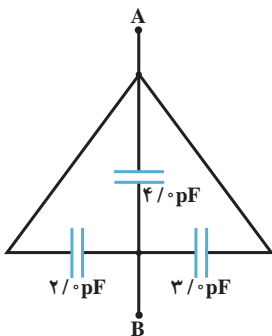
و انرژی هر خازن نیز با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه می‌شود. این دفعه از رابطه  $U = \frac{1}{2} qV$  استفاده می‌کنیم:

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

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

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

## مثال ۲-۲

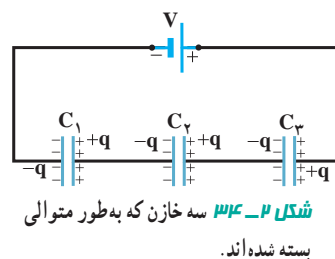


ظرفیت معادل بین پایانه‌های A و B را در شکل روبه‌رو به‌دست آورید.  
**پاسخ:** همان‌طور که در شکل می‌بینیم دو صفحه‌خازن  $4/0 \text{ pF}$  به دو صفحه‌خازن‌های  $2/0 \text{ pF}$  و  $3/0 \text{ pF}$  بسته شده است. بنابراین، خازن  $4/0 \text{ pF}$  با دو خازن دیگر موازی است.  
 در نتیجه داریم:

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

### ب) بستن خازن‌ها به صورت متوالی: شکل ۲-۳ سه خازن را نشان می‌دهد که به صورت

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



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

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

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

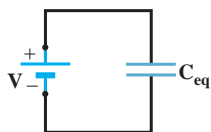
اختلاف پتانسیل کل، برابر با مجموع این سه اختلاف پتانسیل است:

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

پس ظرفیت معادل چنین می‌شود:

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

و در نتیجه :

شکل ۲-۳۵ خازن معادل با ظرفیت  $C_{eq}$ 

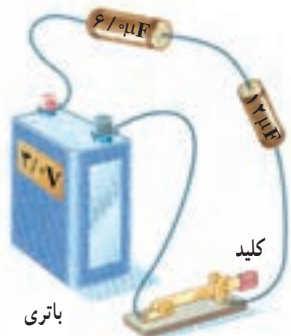
$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

و بنابراین، ترکیب این سه خازن متوالی را می‌توان با خازن معادل شکل ۲-۳۵ جایگزین کرد. در حالت کلی برای  $n$  خازن متوالی رابطه بالا به صورت زیر تعمیم می‌یابد.

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2-22)$$

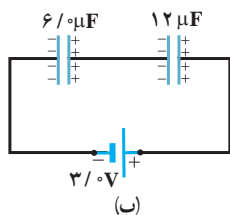
بنابراین، ظرفیت خازن معادل خازن‌هایی که به صورت متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند از کوچک‌ترین ظرفیت خازن این مجموعه نیز کوچک‌تر است.

## مثال ۲-۲۲



باتری

(الف)



(ب)

شکل الف دو خازن را نشان می‌دهد که به یک باتری  $3/0V$  بسته شده‌اند. الف) ظرفیت، بار و انرژی خازن معادل را محاسبه کنید. ب) بار، ولتاژ و انرژی هر خازن را بیابید.

پاسخ :

الف) شکل الف را می‌توان به صورت آرایش شکل ب نشان داد. با توجه به شکل ب، خازن‌ها متوالی‌اند و ظرفیت معادل آنها از رابطه ۲-۲۲ به دست

می‌آید :

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

در نتیجه  $C_{eq} = 4/0\mu F$  است.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

و انرژی هر خازن نیز با استفاده از هر کدام از سه رابطه‌ای که برای انرژی خازن به دست آوردیم محاسبه می‌شود. این بار

از رابطه  $U = \frac{1}{2}qV$  استفاده می‌کنیم:

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

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

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

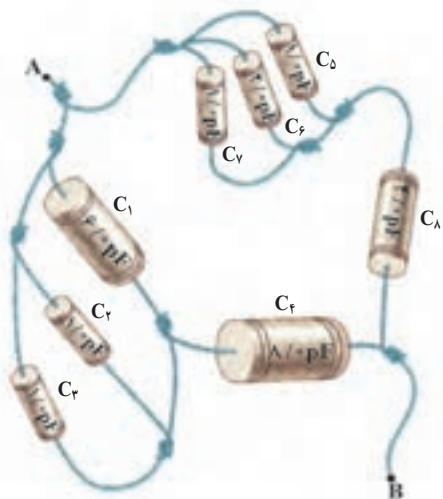
## فعالیت ۲-۹



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

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

## مثال ۲-۳۳



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

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

<sup>۱</sup> - capacitive touch screen

پاسخ:

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

$$C_{123} = C_1 + C_2 + C_3 = 6/\circ\text{pF} + 1/\circ\text{pF} + 1/\circ\text{pF} = 8/\circ\text{pF}$$

خازن  $C_{123}$  خود با خازن  $C_4$  متوالی است. بنابراین ظرفیت معادل خازن های سمت چپ از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{C_{\text{چپ}}} = \frac{1}{C_{123}} + \frac{1}{C_4} = \frac{1}{8/\circ\text{pF}} + \frac{1}{8/\circ\text{pF}} = \frac{1}{4/\circ\text{pF}} \Rightarrow C_{\text{چپ}} = 4/\circ\text{pF}$$

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

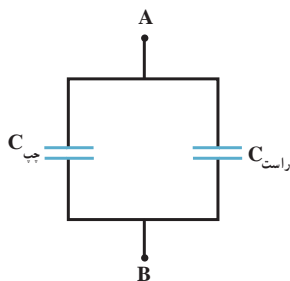
$$C_{567} = C_5 + C_6 + C_7 = 1/\circ + 2/\circ + 1/\circ = 4/\circ\text{pF}$$

خازن  $C_{567}$  خود با خازن  $C_8$  متوالی است. بنابراین، ظرفیت معادل خازن های سمت راست از رابطه زیر به دست

می آید:

$$\frac{1}{C_{\text{راست}}} = \frac{1}{C_{567}} + \frac{1}{C_8} = \frac{1}{4/\circ\text{pF}} + \frac{1}{4/\circ\text{pF}} = \frac{1}{2/\circ\text{pF}} \Rightarrow C_{\text{راست}} = 2/\circ\text{pF}$$

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



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

$$C_{\text{eq}} = C_{\text{چپ}} + C_{\text{راست}} = 4/\circ\text{pF} + 2/\circ\text{pF} = 6/\circ\text{pF}$$

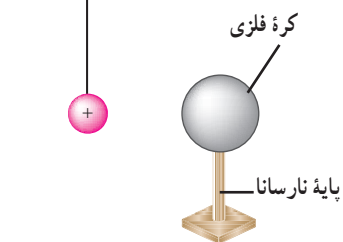
ب) با استفاده از یکی از سه رابطه انرژی خازن ها می توانیم انرژی ذخیره شده در این دستگاه را بیابیم. در اینجا ساده تر

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

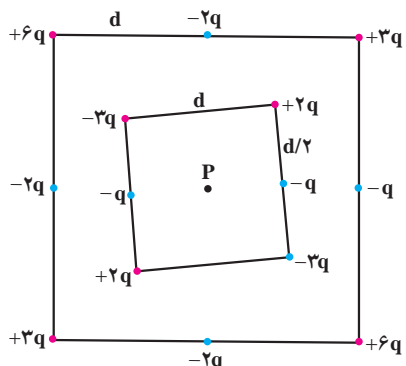
$$U = \frac{1}{2} C_{\text{eq}} V^2 = \frac{1}{2} (6/\circ\text{pF}) (12\text{V})^2 = 4/3 \times 10^{-2} \text{pJ}$$

## پرسش‌ها

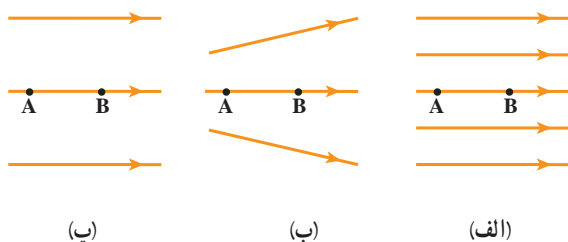
- ۱ یک کره فلزی بدون بار الکتریکی را که روی پایه نارسانی قرار دارد، به آونگ الکتریکی بارداری نزدیک می‌کنیم. با ذکر دلیل توضیح دهید که چه اتفاقی می‌افتد.



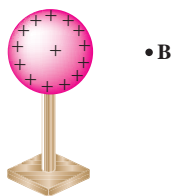
- ۲ شکل روبه‌رو دو آرایش مربعی از ذرات باردار را نشان می‌دهد. مربع‌ها که در نقطه P هم‌مرکزند، هم‌مدیف نیستند. ذره‌ها روی محیط مربع به فاصله  $d/2$  یا  $d$  از هم قرار گرفته‌اند. بزرگی و جهت میدان الکتریکی برآیند در نقطه P چیست؟



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



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



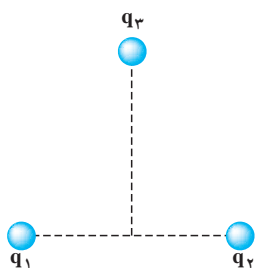
- ۵ اگر ساختمان یک خازن را تغییر ندهیم، در هریک از شرایط زیر ظرفیت خازن چگونه تغییر می‌کند؟ (الف) بار آن دو برابر شود؟ (ب) اختلاف پتانسیل میان صفحه‌های آن سه برابر شود؟



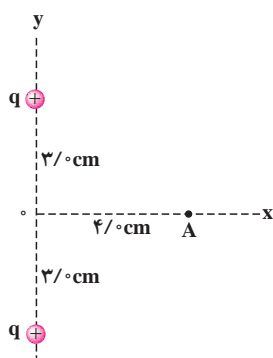
- ۶ شکل روبه‌رو، دوزره باردار را نشان می‌دهد که در جای خود روی محور x ثابت شده‌اند. (الف) در کجای این محور (غیر از بینهایت) نقطه‌ای وجود دارد که در آنجا میدان الکتریکی برآیند برابر با صفر است؟ (ب) آیا نقطه‌ای در جایی بیرون از محور (غیر از بینهایت) وجود دارد که میدان الکتریکی در آنجا صفر باشد؟



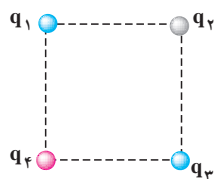
## مسئله‌ها



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



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



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

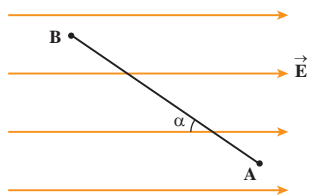
- ۴ هسته آهن شعاعی در حدود  $4/^\circ \times 10^{-15} \text{m}$  دارد و شامل ۲۶ پروتون است. (الف) بزرگی نیروی دافعه بین دو پروتون که به فاصله  $4/^\circ \times 10^{-15} \text{m}$  از هم قرار دارند چقدر است؟ (ب) بزرگی نیروی گرانشی بین این دو پروتون چقدر است؟ (پ) از این مسئله به چه نتیجه‌ای می‌رسید؟

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

- ۶ غلظت الکترون‌ها در ارتفاعات مختلف جو زمین متفاوت است. وقتی ماهواره‌ای به دور زمین می‌چرخد بر اثر عبور از فضای



اطراف زمین باردار می‌شود. این بارها ممکن است موجب آسیب‌رساندن به قطعات الکترونیکی ماهواره شود. فرض کنید ماهواره امید در اثر عبور از یکی از لایه‌های جو دارای بار الکتریکی  $q = 2/^\circ \times 10^{-9} \text{C}$  شود. این ماهواره، مکعبی به ضلع  $4/^\circ \text{cm}$  است. چگالی سطحی بار الکتریکی روی سطح این ماهواره را محاسبه کنید. (از تجمع بار بر روی لبه‌ها چشم‌پوشی شود.)



- ۷ مطابق شکل، بار  $q = +5 \text{ nC}$  را در میدان الکتریکی یکنواخت  $10^5 \text{ N/C}$  از نقطه A تا نقطه B جابه‌جا می‌کنیم. اگر  $AB = 2 \text{ m}$  و  $\alpha = 3^\circ$  باشد، مطلوب است  
 الف) نیروی الکتریکی وارد بر بار  $q$ ،  
 ب) کاری که نیروی الکتریکی در این جابه‌جایی انجام می‌دهد،  
 پ) تغییر انرژی پتانسیل الکتریکی بار  $q$

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

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

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

- ۱۱ مساحت صفحه‌های یک خازن تخت به ظرفیت  $1 \text{ F}$  که فاصله صفحات آن  $1 \text{ mm}$  و بین صفحات آن هواست، باید چقدر باشد؟ از این مسئله چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

- ۱۲ اختلاف پتانسیل بین دو صفحه یک خازن را از  $28 \text{ V}$  به  $40 \text{ V}$  ولت افزایش می‌دهیم. اگر با این کار  $15$  میکروکولن بر بار ذخیره شده در خازن افزوده شود، ظرفیت خازن را حساب کنید.

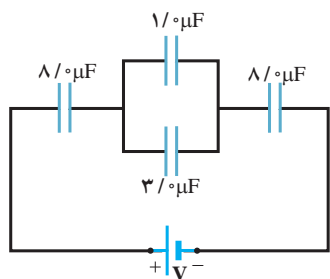
- ۱۳ خازنی به ظرفیت  $C_1 = 5 \mu\text{F}$  با اختلاف پتانسیل  $1/2 \times 10^2 \text{ V}$  و خازنی به ظرفیت  $C_2 = 10 \mu\text{F}$  با اختلاف پتانسیل  $7/5 \times 10^2 \text{ V}$  پر شده‌اند. اگر این خازن‌های پر را از مدار اصلی آنها جدا و صفحه‌های همنام آنها را به هم وصل کنیم، الف) اختلاف پتانسیل بین دو صفحه و بار ذخیره شده در هر خازن چقدر می‌شود؟ ب) مجموع انرژی ذخیره شده در دو خازن را قبل و بعد از اتصال به یکدیگر محاسبه و با هم مقایسه کنید.

- ۱۴ ظرفیت خازنی  $12$  میکروفاراد و بار الکتریکی آن  $q$  است. اگر  $3 \text{ mC}$  بار الکتریکی را از صفحه منفی جدا کرده و به صفحه مثبت منتقل کنیم، انرژی ذخیره شده در خازن به اندازه  $1 \text{ J}$  زیاد می‌شود.  $q$  را محاسبه کنید.

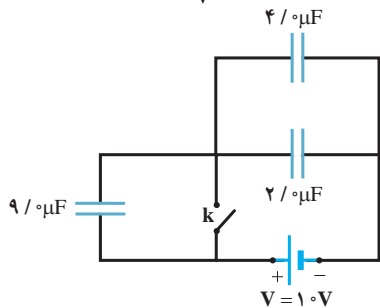
- ۱۵ در مدار شکل روبه‌رو اختلاف پتانسیل دو سر مدار برابر  $10 \text{ V}$  است.

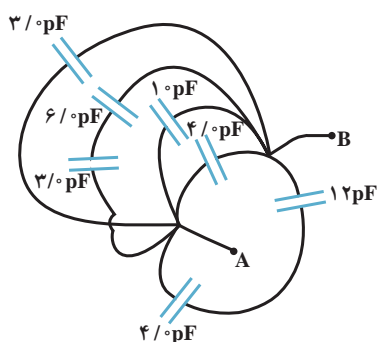
الف) ظرفیت معادل مدار و

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

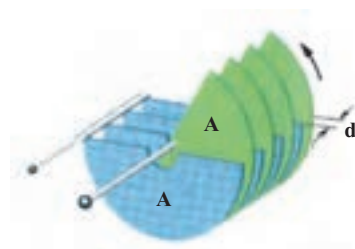


- ۱۶ در شکل روبه‌رو، انرژی ذخیره شده در مجموعه خازن‌ها را در حالتی حساب کنید که الف) کلید  $k$  باز و ب) کلید  $k$  بسته است.





۱۷ یک باتری ۱۲V به پایانه‌های A و B مدار نشان داده شده در شکل روبه‌رو بسته شده است. چقدر انرژی در شبکه خازنی ذخیره می‌شود؟



\* ۱۸ شکل روبه‌رو خازنی متغیر را نشان می‌دهد که فضای بین صفحات آن هواست. صفحه‌ها یک در میان به هم متصل شده‌اند. یک دسته از صفحه‌ها در جای خود ثابت شده‌اند و دسته‌ای دیگر می‌توانند به‌طور دستی بچرخند. خازنی با ۴ صفحه را در نظر بگیرید که مساحت هر یک از صفحه‌های آن  $A=1/5 \text{ cm}^2$  و فاصله هر دو صفحه مجاور  $d=3/4 \text{ mm}$  است. ظرفیت بیشینه این خازن چقدر است؟ (راهنمایی: خازن‌ها به‌طور موازی متصل شده‌اند.)

\* ۱۹ فرض کنید زنبور عسل کره‌ای به قطر  $1/000 \text{ cm}$  است که بار  $45/0 \text{ pC}$  به‌طور یکنواختی روی آن بخش شده است. همچنین قطر گرده کروی‌ای را که به سمت زنبور کشیده می‌شود  $4/0 \mu\text{m}$  و بزرگی باری را که روی هر طرف گرده القا می‌شود  $1/00 \text{ pC}$  در نظر بگیرید و نیز فرض کنید گرده کاملاً به زنبور می‌چسبد. الف) با فرض آنکه کل بار روی زنبور در مرکز آن قرار گرفته باشد و بارهای القا شده روی گرده به صورت دو بار نقطه‌ای مجزا از هم در دو سمت مقابل قطر گرده باشد، نیروی الکتریکی خالص وارد بر گرده از سوی زنبور را محاسبه کنید. ب) سپس فرض کنید این زنبور، گرده را به فاصله  $1/000 \text{ mm}$  از نوک کلاله گل دیگری بیاورد و نیز نوک کلاله را مانند ذره‌ای با بار  $45/0 \text{ pC}$  در نظر بگیرید. نیروی الکتریکی خالص وارد بر گرده از سوی کلاله را محاسبه کنید. پ) با مقایسه قسمت‌های الف و ب نتیجه بگیرید آیا گرده روی زنبور باقی می‌ماند یا به سمت کلاله حرکت می‌کند؟



\* این سؤالات برای دانش‌آموزان بسیار کوشا طراحی شده است و در امتحان نهایی از آنها ارزشیابی به عمل نمی‌آید.

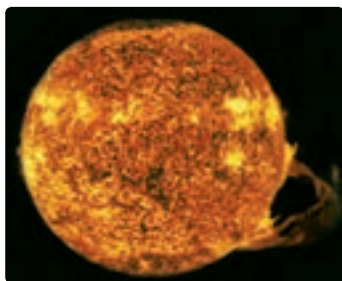
## جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



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

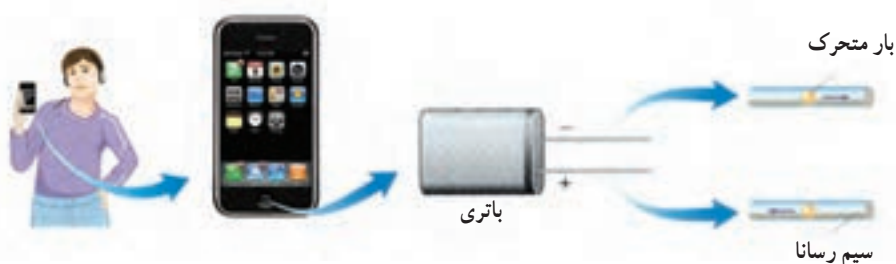
## جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

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

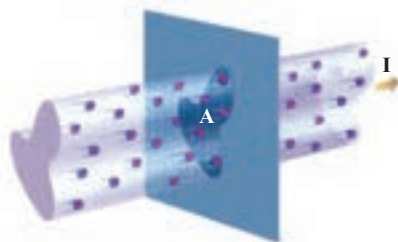


**شکل ۳-۲** یک زبانه خورشیدی حلقه عظیمی از الکترون‌ها و پروتون‌هاست که از سطح خورشید رو به بیرون آن امتداد دارد. برخی از زبانه‌های خورشیدی از هم می‌پاشند و این ذرات باردار را به فضا پرتاب می‌کنند.

مثال‌های جریان‌های الکتریکی فراوان است؛ مثلاً انرژی مورد نیاز نمایشگرهایی مانند تلفن همراه توسط باتری‌هایی تأمین می‌شود که از طریق سیم‌های رسانایی که در آنها بارهای الکتریکی در جریان‌اند به نمایشگر تلفن همراه شما متصل‌اند (شکل ۳-۱). فیزیولوژیست‌ها و مهندسان پزشکی با جریان‌های الکتریکی در رشته‌های عصبی‌ای سروکار دارند که ماهیچه‌ها را کنترل می‌کنند. مهندسان برق با دستگاه‌های الکتریکی بی‌شماری از قبیل مولدهای برق و دستگاه‌های ذخیره اطلاعات سروکار دارند و مهندسان مخابرات نگران اختلالات ناشی از زبانه‌های خورشیدی (شکل ۳-۲) هستند.



**شکل ۳-۱** انرژی این نمایشگر تلفن همراه توسط بارهایی تأمین می‌شود که از طریق سیمی رسانا از باتری به نمایشگر منتقل می‌شوند.

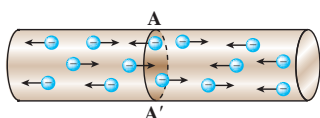


**شکل ۳-۳** باریکه‌ای از بارهای مثبت از سطح مقطع A می‌گذرد و جریان I را ایجاد می‌کنند.

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

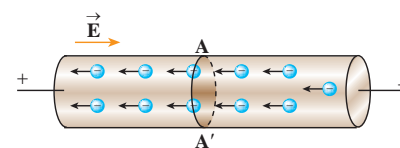
### ۳-۱-۳ جریان الکتریکی

هرچند جریان الکتریکی ناشی از شارش بارهای متحرک است، ولی همه بارهای متحرک، جریان ایجاد نمی‌کنند. همان‌طور که گفتیم، برای اینکه جریان الکتریکی داشته باشیم باید یک شارش خالص بار از یک سطح معین بگذرد. به این منظور سیمی فلزی را در نظر بگیرید. همان‌طور که در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم الکترون‌های آزاد در طول یک سیم مسی وجود دارند ولی آنها با سرعت‌هایی از مرتبه  $10^6$  m/s به طور کاتوره‌ای در همه جهات حرکت می‌کنند و بنابراین، هیچ شارش خالص باری از مقطعی معین نداریم (شکل ۳-۴). از طرفی در فصل پیش دیدیم همه نقاط رسانای منزوی که به تعادل الکتروستاتیکی رسیده است، صرف نظر از اینکه بار اضافی داشته باشد یا نه، پتانسیل یکسانی دارد و میدان الکتریکی در تمام نقاط درون آن صفر است. بنابراین، گرچه الکترون‌های آزاد داریم، ولی هیچ

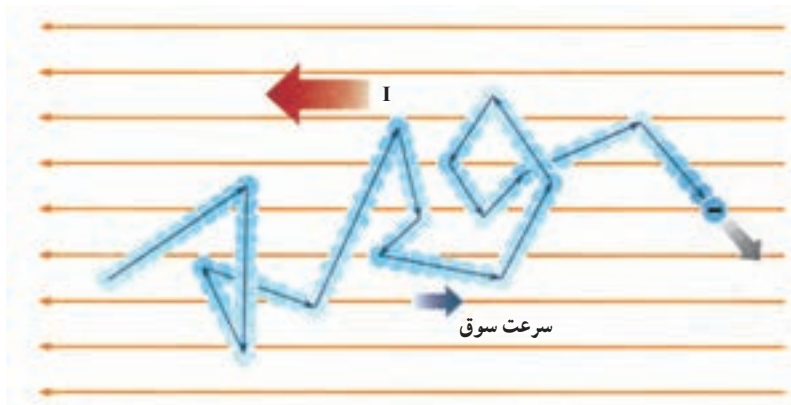


**شکل ۳-۴** در نبود اختلاف پتانسیل، شارش بار خالصی از مقطع معین AA' سیم نداریم.

نیروی خالص الکتریکی بر آنها وارد نمی‌شود و در نتیجه، هیچ جریانی در رسانا وجود ندارد. اکنون سیمی رسانا را در نظر بگیرید که در تعادل الکتروستاتیکی است. بنا بر آنچه که گفته شد همه نقاط این سیم، پتانسیل یکسانی دارد و جریانی در سیم وجود ندارد، ولی اگر به دو سر سیم یک باتری وصل کنیم، یک اختلاف پتانسیل در دو سر سیم و میدانی الکتریکی درون آن ایجاد می‌شود و باعث حرکت الکترون‌های آزاد در سیم و ایجاد جریان می‌شود (شکل ۳-۵). در واقع وقتی میدان الکتریکی را به فلز اعمال می‌کنیم، الکترون‌ها حرکت کاتوره‌ای خود را قدری تغییر می‌دهند و با سرعتی متوسط موسوم به **سرعت سوق** در خلاف جهت میدان به طور بسیار آهسته‌ای سوق پیدا می‌کنند که این موجب جریان الکتریکی در رسانا می‌شود (شکل ۳-۶). سرعت سوق در یک رسانای فلزی معمولاً کمتر از  $1 \text{ mm/s}$  است.



**شکل ۳-۵** در حضور اختلاف پتانسیل، شارش بار خالص از مقطع  $AA'$  سیم، دیگر برابر صفر نیست.



**شکل ۳-۶** مسیر زیگ‌زاگ یک الکترون آزاد در یک رسانای فلزی. در حضور میدان الکتریکی، این مسیر زیگ‌زاگ در خلاف جهت میدان سوق می‌یابد.

### فعالیت ۳-۱

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

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

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

$v$  - drift velocity



## جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

در رابطه ۱-۳ بار الکتریکی ( $\Delta q$ ) برحسب کولن (C)، مدت زمان ( $\Delta t$ ) برحسب ثانیه (s) و جریان (I) برحسب آمپر (A) است.

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

## مثال ۱-۳



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

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

ب) باتری چقدر انرژی به مدار ماشین حساب می‌دهد؟

**پاسخ:** الف) باری که در یک ساعت از مدار می‌گذرد با استفاده از رابطه ۱-۳

برابر است با:

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

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

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

## تمرین ۱-۳

بایانه مثبت (+)



بایانه منفی (-)



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

باتری استاندارد خودرویی،  $50$  آمپر-ساعت است. اگر این باتری به‌طور متوسط جریان  $5/0 A$  را فراهم سازد، چقدر طول می‌کشد تا خالی شود؟

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

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

## آزمایش ۳-۱

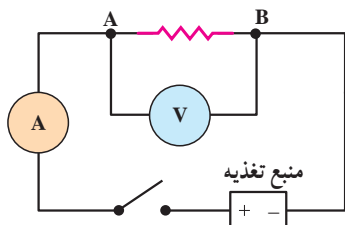
## عوامل مؤثر بر مقاومت رسانای فلزی

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

ولت‌سنج و کلید

## شرح آزمایش:

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



۲- آزمایش را اکنون با همان سیم تنگستن (یا نیکروم) اما با قطعه‌ای به طول

$\frac{1}{3}$  یا  $\frac{1}{4}$  طول قبلی انجام دهید و با اندازه‌گیری V و I مقاومت قطعه اخیر را به دست آورید. نتیجه را در جدول زیر ثبت کنید.

۳- حال آزمایش را با دو قطعه سیم هم طول و با سطح مقطع یکسان، یکی از جنس تنگستن و دیگری از جنس نیکروم

تکرار کنید و نتیجه را در جدول زیر بنویسید.

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

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

۴- سرانجام با انجام دادن آزمایش با سیم‌های هم طول از یک جنس ولی با سطح مقطع‌های متفاوت، به همان ترتیب،

مقاومت هریک از سیم‌ها را به دست آورید و نتیجه را در جدول بالا ثبت کنید.

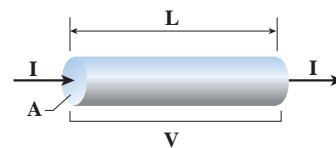
آزمایش ۳-۱ نشان می‌دهد که مقاومت رسانایی که از قانون اهم پیروی می‌کند (رسانای اهمی)

در دمای ثابت به طول، سطح مقطع و جنس رسانا بستگی دارد.

این آزمایش که با محاسبات نظری نیز تأیید می‌شود نشان می‌دهد اگر سطح مقطع سیم در تمام

طول آن یکسان باشد (شکل ۳-۷)، مقاومت سیم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (۳-۲)$$



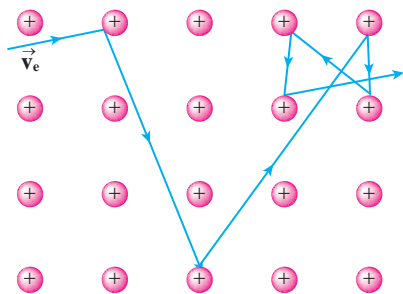
شکل ۳-۷ از سیمی به طول L و مقطع یکنواخت A، تحت اختلاف پتانسیل V، جریان I می‌گذرد.

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



## جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

در این رابطه  $\rho$  کمیتی به نام **مقاومت ویژه** رساناست که برای رساناهایی که از قانون اهم پیروی می‌کنند فقط به جنس رسانا و دمای آن بستگی دارد. یکای  $\rho$  در این رابطه اهم.متر ( $\Omega.m$ ) است. مقاومت ویژه برخی مواد در دمای  $20^\circ C$  در جدول ۱-۳ داده شده است.



**شکل ۸-۳** حرکت الکترون در داخل شبکه بلوری فلز. با افزایش دما، ارتعاشات شبکه و در نتیجه برخورد الکترون‌ها با شبکه افزایش می‌یابد.

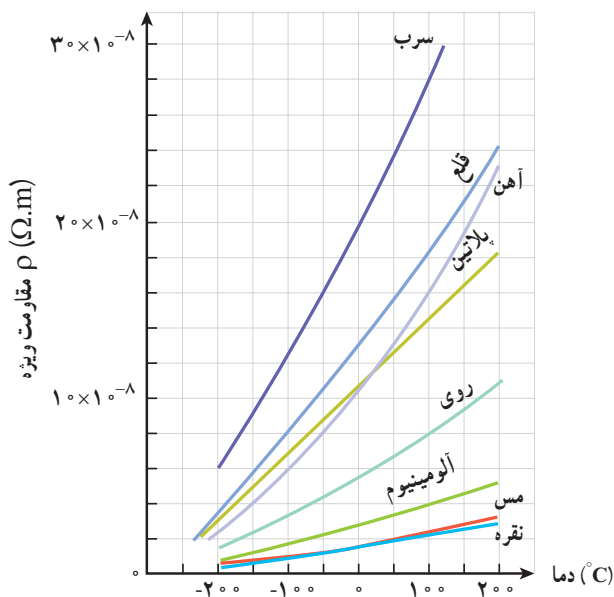
**تغییر مقاومت ویژه با دما:** وقتی دمای یک رسانای فلزی افزایش می‌یابد ارتعاشات کاتوره‌ای اتم‌ها و یون‌های آن نیز افزایش می‌یابد و موجب افزایش برخورد الکترون‌های آزاد با شبکه اتمی رسانای فلزی می‌شود (شکل ۸-۳) و به این ترتیب، مقاومت رسانا در برابر عبور جریان زیاد می‌شود؛ مثلاً در حالی که در کسری از یک ثانیه دمای یک فیلامان تنگستن ملتهب لامپی حبایی (شکل ۹-۳) تقریباً به  $2000^\circ C$  می‌رسد، مقاومت آن با مضربی حدود  $10^\circ$  افزایش می‌یابد. آزمایش نشان می‌دهد که مقاومت ویژه  $\rho$  با دما تقریباً به طور خطی تغییر می‌کند (شکل ۱۰-۳). مقاومت ویژه برخی از فلزات را در محدوده‌ای از دما نشان می‌دهد. بنابراین، مقاومت ویژه رسانای فلزی در یک دمای مشخص با رابطه زیر به مقاومت ویژه آن در یک دمای مرجع ( $\rho_0$ ) مربوط می‌شود.

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3-3)$$

که در آن  $\alpha$  ثابتی مثبت موسوم به **ضریب دمایی مقاومت ویژه** و  $T - T_0$  اختلاف دما (برحسب  $^\circ C$  یا  $K$ ) نسبت به دمای مرجع است. یکای  $\alpha$  در این رابطه  $K^{-1}$  (یا  $1/^\circ C$ ) است. ضریب دمایی مقاومت ویژه برخی از مواد در جدول ۱-۳ داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید این ضریب برای نیمرساناها منفی است. بنابراین، مقاومت ویژه نیمرساناها با افزایش دما، کاهش می‌یابد.



**شکل ۹-۳** عبور جریان از فیلامان تنگستن موجب درخشش لامپ حبایی شده است.



**شکل ۱۰-۳** نمودار تقریبی مقاومت ویژه چند فلز در یک محدوده دمایی

جدول ۳-۱- مقاومت ویژه در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و ضریب دمایی مقاومت ویژه برخی از رساناها و نیم رساناها

ماده	مقاومت ویژه $\rho_0$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	ضریب دمایی مقاومت ویژه $\alpha$ ( $\text{K}^{-1}$ )
رسانای فلزی		
نقره	$1/62 \times 10^{-8}$	$4/1 \times 10^{-2}$
مس	$1/69 \times 10^{-8}$	$4/3 \times 10^{-2}$
طلا	$2/35 \times 10^{-8}$	$4/0 \times 10^{-2}$
آلمینیم	$2/75 \times 10^{-8}$	$4/4 \times 10^{-2}$
تنگستن	$5/25 \times 10^{-8}$	$4/5 \times 10^{-2}$
آهن	$9/68 \times 10^{-8}$	$6/5 \times 10^{-2}$
پلاتین	$10/6 \times 10^{-8}$	$3/9 \times 10^{-2}$
نیکروم (۵۱ درصد Ni، ۲۳ درصد Cu، ۱۶ درصد Cr)	$100 \times 10^{-8}$	$4/0 \times 10^{-2}$
نیم رسانا		
کربن	$3/5 \times 10^{-5}$	$-5 \times 10^{-4}$
ژرمانیم	$0/46$	$-5 \times 10^{-2}$
سیلیسیم خالص	$2/5 \times 10^2$	$-7 \times 10^{-2}$

### مثال ۲-۳



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



یک اجاق برقی و طرحی از المنت آن

شکل روبه‌رو المنت یک اجاق برقی را نشان می‌دهد. این المنت شامل سیمی به طول  $1/1 \text{m}$  و سطح مقطع  $3/1 \times 10^{-6} \text{m}^2$  است که داخل ماده‌ای عایقی قرار گرفته است که خود درون یک غلاف فلزی است. با عبور جریان، المنت داغ می‌شود. مقاومت ویژه ماده سازنده سیم در دمای  $T_0 = 32^{\circ}\text{C}$  برابر با  $\rho_0 = 6/8 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$  است و ضریب دمایی مقاومت ویژه آن  $\alpha = 2/0 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$  است. مقاومت سیم در دمای  $22^{\circ}\text{C}$  چقدر است؟

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

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

$$= 8/2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$$

بنابراین، مقاومت سیم در دمای  $42^{\circ}\text{C}$  برابر است با

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

### مثال ۳-۳

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

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

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

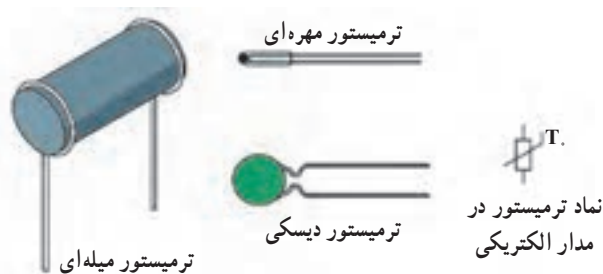
که در آن  $R_0 = \rho_0 \frac{L}{A}$  مقاومت سیم در دمای  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  است. با حل معادله بالا، برای  $T$  خواهیم داشت:

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

در نوعی دیگر از دماسنج‌های مقاومتی از ترمیستور<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که شامل یک نیم‌رسانا یا اکسید فلزی است که مقاومت آن با دما تغییر می‌کند. ویژگی آنها این است که می‌توانند در ابعاد بسیار کوچکی ساخته شوند و به تغییرات دما به سرعت واکنش نشان دهند.



(ب) تصویری از چند ترمیستور دیسکی واقعی



(الف) طرحی از چند ترمیستور و نماد آن در مدارهای الکتریکی

### ۳-۳-۳ برخی از استانداردهای مهندسی سیم‌ها

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

<sup>۱</sup> Thermistor

## نمره بندی سیم ها

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

جدول ۳-۲- نمره بندی سیم های توپر مسی بر اساس استاندارد AWG\*

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

\* American Wire Gauge

\*\* ۱ inch = ۲/۵۴ cm

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

**پاسخ:** مساحت مقطع این سیم برابر است با:

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

از طرفی مقاومت ویژه سیم مسی در دمای  $20^\circ\text{C}$  با استفاده از جدول ۳-۱،  $1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  و طول سیم مسی  $100\text{ m}$  است. بنابراین، با استفاده از رابطه  $R = \rho L / A$  برای مقاومت سیم مسی خواهیم داشت:

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

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

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



(ب) تصویری از یک مقاومت پیچیده‌ای

شکل ۳-۱۱

#### ۱- مقاومت‌های پیچیده<sup>۱</sup> شامل پیچیده‌ای از یک سیم نازک هستند که معمولاً جنس آنها

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

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

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

یکی از انواع مشهور این نوع از مقاومت‌ها، **رئوستا<sup>۴</sup>** نام دارد که در مدارهای الکترونیکی

**پتانسیومتر<sup>۵</sup>** نامیده می‌شود. این نوع مقاومت‌ها، متغیر هستند. یک رئوستا از سیمی با مقاومت

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

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

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

دهد و به این ترتیب جریان را در مدار تنظیم و کنترل کند. شکل ۳-۱۲ - الف طرحی از یک

رئوستا و شکل ۳-۱۲ - ب نماد رئوستا (یا پتانسیومتر) در مدار الکتریکی و شکل ۳-۱۲ - پ

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

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

۲- nichrome

۳- manganin

۴- Rheostat

۵- Potentiometer

## جدول ۳-۳- کد رنگی مقاومت‌ها

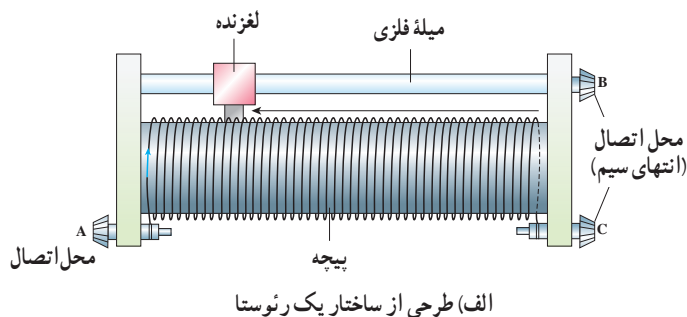
ترانس	ضریب	عدد	رنگ
	۱	۰	سیاه
۱۰ <sup>۱</sup>		۱	قهوه‌ای
۱۰ <sup>۲</sup>		۲	قرمز
۱۰ <sup>۳</sup>		۳	نارنجی
۱۰ <sup>۴</sup>		۴	زرد
۱۰ <sup>۵</sup>		۵	سبز
۱۰ <sup>۶</sup>		۶	آبی
۱۰ <sup>۷</sup>		۷	بنفش
۱۰ <sup>۸</sup>		۸	خاکستری
۱۰ <sup>۹</sup>		۹	سفید
۵٪	۱۰ <sup>-۱</sup>		طلایی
۱۰٪	۱۰ <sup>-۲</sup>		نقره‌ای
۲۰٪			بی‌رنگ



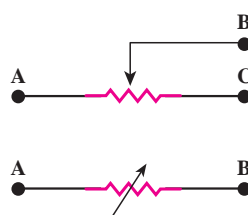
رئوستا



پتانسیومتر



(الف) طرحی از ساختار یک رئوستا

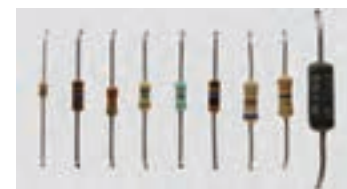


(ب) نماد یک رئوستا یا پتانسیومتر در مدار الکتریکی

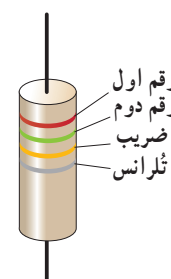
(پ) شکل واقعی یک رئوستا و یک پتانسیومتر

## شکل ۳-۱۱

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



شکل ۳-۱۳ تصویری از تعدادی مقاومت ترکیبی



شکل ۳-۱۴ مقدار مقاومت‌های ترکیبی با کدهای رنگی مشخص می‌شود؛ مثلاً مقدار مقاومت شکل ۲۵kΩ با تولرانس ۱۰ درصد است.

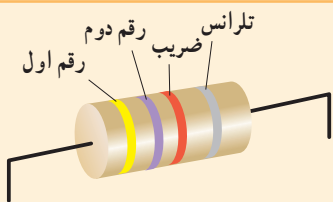
۱- composition resistors

۲- اندازه استاندارد آنها عمدتاً به صورت زیر است:

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

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

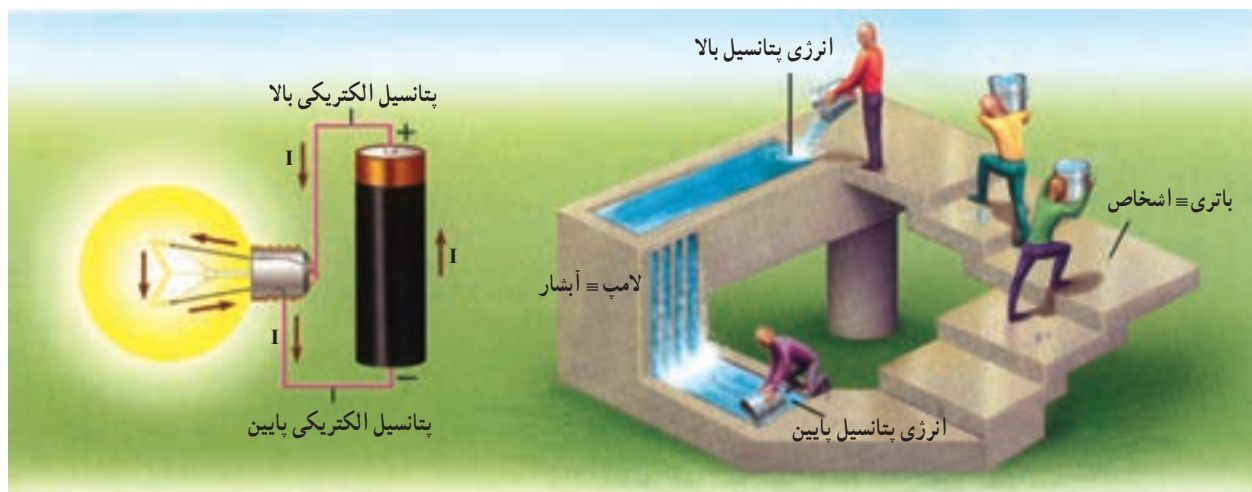
۳- tolerance



مقدار مقاومت نشان داده شده در شکل چقدر است؟

### ۳-۴- نیروی محرکه الکتریکی و مدارها

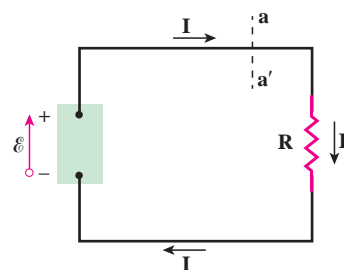
**نیروی محرکه الکتریکی:** اگر بخواهیم بارهای الکتریکی را از یک مقاومت الکتریکی عبور دهیم، باید بین دو سر مقاومت یک اختلاف پتانسیل برقرار کنیم. در واقع برای این کار به یک پمپ یا تلمبه بار نیاز داریم تا جریانی ثابت از بارهای الکتریکی را برقرار کند. چنین وسیله‌ای که با انجام کار روی بار الکتریکی اختلاف پتانسیل را ثابت نگه می‌دارد **منبع نیروی محرکه الکتریکی** نامیده می‌شود. در واقع این وسیله با صرف انرژی، بارهای الکتریکی مثبت را از پتانسیل پایین تر به پتانسیل بالاتر سوق می‌دهد و سبب شارش آنها می‌شود. باتری‌ها، پیل‌های سوختی و مولدهای الکتریکی از جمله منابع‌های نیروی محرکه الکتریکی هستند که در زندگی روزمره کاربرد فراوانی دارند. کار منبع نیروی محرکه الکتریکی مانند کار تلمبه‌ای است که آب را از سطح زمین یا عمق چاه به ارتفاع معین بالا می‌برد. به این ترتیب، آب انرژی پتانسیل لازم را برای جریان یافتن و انجام کاری معین کسب می‌کند. در داخل این وسیله‌ها منبع انرژی‌ای وجود دارد که با حرکت دادن بارهای مثبت در خلاف جهت میدان الکتریکی، روی آنها کار انجام می‌دهد. شکل ۳-۱۵ مشابهت‌سازی را بین جریان آب در یک فرایند مکانیکی و حرکت بار در یک مدار الکتریکی نشان می‌دهد. در این شکل اشخاص نقش باتری را در مدار الکتریکی بازی می‌کنند و سقوط آب مشابه روشن شدن لامپ مدار است.



شکل ۳-۱۵ مشابهت‌سازی یک مدار الکتریکی با فرایندی مکانیکی که در آن آب به‌طور مکانیکی جریان می‌یابد.



اکنون مدار ساده الکتریکی شکل ۳-۱۶ را در نظر بگیرید. در هر بازه زمانی  $\Delta t$ ، بار  $\Delta q$  از هر مقطع این مدار (مثلاً  $aa'$ ) می‌گذرد. همین تعداد بار باید به پایانه با پتانسیل پایین تر منبع نیروی محرکه الکتریکی وارد شود و از پایانه با پتانسیل بالاتر آن خارج گردد. این وسیله باید کاری به اندازه  $\Delta W$  روی بار  $\Delta q$  انجام دهد تا آن را در این مسیر به حرکت درآورد. کاری که منبع نیروی محرکه الکتریکی روی واحد بار الکتریکی مثبت انجام می‌دهد تا در مدار جریان یابد اصطلاحاً نیروی محرکه الکتریکی (emf) نامیده و با رابطه زیر تعریف می‌شود:



شکل ۱۷-۳

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta W}{\Delta q} \quad (۴-۳)$$

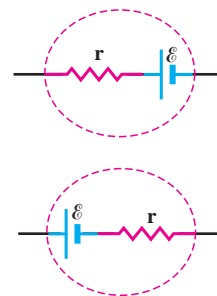
به عبارت دیگر، نیروی محرکه الکتریکی یک منبع نیروی محرکه الکتریکی عبارت از کاری است که روی واحد بار مثبت انجام می‌شود تا آن را از پایانه‌ای با پتانسیل کمتر به پایانه‌ای با پتانسیل بیشتر ببرد<sup>۱</sup>.

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

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

$$V_a - V_b = \mathcal{E} \quad (۵-۳)$$

ولی منبع آرمانی در واقعیت وجود ندارد و این منابع دارای مقاومتی داخلی (درونی) هستند. یعنی درون آنها مقاومتی در برابر حرکت بارها وجود دارد. بنابراین، وقتی جریان از این منابع بگذرد اختلاف پتانسیل بین پایانه‌های آنها برخلاف منابع آرمانی، متفاوت از نیروی محرکه الکتریکی خواهد شد. به این منابع نیروی محرکه، منبع نیروی محرکه واقعی می‌گویند و آنها را در مدارهای الکتریکی به دو صورت شکل ۳-۱۷ نشان می‌دهند که در آن  $r$  مقاومت داخلی منبع نیروی محرکه است. در بخش بعد رابطه اختلاف پتانسیل دو سر یک منبع نیروی محرکه واقعی را خواهیم دید.



شکل ۱۷-۳ در مدارهای الکتریکی، منبع نیروی محرکه الکتریکی را به یکی از این دو صورت نمایش می‌دهند.

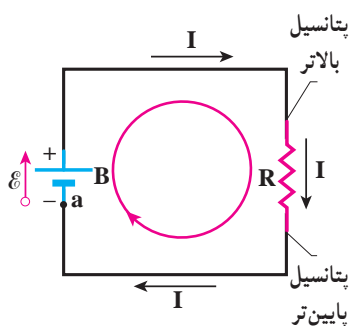
۱- توجه کنید که واژه نیروی محرکه الکتریکی واژه نامناسبی است؛ زیرا emf نیرو نیست، بلکه مانند پتانسیل یک کمیت انرژی به ازای واحد بار است. نماد نیروی محرکه الکتریکی  $\mathcal{E}$  است که فونت خاصی از حروف E یونانی می‌باشد.



## آثار تخریبی الکتریسیته بر بدن انسان

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

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



## مدار تک‌حلقه‌ای و افت پتانسیل در مقاومت : مدار ساده تک‌حلقه‌ای شکل ۳-۱۸

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

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

شکل ۳-۱۸ مدار تک‌حلقه‌ای که در آن مقاومت R به دو سر باتری آرمانی B با نیروی محرکه  $\mathcal{E}$  بسته شده است. جریان I در کل مدار یکسان است.

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

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

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

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

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

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

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

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

اکنون اگر باتری آرمانی مدار ساده شکل ۳-۱۸ را با یک باتری واقعی که دارای مقاومت داخلی  $r$  است جایگزین کنیم (شکل ۳-۱۹)، با به کار بستن قاعده حلقه به رابطه زیر می‌رسیم:

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

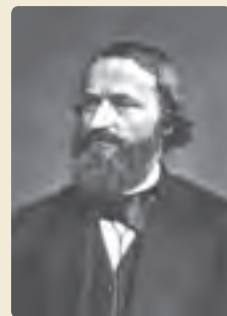
همچنین می‌توانیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری را نیز به دست آوریم. اگر از نقطه  $a$  در جهت جریان  $I$  به سمت نقطه  $b$  حرکت کنیم می‌توانیم با در نظر گرفتن اختلاف پتانسیل‌ها رابطه زیر را بنویسیم:

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

و یا

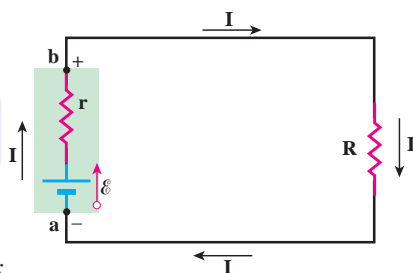
$$V_b - V_a = \mathcal{E} - Ir \quad (3-6)$$

همان‌طور که دیدیم در رابطه ۳-۶،  $\mathcal{E}$  نیروی محرکه باتری و  $Ir$  افت پتانسیل درون باتری است. تفاوت یک باتری نو و فرسوده در مقدار مقاومت داخلی آن است که ممکن است کمتر از  $1 \Omega$  برای باتری نو تا  $1000 \Omega$  یا بیشتر برای باتری فرسوده باشد.



گوستاو کیرشهوف

**گوستاو رابرت کیرشهوف** در ۱۲ مارس سال ۱۸۲۴ میلادی (۱۲۰۳ هجری شمسی) در شهر واقع در غرب آلمان کنونی به دنیا آمد. کیرشهوف سهمی اساسی در درک مدارهای الکتریکی، طیف‌نگاری، ترمودینامیک و تابش اجسام گرم داشته است. در واقع او نخستین کسی بود که واژه جسم سیاه را در سال ۱۸۶۲ به کار برد و دو قانون مهم در نظریه مدارهای الکتریکی و ترمودینامیک به افتخار او نام‌گذاری شده است. کیرشهوف قانون مدارهای الکتریکی خود را در سال ۱۸۴۵ در حالی بی‌ریزی کرد که دانشجوی دانشگاه آلبرتوس بود. او قانون تابش گرمایی خود را در سال ۱۸۵۹ پیشنهاد داد و در سال ۱۸۶۱ اثبات کرد. او سپس عازم دانشگاه هایدلبرگ شد و در آنجا کارهای بدیعی در طیف‌نگاری به انجام رسانید. کیرشهوف سرانجام در سال ۱۸۸۷ میلادی (۱۲۶۶ هجری شمسی) در سن ۶۳ سالگی در برلین دیده از جهان فرو بست.



**شکل ۳-۱۹:** مدار تک حلقه‌ای شکل ۳-۱۸ که باتری آرمانی آن با یک باتری واقعی جایگزین شده است.

۱- Gustav Robert Kirchhoff

## مثال ۳-۳

در مدار شکل ۳-۱۹ فرض کنید  $\mathcal{E} = 12V$ ،  $r = 2/\Omega$  و  $R = 4/\Omega$  باشد.

الف) جریان عبوری از مدار چقدر است؟

ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری را محاسبه کنید.

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

می‌بندیم:

۱- هرگاه در مدار در جهت جریان از مقاومت  $R$  یا  $r$  بگذریم، پتانسیل به اندازه  $IR$  یا  $Ir$  کاهش می‌یابد و اگر در خلاف جهت

جریان حرکت کنیم پتانسیل به همان اندازه‌ها افزایش می‌یابد.

۲- جهت نیروی محرکه الکتریکی باتری‌ها همواره از پایانه منفی به طرف پایانه مثبت است، بنابراین هرگاه از پایانه منفی به

طرف پایانه مثبت حرکت کنیم پتانسیل به اندازه نیروی محرکه الکتریکی باتری افزایش می‌یابد و اگر در خلاف این جهت (یعنی از

پایانه مثبت به منفی) حرکت کنیم پتانسیل به اندازه نیروی محرکه باتری کاهش می‌یابد.

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

حلقه داریم:

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

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

و در نتیجه:

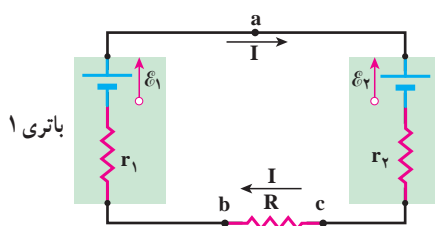
ب) اختلاف پتانسیل دوسر باتری برابر است با:

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

## تمرین ۳-۳

مثال ۳-۵ را با حرکت در خلاف جهت جریان نشان داده شده حل و نتیجه را با پاسخ مثال مقایسه کنید.

## مثال ۳-۴



مدار شکل روبه‌رو را در نظر بگیرید. مقادیر نیروهای محرکه الکتریکی

و مقاومت‌های مدار عبارت‌اند از:

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

الف) جریان عبوری از مدار چقدر است؟

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

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

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

و از آنجا

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

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

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

در نتیجه

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

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

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

در نتیجه

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

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

### ۳-۵- توان در مدارهای الکتریکی

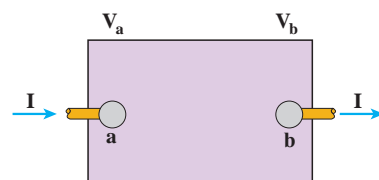
اکنون می‌خواهیم رابطه‌هایی برای انرژی و توان در مدارهای الکتریکی به دست آوریم. جعبه شکل ۳-۲ و ۳-۲ یک عنصر مداری را نشان می‌دهد که می‌تواند باتری، مقاومت و یا هر چیز دیگری باشد که اختلاف پتانسیلی بین پایانه‌های آن برقرار است. فرض کنید بار  $\Delta q$  در مدت زمان  $\Delta t$  تحت اختلاف پتانسیل  $\Delta V = V_b - V_a$  از پایانه  $a$  به پایانه  $b$  این جزء مدار برود. در فصل پیش دیدیم کار نیروی خارجی برای چنین انتقالی برابر با  $W = (\Delta q)(\Delta V)$  است. از طرفی توان الکتریکی، آهنگ انجام این کار است:

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

$$P = I\Delta V$$

$$(3-7)$$

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



**شکل ۳۰-۲** یک جزء مدار که اختلاف پتانسیلی بین دو سر آن برقرار است.

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

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

### جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

**توان الکتریکی مصرفی در یک مقاومت :** همان طور که گفتیم رابطه ۳-۷ برای مقاومت های الکتریکی نیز برقرار است. برای محاسبه مقدار توان مصرفی کافی است در این رابطه به جای  $\Delta V$  از رابطه تعریف مقاومت ( $R = \Delta V/I$ ) استفاده کنیم :

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

در نتیجه :

$$P_{\text{مصرفی}} = RI^2 \quad (۸-۳)$$

$$P_{\text{مصرفی}} = \frac{(\Delta V)^2}{R} \quad (۹-۳)$$

در برخی از کتاب ها، مرسوم است که رابطه ۳-۹ را به صورت  $P_{\text{مصرفی}} = V^2/R$  می نویسند که در آن  $V$  همان اختلاف پتانسیل دوسر مقاومت است.

### فعالیت ۲-۳

تحقیق کنید چرا در خطوط انتقال برق، انرژی الکتریکی به جای اینکه با جریان بالا و ولتاژ پایین انتقال یابد با ولتاژ بالا و جریان پایین منتقل می شود.

**راهنمایی :** به تفاوت توان تولیدی و توان مصرفی بیندیشید.

### فعالیت ۳-۳



الف) با یک اهم متر، مقاومت رشته سیم داخل لامپ ۱۰۰ واتی خاموش را اندازه گیری کنید. سپس با استفاده از رابطه ۳-۹ و با داشتن مشخصات روی لامپ، مقاومت آن را در حالت روشن محاسبه کنید. نتیجه محاسبه را با مقدار اندازه گیری مقایسه کنید و نتیجه را پس از بحث گروهی گزارش دهید.

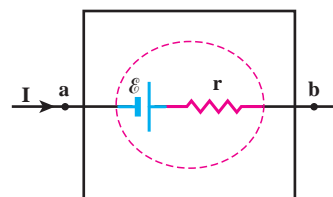
ب) اکنون با استفاده از نتیجه به دست آمده دمای رشته سیم داخل لامپ را در حال روشن برآورد کنید (رشته سیم لامپ از جنس تنگستن است که ضریب دمایی آن در جدول ۳-۱ داده شده است).

**توان خروجی منبع نیروی محرکه :** همان طور که گفتیم رابطه ۳-۷ ( $P=I\Delta V$ ) برای منابع نیروی محرکه مانند باتری نیز برقرار است. از طرفی اختلاف پتانسیل دوسر یک باتری واقعی را در بخش پیش به دست آوردیم و دیدیم که برای شکلی مانند شکل ۳-۲۱ به صورت  $\mathcal{E} - Ir$  می شود. با قرار دادن این

اختلاف پتانسیل در رابطه توان الکتریکی خواهیم داشت :

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

$$P_{\text{خروجی}} = \mathcal{E}I - rI^2 \quad (۱۰-۳)$$



شکل ۳-۱۱ توان خروجی از باتری

شکل از رابطه  $P = (V_b - V_a)I$  به دست می آید.

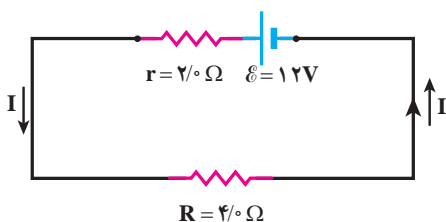
اکنون می خواهیم بدانیم معنای جمله های  $\mathcal{E}I$  و  $rI^2$  چیست. ساده تر آن است که نخست جمله دوم را تفسیر کنیم. همان طور که پیش تر دیدیم این جمله توان مصرفی در یک مقاومت است که در اینجا مقاومت درونی باتری است. بنابراین،  $rI^2$  آهنگ اتلاف انرژی الکتریکی در مقاومت داخلی منبع نیروی محرکه است. اکنون به تفسیر جمله اول ( $\mathcal{E}I$ ) می پردازیم. دیدیم که نیروی محرکه الکتریکی طبق رابطه ۳-۱۰ برابر

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

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

که این همان توان تولیدی منبع نیروی محرکه است. بنابراین، توان خروجی منبع شکل ۳-۲۱ تفاضل توان تولیدی منبع از توانی است که در مقاومت داخلی منبع نیروی محرکه مصرف می شود.

### مثال ۷-۳



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

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

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

اکنون توان الکتریکی خروجی از باتری با استفاده از رابطه ۳-۱۰ چنین می شود :

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

توان الکتریکی مصرفی در مقاومت ۴ اهمی با استفاده از رابطه ۳-۸ برابر است با

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

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

### مثال ۸-۳

در مثال ۳-۶ توان هریک از اجزای مدار را محاسبه کنید.

پاسخ: توان مصرفی در مقاومت  $R = 8/5\Omega$  با استفاده از رابطه ۳-۸ چنین می شود :

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

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

توان خروجی باتری ۱ را با استفاده از رابطه ۳-۱۰ محاسبه می کنیم :

## جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم

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

اما توان باتری ۲ از رابطه ۳-۱ به دست نمی‌آید، چرا که همان‌طور که دیدیم اختلاف پتانسیل دوسر باتری ۲ از رابطه ۷ ( $P = I\Delta V$ )، باید اختلاف پتانسیل  $V_c - V_a$  را در نظر بگیریم که  $-(\mathcal{E}_2 + Ir_2)$  می‌شود. بنابراین، مقدار (قدر مطلق) توان ورودی به باتری ۲ چنین می‌شود:

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

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

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

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

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

## ۳-۶- به هم بستن متوالی مقاومت‌ها

شکل ۳-۲۲ سه مقاومت را نشان می‌دهد که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی با نیروی محرکه الکتریکی  $\mathcal{E}$  بسته شده‌اند. توجه کنید واژه «متوالی» ربط چندانی به چگونگی رسم مقاومت‌ها ندارد. «متوالی» به معنای بسته شدن مقاومت‌ها یکی پس از دیگری است به طوری که هیچ انشعابی بین آنها وجود نداشته باشد و اختلاف پتانسیل  $V$  به دوسر این مجموعه از مقاومت‌ها اعمال شده باشد. در بستن متوالی مقاومت‌ها از همه مقاومت‌ها جریان یکسان  $I$  عبور می‌کند. مقاومت‌هایی را که به‌طور متوالی بسته شده‌اند می‌توان با یک مقاومت معادل  $R_{eq}$  جایگزین کرد که دارای همان جریان  $I$  و اختلاف پتانسیل کل اعمال شده به دوسر مجموعه مقاومت‌هاست. بنابراین، در اینجا به دو صورت می‌توان عمل کرد که البته معادل یکدیگرند. یکی آنکه اختلاف پتانسیل کل را برابر با مجموع اختلاف پتانسیل‌های مقاومت‌ها در نظر بگیریم:

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

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

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

و در نتیجه

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

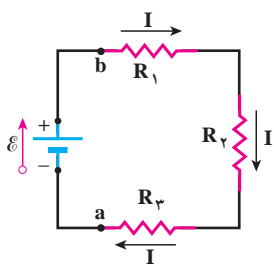
و از آنجا جریان  $I$  چنین می‌شود:

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

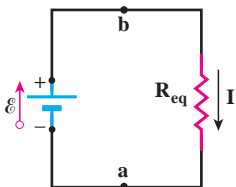
بنابراین، با تعریف مقاومت معادل:

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

شکل مدار ۳-۲۲ به مدار معادل شکل ۳-۲۳ تبدیل می‌شود. بدیهی است که اگر به جای سه



شکل ۳-۲۲ سه مقاومت که به‌طور متوالی به یک باتری آرمانی متصل شده‌اند.



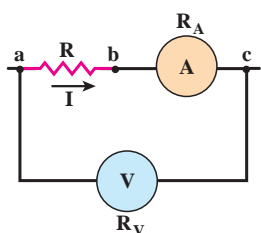
شکل ۳-۲۳ مدار معادل شکل ۳-۲۲ که در آن سه مقاومت با مقاومت  $R_{eq}$  جایگزین شده‌اند.

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

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (3-11)$$

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

### مثال ۹-۳



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

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

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

با توجه به اینکه  $R_{eq} = R + R_A$  و  $R_A = 20 \Omega$  است مقاومت مجهول برابر با  $R = 100 \Omega$  می‌شود.

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

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

$$P = RI^2 = (100 \Omega)(0.1 \text{ A})^2 = 1 \text{ W}$$

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

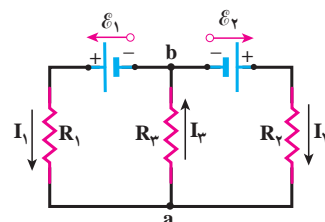
**قاعده انشعاب کیرشهوف:** شکل ۲۴-۳ مداری را نشان می‌دهد که شامل بیش از یک حلقه

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

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

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

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



شکل ۳-۲۴ یک مدار چندحلقه‌ای که شامل سه شاخه است.



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

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

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

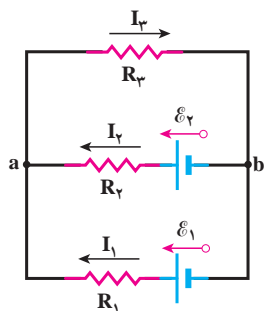
بنابراین، اگر قاعده انشعاب را مثلاً برای نقطه  $a$  بنویسیم با توجه به جهت جریان‌های اختیاری

خواهیم داشت:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

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

### مثال ۱-۳



در مدار شکل روبه‌رو مقاومت‌ها عبارت‌اند از:

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

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

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

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

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

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

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

یا

$$-I_3(1\Omega) + 7V - I_2(2\Omega) = 0$$

در نتیجه

$$I_2(2\Omega) + I_3(1\Omega) = 7V$$

(۱)

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

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

یا

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

در نتیجه

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

(۲)

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

$$I_1 + I_2 = I_3$$

(۳)

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

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

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

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

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

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

### بستن مقاومت‌ها به صورت موازی: شکل ۳-۲۵ یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد که

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

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

مجموعه مقاومت‌هایی که به این روش متصل شده‌اند را می‌توان با یک مقاومت معادل  $R_{eq}$  جایگزین

کرد که دارای همان اختلاف پتانسیل  $V$  و جریان کلی است که از مقاومت‌ها می‌گذرد. برای یافتن عبارتی برای نخست از قاعده انشعاب (قاعده جریان‌های) کیرشهوف استفاده می‌کنیم. اگر این قاعده را برای نقطه  $a$  شکل به کار گیریم خواهیم داشت:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

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

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

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

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

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

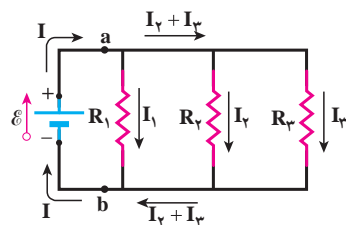
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

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

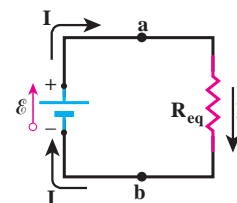
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (12-3)$$

شکل مدار ۳-۲۵ به مدار معادل شکل ۳-۲۶ تبدیل می‌شود. توجه کنید هرگاه چند مقاومت به صورت

موازی به هم بسته شوند، مقاومت معادل آنها کوچک‌تر از هریک از مقاومت‌های موجود در آن ترکیب است؛ و نیز توان الکتریکی مصرفی مقاومت معادل با مجموع توان‌های الکتریکی مصرفی از آنها برابر است.

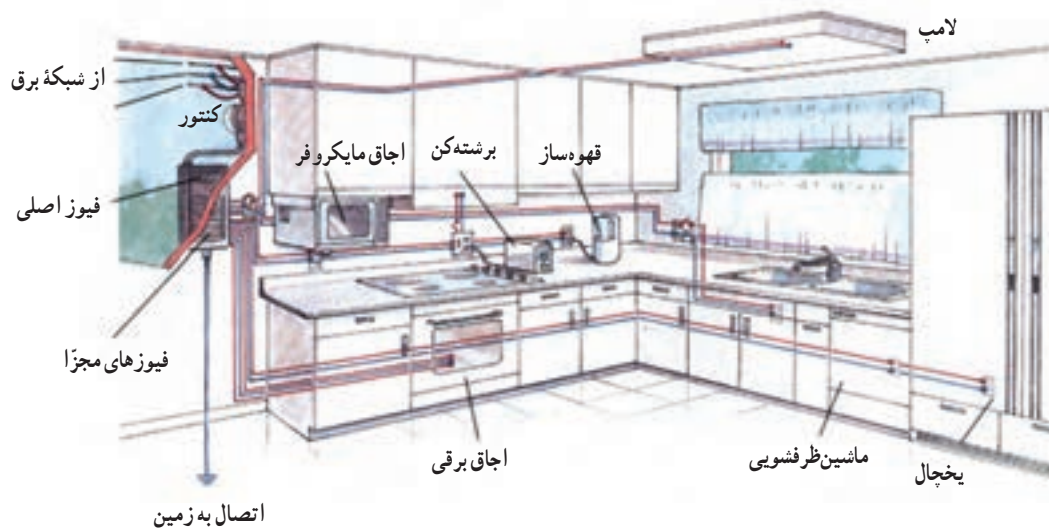


شکل ۳-۲۵ مداری شامل سه مقاومت که به صورت موازی به نقطه‌های  $a$  و  $b$  بسته شده‌اند.



شکل ۳-۲۶ مدار معادل شکل ۳-۲۵ که در آن سه مقاومت با مقاومت معادل  $R_{eq}$  جایگزین شده است.

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



شکلی نوعی از سیم‌کشی در یک آشپزخانه

**پاسخ:** در سیم‌کشی منازل، همه مصرف‌کننده‌ها به‌طور موازی متصل می‌شوند (چرا؟) بنابراین، مقاومت معادل این مصرف‌کننده‌ها از رابطه  $3-12$  به دست می‌آید. به این منظور لازم است مقاومت اجزای مدار را به‌طور جداگانه محاسبه کنیم. با توجه به اینکه اختلاف پتانسیل دوسر مجموعه و توان هریک از مصرف‌کننده‌ها را داریم، مقاومت هر مصرف‌کننده به راحتی با استفاده از رابطه  $P = V^2/R$  به دست می‌آید:

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

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

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

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

بنابراین، مقاومت معادل این مدار چنین می‌شود:

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

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

و در نتیجه

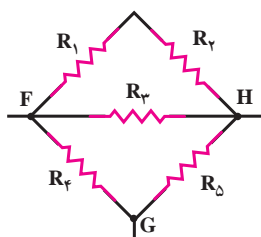
اکنون می‌توانیم جریان عبوری از مقاومت معادل را محاسبه کنیم:

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

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

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

## مثال ۳-۱۲

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

F و H و (ب) F و G را بیابید.

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

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{eq}} &= \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{45}} = \frac{1}{5/0^\circ \Omega + 5/0^\circ \Omega} + \frac{1}{5/0^\circ \Omega} + \frac{1}{5/0^\circ \Omega + 5/0^\circ \Omega} \\ &= \frac{2}{5/0^\circ \Omega} = 0.4 \Omega^{-1} \end{aligned}$$

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

در نتیجه

ب) اکنون همچون قسمت الف،  $R_1$  و  $R_2$  متوالی‌اند و مقاومت معادل آنها نیز با  $R_3$  موازی است؛ ولی در اینجا مقاومت معادل این سه مقاومت با مقاومت  $R_6$  متوالی و مقاومت معادل کل آنها با مقاومت  $R_7$  موازی است. بنابراین برای مقاومت معادل کل داریم:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_{1235}} \quad (1)$$

که در آن  $R_{1235}$  خود برابر است با

$$R_{1235} = R_{12} + R_5 \quad (2)$$

و  $R_{12}$  خود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{5/0^\circ \Omega + 5/0^\circ \Omega} + \frac{1}{5/0^\circ \Omega} = \frac{3}{10/0^\circ \Omega}$$

$$R_{12} = \frac{10/0^\circ \Omega}{3} = 3.33 \Omega$$

در نتیجه

اکنون با استفاده از رابطه (۲) داریم:

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

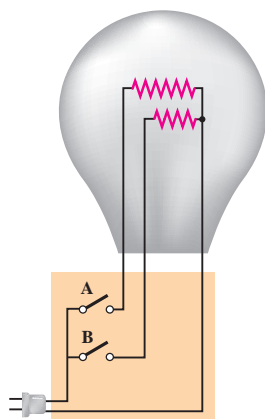
که با قرار دادن در رابطه (۱)،  $R_{eq}$  را چنین به دست می‌دهد:

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

و در نتیجه

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

### مثال ۱۳-۳



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

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

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

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

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

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

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

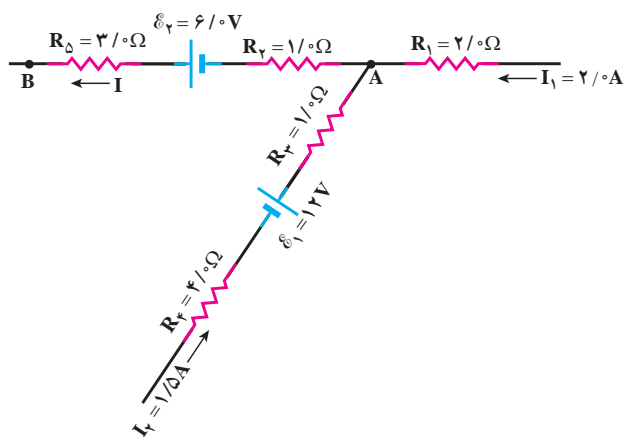
بنابراین، مقاومت مجهول  $R_2$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

در نتیجه

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

## مثال ۳-۱۱



شکل روبه‌رو قسمتی از یک مدار را نشان می‌دهد.  $V_A - V_B$  را محاسبه کنید.

**پاسخ:** با استفاده از قانون انشعاب در نقطه A داریم:

$$I = I_1 + I_T = 2/0 \text{ A} + 1/0 \text{ A} = 3/0 \text{ A}$$

از طرفی برای با حرکت در جهت جریان I از نقطه

A به B داریم:

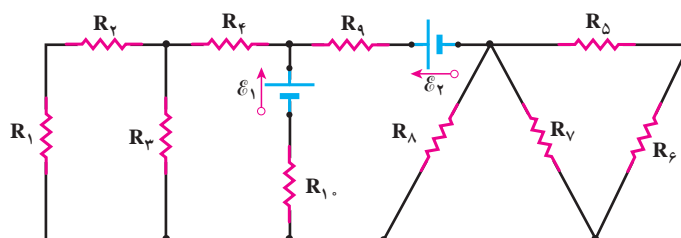
$$V_A - IR_T + \mathcal{E}_T - IR_D = V_B$$

$$\Rightarrow V_A - V_B = I(R_T + R_D) - \mathcal{E}_T$$

$$= (3/0 \text{ A})(1/0 \Omega + 3/0 \Omega) - 6/0 \text{ V} = 8/0 \text{ V}$$

## مثال ۳-۱۲

در مدار شکل زیر توانی را که هر باتری به مدار می‌دهد، محاسبه کنید.



در این شکل، مقادیر مقاومت‌ها و نیروهای محرکه الکتریکی باتری‌ها عبارت‌اند از:

$$R_1 = 3/0 \Omega, R_T = 1/0 \Omega,$$

$$R_T = 4/0 \Omega, R_T = 2/0 \Omega$$

$$R_D = 3/0 \Omega, R_F = 3/0 \Omega,$$

$$R_V = 2/0 \Omega, R_A = 3/0 \Omega$$

$$R_1 = 3/0 \Omega, R_1 = 6/0 \Omega,$$

$$\mathcal{E}_1 = 12 \text{ V}, \mathcal{E}_2 = 6/0 \text{ V}$$

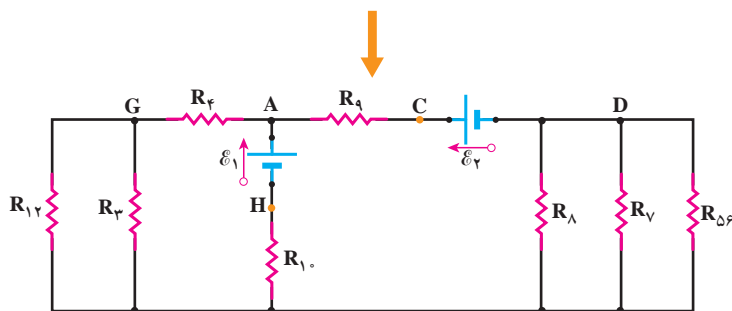
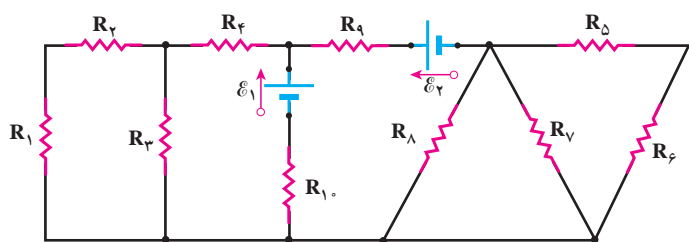
**پاسخ:** مدار شکل مسئله را تا آنجا که ممکن است ساده می‌کنیم و به ترتیب به مدارهای شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) می‌رسیم.

بدیهی است که مقادیر مقاومت‌های  $R_{1234}$  و  $R_{56789}$  براساس روابط مقاومت‌های معادل متوالی و موازی به‌دست آمده است و یک

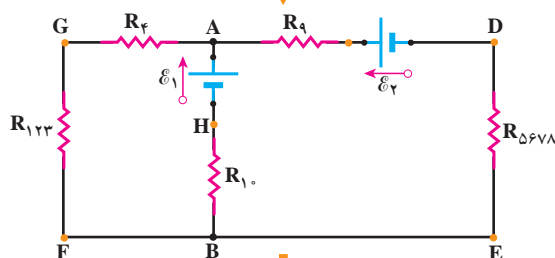
محاسبه ساده نشان می‌دهد که مقادیر آنها عبارت‌اند از:

$$R_{56789} = 4/0 \Omega \text{ و } R_{1234} = 4/0 \Omega$$

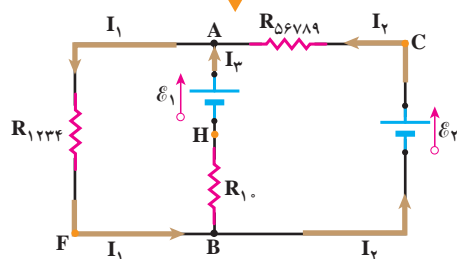
## جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



شکل ۱



شکل ۲



شکل ۳

افزون بر این، مقاومت  $R_1$  و نیروهای محرکه الکتریکی مدار همان‌هایی است که در صورت مسئله داده شده‌اند.

اکنون مدار ساده شده شکل (۳) را با استفاده از قواعد کیرشهوف حل می‌کنیم. حلقه‌ها را به طور ساعتگرد از نقطه  $A$  می‌پیماییم. نخست حلقه سمت چپ را در نظر بگیرید. با استفاده از قاعده حلقه داریم:

$$- \mathcal{E}_1 + I_r R_1 + I_1 R_{1232} = 0$$

در نتیجه

$$4/0 I_1 - 12 + 6/0 I_r = 0 \quad (1)$$

سپس حلقه سمت راست را در نظر بگیرید.

اکنون با استفاده از قاعده حلقه داریم:

$$R_{5678} I_r - \mathcal{E}_2 - I_r R_1 - \mathcal{E}_1 = 0$$

در نتیجه

$$-6/0 I_r + 12 + 4/0 I_r - 6/0 = 0 \quad (2)$$

و از طرفی از قاعده انشعاب در نقطه  $A$

داریم:

$$I_r + I_r = I_1 \quad (3)$$

با حل دستگاه معادله‌های (۱) و (۲) و (۳)

$$\begin{cases} 4I_1 + 6I_r = 12 \\ 4I_r - 6I_1 = -6 \\ I_r + I_1 = I_1 \end{cases}$$

خواهیم داشت:

$$I_1 = 1/3 \text{ A}, \quad I_r = 0/2 \text{ A}, \quad I_r = 1/1 \text{ A}$$

هدف مسئله محاسبه توان باتری هاست. به این منظور از رابطه  $P = I\Delta V$  استفاده می‌کنیم.

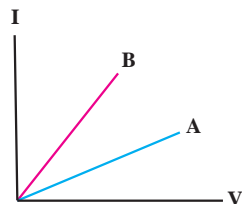
$$P_{\text{باتری } 1} = I_r (V_A - V_H) = I_r \mathcal{E}_1 = (1/1 \text{ A})(12 \text{ V}) = 12 \text{ W}$$

$$P_{\text{باتری } 2} = I_r (V_C - V_B) = I_r \mathcal{E}_2 = (0/2 \text{ A})(6/0 \text{ V}) = 1/2 \text{ W}$$

اکنون خوب است که به عنوان تمرین نشان دهید مجموع توان‌های مصرفی در مقاومت‌ها برابر با مجموع توان باتری‌ها می‌شود.

## پرسش‌ها

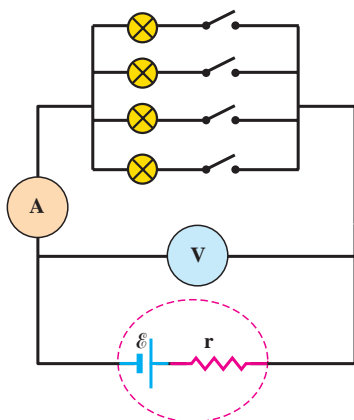
- ۱ ولت‌سنج مناسب برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در یک مدار چه ویژگی‌ای باید داشته باشد؟ اگر ولت‌سنج مناسب نباشد، آنچه اندازه‌گیری می‌شود با اندازه واقعی چه تفاوتی دارد؟ پرسش بالا را در مورد آمپرسنج مناسب هم بررسی کنید.
- ۲ اختلاف پتانسیل دو سر باتری خودروهای سواری برابر ۱۲ ولت است. اگر هشت باتری قلمی ۱/۵ ولتی را به طور متوالی به یکدیگر وصل کنیم، اختلاف پتانسیل دو سر مجموعه آنها نیز برابر ۱۲ ولت می‌شود. توضیح دهید چرا در خودروها به جای باتری خودرو از هشت باتری قلمی استفاده نمی‌شود.



- ۳ شکل روبه‌رو نمودار  $I-V$  را برای دو نوع رسانا نشان می‌دهد. مقاومت کدام یک بیشتر است؟

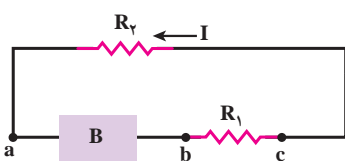
- ۴ برای مدار شکل ۳-۱۹، نمودار تغییرات ولتاژ دوسر مولد را برحسب جریانی که از آن می‌گذرد به طور کیفی رسم کنید.

- ۵ لامپ‌های یک درخت زینتی، به طور متوالی متصل شده‌اند. اگر یکی از لامپ‌ها بسوزد، چه اتفاقی می‌افتد؟ به نظر شما چرا همه چراغ‌های خودرو (چراغ‌های جلو، عقب و ...) به طور موازی بسته می‌شوند؟

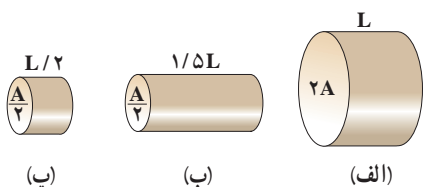


- ۶ در شکل روبه‌رو، تعدادی لامپ مشابه به طور موازی به هم متصل شده‌اند و هر لامپ با کلیدی همراه است. بررسی کنید که با بستن کلیدها یکی پس از دیگری، عددی که آمپرسنج و ولت‌سنج نشان می‌دهند، چه تغییری می‌کند؟

- ۷ دو مقاومت مساوی  $R$  را یک‌بار به طور متوالی و بار دیگر به طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و آنها را هر بار به ولتاژ  $V$  وصل می‌کنیم. نسبت توان مصرف شده در حالت موازی به توان مصرف شده در حالت متوالی چقدر است؟



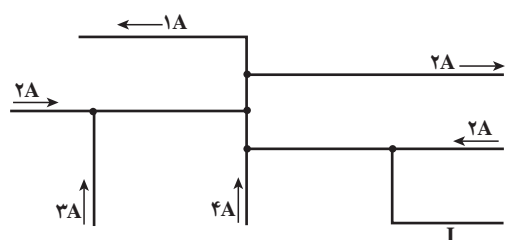
- ۸ شکل روبه‌رو جریان  $I$  را در یک مدار تک حلقه‌ای با باتری  $B$  و مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  (و سیم‌هایی با مقاومت ناچیز) نشان می‌دهد. الف) آیا جهت پیکان نیروی محرکه در  $B$  به سمت چپ است یا به سمت راست؟ در نقاط  $a$ ،  $b$ ،  $c$ ، ب) بزرگی جریان (پ) پتانسیل الکتریکی و ت) انرژی پتانسیل الکتریکی حامل‌های بار مثبت را به گونه‌ای مرتب کنید که بیشترین مقدار در ابتدا باشد.



- ۹ شکل روبه‌رو، سه رسانای مسی استوانه‌ای را همراه با مساحت‌های مقطع و طول آنها نشان می‌دهد. این رساناها را برحسب جریانی که با اعمال اختلاف پتانسیل  $V$  یکسانی به دوسر آنها ایجاد می‌شود به گونه‌ای مرتب کنید که بیشترین مقدار در ابتدا باشد.

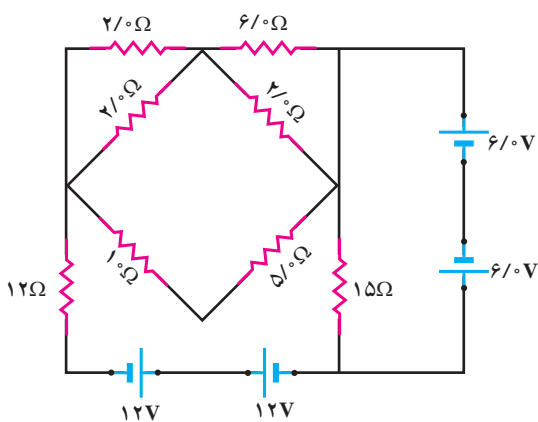
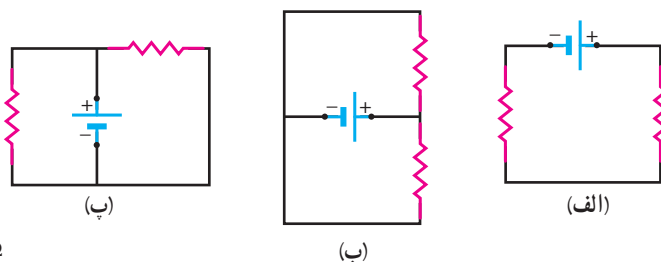


جریان الکتریکی و مدارهای جریان مستقیم



۱۰ شکل روبه‌رو بخشی از یک مدار را نشان می‌دهد. بزرگی و جهت جریان I در سیم پایین سمت راست چیست؟

۱۱ در شکل‌های زیر، آیا مقاومت‌ها به‌طور متوالی بسته شده‌اند یا موازی و یا هیچ کدام؟

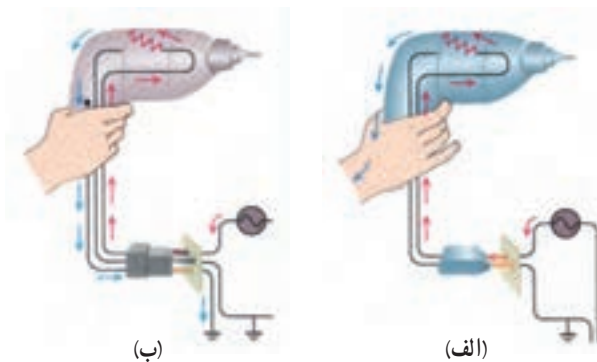


۱۲ در شکل داده شده، جریان عبوری از مقاومت‌های  $10\Omega$  و  $15\Omega$  چقدر است؟ (برای پاسخ دادن به نحوه بستن باتری‌ها توجه کنید.)

۱۳ چرا وقتی باتری خودرو فرسوده می‌شود، با آنکه تغییر محسوسی در نیروی محرکه آن ایجاد نشده است، نمی‌تواند به راحتی خودرو را روشن کند؟

\* ۱۴ چرا باتری‌های فرسوده در روزهای سرد زمستانی نمی‌توانند خودرو را روشن کنند؟ به گمان شما چطور می‌توان این مشکل را حل کرد؟

\* ۱۵ بررسی کنید اگر مت‌برقی (دریل) معیوب شکل‌های زیر را با دوشاخه (شکل الف) یا سه‌شاخه (شکل ب) به پریز وصل کنیم، چه رخ می‌دهد؟ (نماد  $\perp$  اتصال به زمین را نشان می‌دهد که به آن پتانسیل صفر اختصاص می‌دهند.)



## مسئله‌ها



۱ لامپ یک چراغ قوه معمولی در  $30^\circ\text{C}$  و  $2/9\text{V}$  کار می‌کند. اگر مقاومت رشته تنگستنی این لامپ در دمای اتاق ( $20^\circ\text{C}$ ) برابر  $1/1\ \Omega$  باشد، دمای این رشته وقتی که لامپ روشن است، چقدر می‌شود؟

۲ دو رسانا از یک ماده ساخته شده‌اند و طول یکسانی دارند. رسانای A سیم توپری به قطر  $1/0\ \text{mm}$  است. رسانای B لوله‌ای توخالی به شعاع خارجی  $2/0\ \text{mm}$  و شعاع داخلی  $1/0\ \text{mm}$  است. مقاومت رسانای A چند برابر مقاومت رسانای B است؟ (مقاومت‌ها نسبت به دو سر رساناها اندازه‌گیری شده‌اند.)



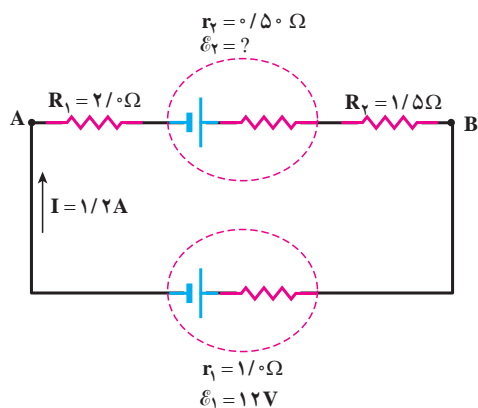
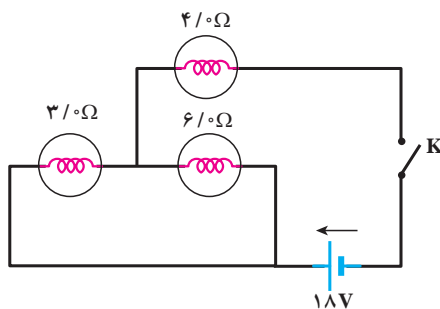
۳ در ماشین‌های چمن‌زنی برقی برای مسافت‌های حداکثر تا  $35\ \text{m}$  از سیم‌های مسی نمره  $20$  (قطر  $0/8\ \text{cm}$ ) و برای مسافت‌های طولانی‌تر از سیم‌های ضخیم‌تر نمره  $16$  (قطر  $0/13\ \text{cm}$ ) استفاده می‌کنند تا بدین وسیله مقاومت سیم را تا آنجا که ممکن است کوچک نگه دارند. الف) مقاومت یک سیم  $30$  متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ ب) مقاومت یک سیم  $70$  متری ماشین چمن‌زنی چقدر است؟ (دمای سیم‌ها را  $20^\circ\text{C}$  در نظر بگیرید.)

۴ سه مقاومت مشابه  $12$  اهمی را یک‌بار به‌طور متوالی و بار دیگر به‌طور موازی به یکدیگر می‌بندیم و به اختلاف پتانسیل  $12$  ولت وصل می‌کنیم. در هر بار، چه جریانی از هر مقاومت می‌گذرد؟

۵ دو مقاومت موازی  $6/0$  اهمی و  $12$  اهمی به‌طور متوالی به یک مقاومت  $2/0$  اهمی وصل شده است. اکنون، مدار را به دو سر یک باتری  $36$  ولتی با مقاومت داخلی ناچیز می‌بندیم. توان مصرفی در مقاومت  $6/0$  اهمی را محاسبه کنید.

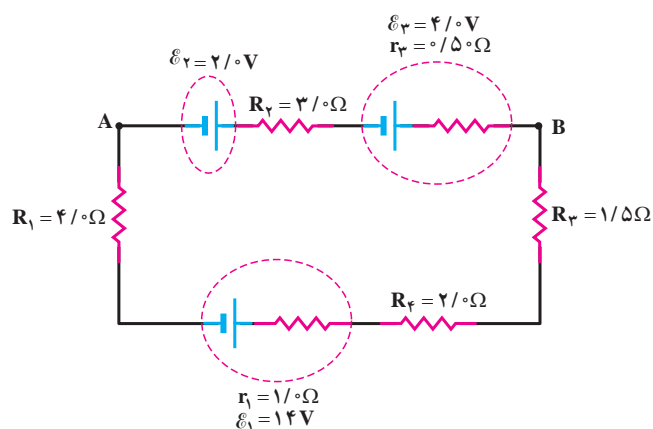
۶ از مقاومت‌های موازی  $4/0\ \Omega$ ،  $6/0\ \Omega$  و  $12\ \Omega$  جریان کل  $21\ \text{A}$  عبور می‌کند. جریان عبوری از مقاومت  $6/0\ \Omega$  چقدر است؟

۷ در شکل زیر، وقتی کلید بسته شود چه جریانی از هر لامپ می‌گذرد؟ (مقاومت داخلی، ناچیز است.)

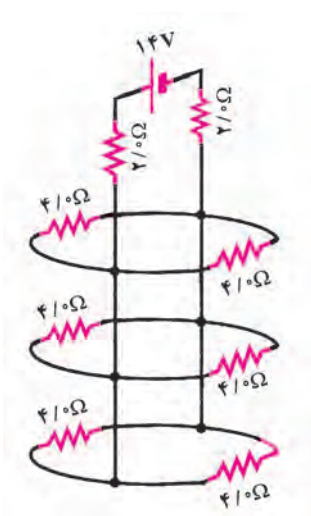


۸ در مدار شکل روبه‌رو جریان در جهت نشان داده شده  $1/2\ \text{A}$  است. الف) نیروی محرکه  $\mathcal{E}_2$  و  $V_A - V_B$  چقدر است؟ ب) انرژی مصرف شده در  $R_1$  و  $R_2$  در مدت  $5/0$  ثانیه چقدر است؟

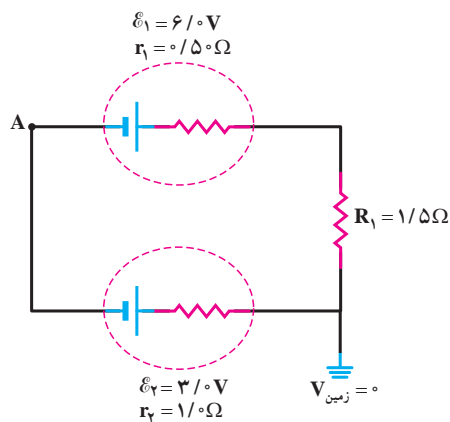
۹ در مدار شکل زیر جریان در مدار و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه A و B ( $V_B - V_A$ ) را محاسبه کنید.

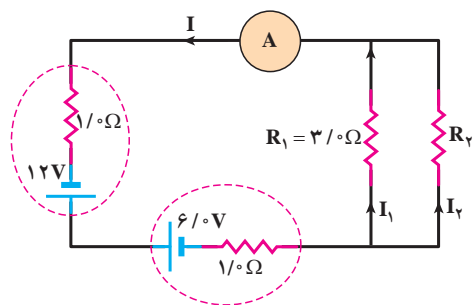


۱۰ جریانی که از منبع نیروی محرکه آرمانی و هر یک از مقاومت‌های شکل زیر می‌گذرد، چقدر است؟

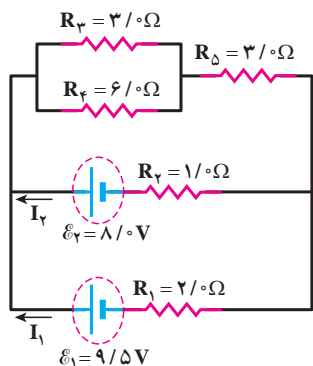


۱۱ در شکل زیر پتانسیل نقطه A را محاسبه کنید. (نماد  $\perp$  اتصال به زمین را نشان می‌دهد که به آن پتانسیل  $V_{\text{زمین}} = 0$  اختصاص می‌دهند.)

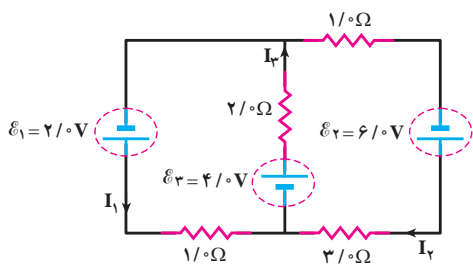




۱۲ جریانی که آمپرسنج در مدار شکل روبه‌رو نشان می‌دهد، برابر  $2/0\text{ A}$  است. الف) مقاومت  $R_2$  ب) توان مصرفی هر یک از دو مقاومت را حساب کنید.

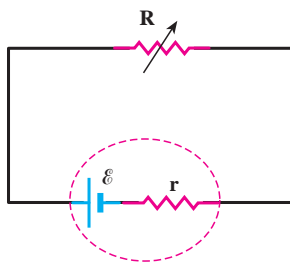


۱۳ در مدار شکل روبه‌رو جریان در هر باتری و توان مصرفی کل مقاومت‌های  $R_3$  و  $R_4$  و  $R_5$  را به‌دست آورید.

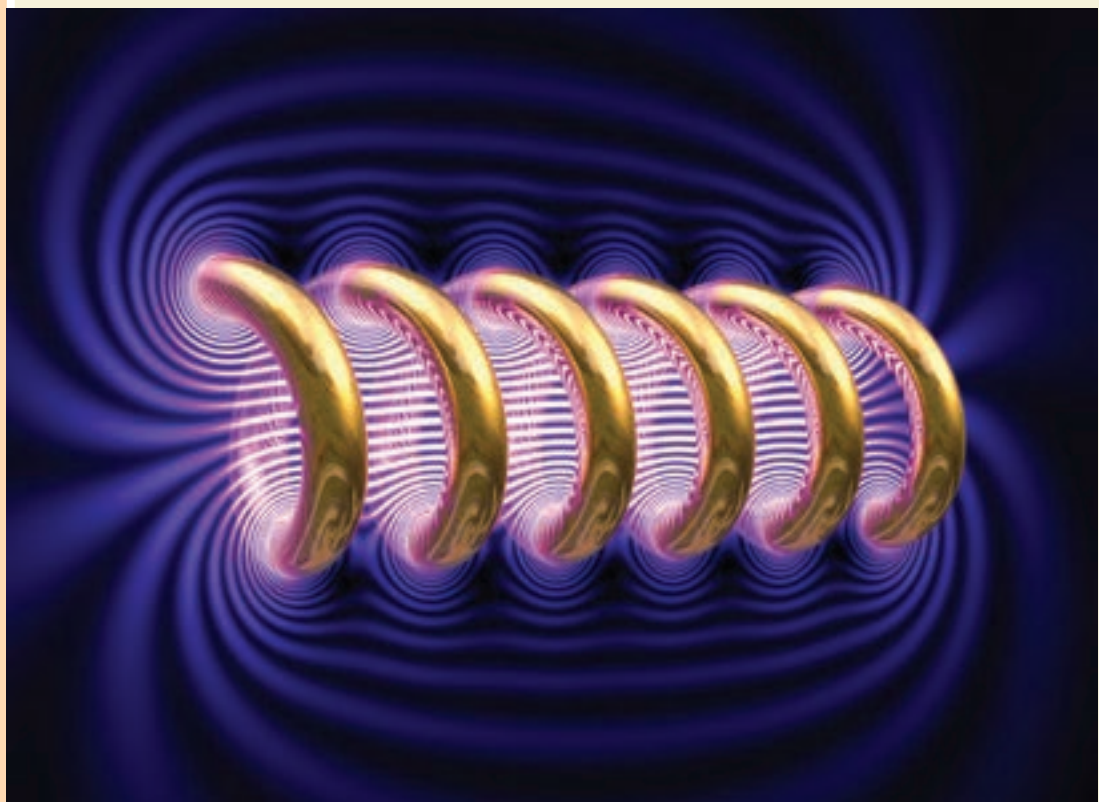


۱۴ در مدار شکل روبه‌رو جریان  $I_1$  چند آمپر است؟

۱۵ در شکل زیر نیروی محرکه الکتریکی و مقاومت داخلی منبع را که توان خروجی آن به ازای  $I_1 = 5/0\text{ A}$  برابر  $9/50\text{ W}$  و به ازای  $I_2 = 7/0\text{ A}$  برابر  $12/6\text{ W}$  است، محاسبه کنید.



# میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی



در فضای اطراف هر رسانای حامل جریان میدان مغناطیسی به وجود می‌آید.

اگر تاکنون یک اسباب بازی مغناطیسی یا یک قطب نما را به کار برده باشید، یا آهنربایی را برای نگهداشتن یک ورق کاغذ روی بدنه یخچال مورد استفاده قرار داده باشید، احتمالاً از مشاهده پدیده های مربوط به آن، شگفت زده شده اید! آهنرباها برای بسیاری از ما جذابیت خاصی دارند.

کاربردهای مغناطیس در جنبه های مختلف زندگی بشر رشدی روزافزون دارد. برای بیش از یک قرن ضبط صدا و تصویر روی صفحه ها و نوارهایی صورت می گرفت که مغناطیس نقش اصلی را در آنها ایفا می کرد. اگرچه فناوری دیجیتال به میزان زیادی جایگزین ضبط مغناطیسی به شیوه های سنتی شده است، با وجود این، ذخیره اطلاعات به صورت صفر و یک هنوز هم به محیط های مغناطیسی وابسته است.

مغناطیس و آهنرباها همچنین در بلندگوی گوشی ها، تلویزیون ها، رایانه ها و اغلب سامانه های هشدار ایمنی کاربرد دارد. پزشکی امروز نیز در تشخیص بیماری ها و جراحی های مختلف بهره فراوانی از مغناطیس و آثار آن می برد (شکل ۱-۴).

### ۱-۴- مغناطیس و قطب های مغناطیسی

یونانیان باستان، بیش از ۲۵۰۰ سال پیش با پدیده آهنربایی آشنا بودند. تالس که اغلب از او به عنوان پدر علم یونان یاد می شود، ماده کانی مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ) را که ویژگی آهنربایی دارد می شناخت (شکل ۲-۴). همان گونه که می دانید، ماده هایی که این ویژگی را دارند آهنربا می نامند. چینی های باستان نیز با ویژگی های مغناطیسی برخی از سنگ های آهنربا آشنایی داشتند و تکه هایی از این سنگ ها را به صورت قطب نماهای ساده در دریانوردی به کار می بردند.

در سال های گذشته دیدید که هرگاه آهنربایی را درون ظرف محتوی براده آهن فرو ببریم، براده های آهن به مقدار زیادی جذب ناحیه های خاصی از آهنربا می شوند. این ناحیه ها را **قطب های مغناطیسی** یا **قطب های آهنربا** می نامند (شکل ۳-۴).

هرگاه یک آهنربای میله ای را با ریسمان از مرکزش طوری بیاویزیم که بتواند آزادانه بچرخد، یک سر آن به سوی شمال قرار می گیرد (شکل ۴-۴). این سر را قطب شمال یا قطب N و سر دیگر را قطب جنوب یا قطب S می نامند.



شکل ۴-۴ آهنربا در این وضعیت مانند یک قطب نما رفتار می کند.



شکل ۱-۴ با بهره گیری از دستگاه های MRI<sup>۱</sup> می توان جزئیات بافت نرم (مانند تصویر پایی که در اینجا نشان داده شده است) را دید که در تصویربرداری پرتو X قابل مشاهده نیست.



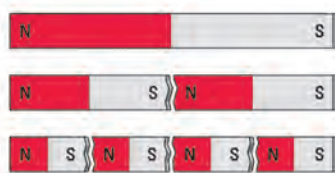
شکل ۲-۴ پدیده های مغناطیسی حدود ۲۵۰۰ سال پیش در تکه هایی از سنگ آهن مغناطیده در نزدیکی شهر مگنسیا (که نام امروزی آن مانیسا و در غرب ترکیه واقع است) مشاهده شد. این تکه ها نمونه هایی هستند از چیزی که امروز آهنربای دائمی خوانده می شود.



شکل ۳-۴ در یک آهنربا، به هر شکلی که باشد، دو ناحیه وجود دارد که خاصیت مغناطیسی در آنها بیش از قسمت های دیگر است.



### میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی

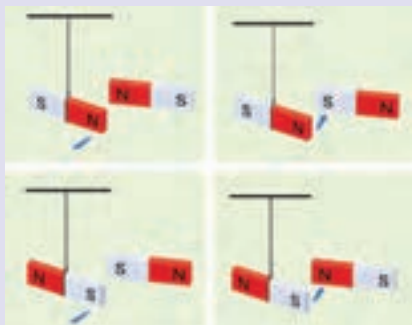


شکل ۴-۵ شکستن یک آهنربای

میله‌ای به دو بخش. هر بخش یک آهنربای کامل است که دو قطب دارد.

تمام آهنرباها هم قطب N دارند و هم قطب S. اگر یک آهنربای میله‌ای را دو قسمت کنید، هر بخش آن دوباره دارای دو قطب آهنربایی است (شکل ۴-۵). اگر باز هم آنها را به دو بخش تقسیم کنید، چهار آهنربای کامل خواهید داشت. می‌توانید تقسیم کردن را ادامه دهید، ولی هرگز یک قطب تنها یا به عبارتی دیگر **تک قطبی مغناطیسی** نخواهید داشت. حتی وقتی قطعه شما به اندازه یک اتم برسد، دو قطب دارد که نشان می‌دهد خود اتم نیز می‌تواند یک آهنربا باشد!

### پرسش ۱-۴



با توجه به شکل روبه‌رو عبارت زیر را با کلمه‌های مناسب کامل کنید. وقتی قطب‌های همنام دو آهنربا را به یکدیگر نزدیک می‌کنیم، یکدیگر را ..... اما اگر قطب‌های ناهمنام آنها را به یکدیگر نزدیک کنیم، یکدیگر را .....

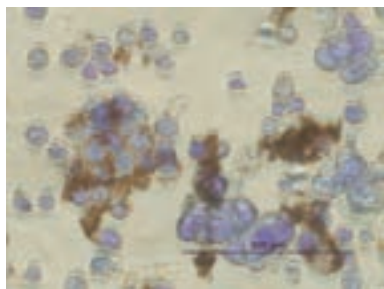
### فعالیت ۱-۴



عقربه قطب‌نما آهنربای کوچکی است که می‌تواند آزادانه دور محور خود بچرخد.

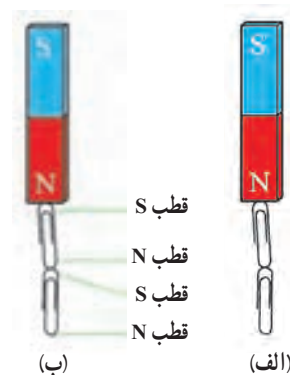
الف) چند آهنربا به شکل‌های مختلف انتخاب کنید. به کمک مقداری براده آهن یا تعدادی سوزن ته‌گرد، محل قطب‌های هر یک از آهنرباها را تعیین کنید.  
ب) قطب‌نماهایی که در بانوردان و کوهنوردان برای تعیین جهت به کار می‌برند، در واقع یک آهنربای میله‌ای نازک است که روی پایه‌ای سوار شده است و می‌تواند آزادانه بچرخد و جهت‌های تقریبی شمال و جنوب جغرافیایی را نشان دهد (شکل روبه‌رو). آزمایشی طراحی کنید و به کمک آن، یک قطب‌نمای ساده بسازید و جهت تقریبی شمال و جنوب مکانی را که در آن زندگی می‌کنید تعیین کنید.

### نانو ذره‌های مغناطیسی برای درمان



لکه‌های تیره در تصویر میکروسکوپی روبه‌رو، باخته (سلول)‌های سرطانی هستند که از توموری جدا شده‌اند و خطر پخش آنها در سرتاسر بدن بیمار وجود دارد. در یک روش تجربی برای مبارزه با این باخته‌ها از ذره‌های یک ماده مغناطیسی استفاده می‌شود که به بدن تزریق می‌شوند. این ذره‌ها با ماده شیمیایی خاصی پوشیده شده‌اند که به‌طور ترجیحی به سلول‌های سرطانی متصل می‌شوند. سپس با استفاده از یک آهنربا در بیرون از بدن بیمار، این ذره‌ها بیرون «رانده» می‌شوند و سلول‌های سرطانی را با خود می‌برند.

**القای مغناطیسی:** شکل ۴-۶ الف آهنربایی را نشان می‌دهد که دو گیره آهنی کاغذ را جذب کرده است. این تجربه ساده نشان می‌دهد که ویژگی مغناطیسی درگیره‌های فلزی القا شده است و تا زمانی که گیره‌ها با آهنربا در تماس باشند، این ویژگی را در خود حفظ می‌کنند. این پدیده را **القای مغناطیسی** می‌نامند. ویژگی آهنربایی ناشی از القای مغناطیسی همواره به صورتی است که قطعه‌های آهنی جذب آهنربای اصلی می‌شوند (شکل ۴-۶ ب). القای مغناطیسی تنها در آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهایی از این عناصر تولید می‌شود. در بخش پایانی همین فصل، با تفصیل بیشتری با مواد مغناطیسی و ویژگی‌های آنها آشنا خواهیم شد.



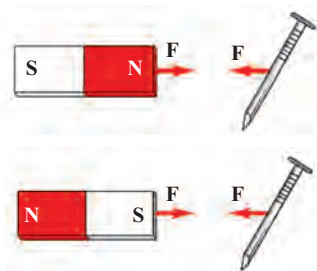
**شکل ۴-۶ الف** - وقتی آهنربایی در نزد یک گیره آهنی قرار می‌گیرد در آنها خاصیت مغناطیسی القا می‌کند. ب - در پدیده القای مغناطیسی همواره جذب وجود دارد. (به قطب‌های القا شده درگیره‌ها توجه کنید.)

### پرسش ۲-۴

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

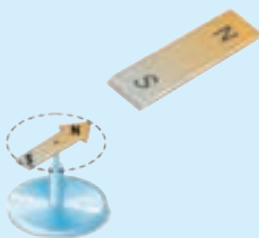
### ۲-۴ میدان مغناطیسی

با نزدیک کردن آهنربا به میخ آهنی مشاهده می‌کنید که میخ به طرف آهنربا حرکت می‌کند و پس از مدت کوتاهی جذب آن می‌شود (شکل ۴-۷). برای توجیه این پدیده، مشابه آنچه درباره اجسام باردار دیدید، می‌گوییم در فضای اطراف آهنربا **میدان مغناطیسی** وجود دارد. میدان مغناطیسی نیز مانند میدان الکتریکی که در فصل ۲ با آن آشنا شدید، کمیتی برداری است و آن را با نماد  $\vec{B}$  نمایش می‌دهیم.



**شکل ۴-۷** اطراف یک آهنربا میدان مغناطیسی وجود دارد به طوری که هر جسم آهنی مانند میخ را به سوی خود جذب می‌کند.

### فعالیت ۲-۴

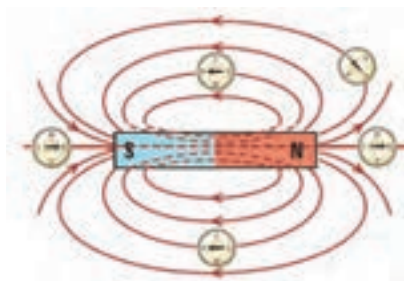


یکی از قطب‌های یک آهنربای میله‌ای را به یک عقربه مغناطیسی که روی پایه‌ای قرار دارد، نزدیک کنید (شکل روبه‌رو). آنچه را می‌بینید بیان کنید. با دور کردن آهنربا از عقربه مغناطیسی چه اتفاقی می‌افتد؟ چرا؟ (در صورتی که عقربه مغناطیسی در اختیار ندارید، سوزن ته‌گردی را از یک طرف، چند بار به آهنربایی مالش دهید و آن را روی سطح آب شناور سازید. به این ترتیب سوزن ته‌گرد مانند یک عقربه مغناطیسی رفتار می‌کند!)



### میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی

به کمک عقربه مغناطیسی می‌توان جهت میدان مغناطیسی را در هر نقطه از فضای اطراف یک آهنربا تعیین کرد (شکل ۴-۸).



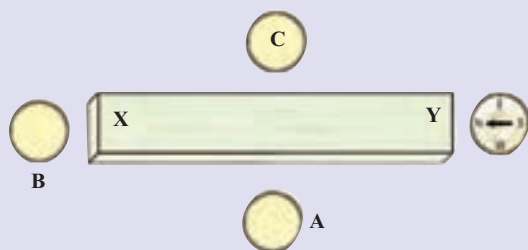
شکل ۴-۸ تعیین جهت میدان مغناطیسی به کمک عقربه مغناطیسی



شکل ۴-۹ خط‌های میدان مغناطیسی در هر نقطه در جهت عقربه مغناطیسی هستند و از قطب N خارج و به قطب S وارد می‌شوند.

بنابر تعریف، بردار میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای پیرامون یک آهنربا در جهتی است که وقتی قطب N عقربه مغناطیسی در آن نقطه قرار می‌گیرد، آن جهت را نشان می‌دهد. با تعیین جهت میدان مغناطیسی در هر نقطه از فضای اطراف آهنربا، می‌توان همان‌گونه که برای میدان الکتریکی انجام دادیم، خط‌های میدان مغناطیسی را رسم کنیم. شکل ۴-۹ خط‌های میدان مغناطیسی را در اطراف یک آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد. این خط‌ها از آهنربا می‌گذرند و هر یک از آنها یک حلقه بسته را تشکیل می‌دهند. افزون بر اینها، خط‌های میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب‌ها به یکدیگر نزدیک‌ترند. هر گاه در ناحیه‌ای از فضا جهت و بزرگی میدان مغناطیسی تغییر نکند، میدان مغناطیسی در این ناحیه یکنواخت است.

### پرسش ۳-۴



شکل روبه‌رو یک آهنربای میله‌ای و چهار عقربه مغناطیسی را نشان می‌دهد که جهت‌گیری یکی از آنها مشخص شده است. الف) کدام سر آهنربا قطب S و کدام سر قطب N است؟ ب) جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی را در نقطه‌های A و B و C تعیین کنید.

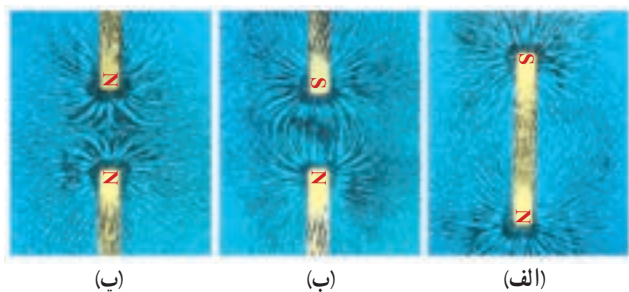
### آزمایش ۱-۴

#### مشاهده طرح خطوط میدان مغناطیسی

**هدف آزمایش:** مشاهده طرح خط‌های میدان مغناطیسی با استفاده از براده آهن  
**وسایلهای آزمایش:** آهنربای میله‌ای (دو عدد)، براده آهن، یک ورقه شیشه‌ای یا مقوایی، نمک پاش (یا وسیله دیگری برای پاشیدن براده آهن)

#### شرح آزمایش:

- یکی از آهنرباهای میله‌ای را روی میز قرار دهید و صفحه شیشه‌ای (یا مقوایی) را روی آن بگذارید.
- به کمک نمک پاش براده آهن را به‌طور یکنواخت به ضخامت خیلی کم روی شیشه پاشید.



(ب)

(ب)

(الف)

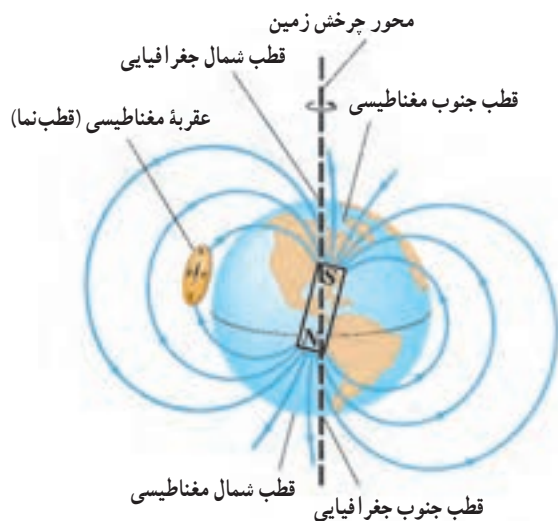
۳- چند ضربه آرام به صفحه شیشه‌ای بزنید تا براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار گیرند. طرحی که روی صفحه شیشه‌ای پدیدار می‌شود، نقشه‌ای از خط‌های میدان مغناطیسی یک آهنربای میله‌ای است (شکل الف).

۴- مراحل بالا را برای دو آهنربای میله‌ای که به ترتیب: قطب‌های ناهمنام و قطب‌های همنام آنها به یکدیگر نزدیک‌اند انجام دهید (شکل‌های ب و پ).

### پرسش ۴-۱۴

با استفاده از ویژگی القای مغناطیسی، توضیح دهید که چرا در آزمایش ۴-۱ براده‌های آهن در راستای خط‌های میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند.

**میدان مغناطیسی زمین:** زمین یک آهنربای عظیم و طرح خط‌های میدان مغناطیسی آن مانند آهنربای میله‌ای بزرگی است که در نزدیکی مرکز زمین قرار دارد (شکل ۴-۱). قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند. در واقع، قطب‌های مغناطیسی و جغرافیایی زمین فاصله نسبتاً زیادی از یکدیگر دارند. مثلاً قطب جنوب مغناطیسی تقریباً در فاصله  $180^\circ$  کیلومتری قطب شمال جغرافیایی قرار دارد. این بدان معناست که عقربه مغناطیسی در جهت شمال واقعی جغرافیایی قرار نمی‌گیرد و تا حدودی از شمال جغرافیایی انحراف دارد. این انحراف وابسته به مکان را **میل مغناطیسی** می‌نامند.



**شکل ۴-۱:** طرح ساده‌ای از میدان مغناطیسی زمین. عقربه مغناطیسی در هر نقطه در امتداد این خط‌های میدان قرار می‌گیرد. نشان دادن خط‌های میدان مغناطیسی زمین به صورت خط‌های میدان یک آهنربای میله‌ای، تنها یک توجیه ساده از ساختار پیچیده و ناشناخته عوامل ایجاد میدان مغناطیسی زمین است. شواهد زمین شناختی نشان می‌دهند که جهت این میدان در بازه‌های زمانی نامنظم از  $10^4$  تا  $10^6$  سال به طور کامل و آرون می‌شود.

## مطالعه آزاد

خرچنگ خاردار کارائیب در برابر میدان‌های مغناطیسی بسیار حساس است. این جاندار یک «قطب‌نمای» مغناطیسی درونی دارد که تشخیص شمال، جنوب، شرق و غرب را برایش امکان‌پذیر می‌کند. این خرچنگ همچنین می‌تواند تفاوت اندک در میدان مغناطیسی زمین از مکانی به مکان دیگر را حس کند و از این تفاوت، در یافتن مسیر خود بهره بگیرد.



## ۳-۴- نیروی مغناطیسی وارد بر رسانای حامل جریان

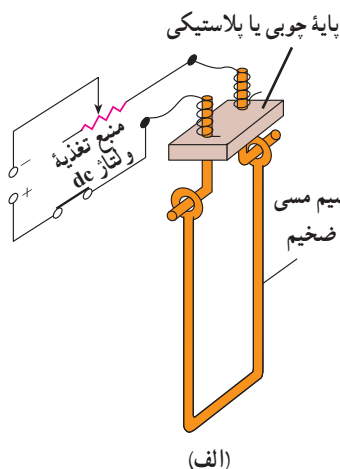
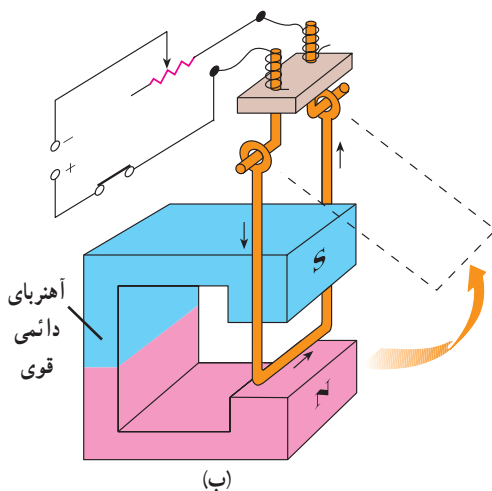
دیدیم که هرگاه یک عقربه مغناطیسی یا هر آهنربای دیگری در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بر آن نیرو وارد می‌شود. در ادامه خواهیم دید که بر سیم‌های حامل جریان الکتریکی نیز در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود، اندازه میدان مغناطیسی و یکای آن را می‌توان با استفاده از این اثر تعریف کرد. برای مشاهده این نیرو، آزمایش زیر را انجام دهید.

## آزمایش ۲-۴

## بررسی اثر میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان

وسایله‌های آزمایش: یک آهنربای نعلی شکل قوی، سیم مسی ضخیم، سیم رابط، رئوستا و منبع تغذیه  
شرح آزمایش:

- ۱- مداری مطابق شکل الف ببندید.
- ۲- آهنربای نعلی شکل را مطابق شکل ب در اطراف سیم مسی قرار دهید.
- ۳- کلید را ببندید تا جریان از سیم مسی بگذرد. آنچه را که مشاهده می‌کنید، بنویسید.
- ۴- این آزمایش را چند بار تکرار کنید و هر بار آهنربا را در وضعیت جدیدی در اطراف سیم مسی قرار دهید و با بستن کلید، مشاهده‌های خود را یادداشت کنید.
- ۵- این آزمایش را با یک آهنربای دیگر تکرار کنید.
- ۶- اندازه و جهت جریان الکتریکی را تغییر دهید و آزمایش‌های بالا را تکرار کنید.
- ۷- نتیجه آزمایش را به کلاس گزارش دهید.

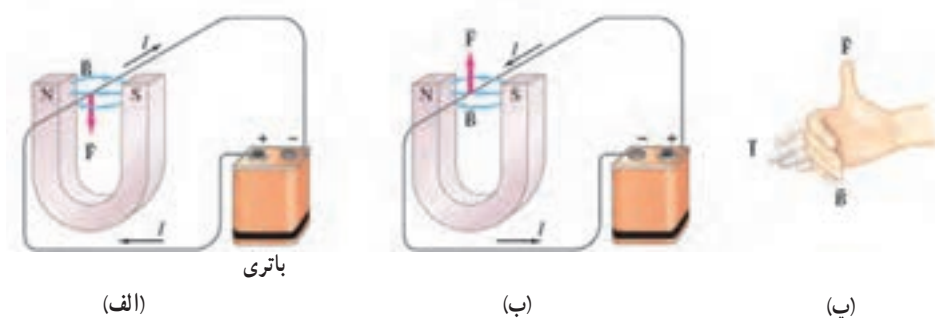


اورستد (فیزیکدان دانمارکی) با انجام آزمایش‌هایی شبیه آزمایش ۲-۴ و اندازه‌گیری دقیق نیرویی که بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود، نشان داد:

نیروی که در میدان مغناطیسی بر سیم حامل جریان الکتریکی وارد می‌شود، بر راستای سیم و نیز بر راستای میدان مغناطیسی عمود است.

جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی را می‌توان با استفاده از قاعده دست راست به این صورت تعیین کرد:

اگر دست راست خود را باز نگه دارید و چهار انگشت را مطابق شکل ۴-۱۱-پ در جهت جریان بگیرید به طوری که اگر انگشتان خود را خم کنید، در جهت میدان مغناطیسی قرار گیرد در این صورت، انگشت شست شما جهت نیروی وارد بر سیم حامل جریان را نشان خواهد داد (شکل ۴-۱۱-ب).

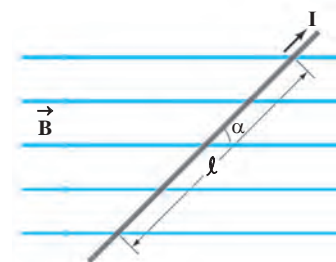


شکل ۴-۱۱ قاعده دست راست برای تعیین جهت نیروی  $\vec{F}$  وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی  $I$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$

**عامل‌های مؤثر بر نیروی مغناطیسی وارد بر رسانای حامل جریان:** آزمایش‌هایی مشابه آزمایش ۲-۴ نشان می‌دهند که بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر یک رسانای حامل جریان  $I$  در میدان مغناطیسی، به عامل‌های مختلفی بستگی دارد که این عامل‌ها در رابطه زیر بیان شده‌اند:

$$F = I\ell B \sin\alpha \quad (۱-۴)$$

در این رابطه  $\ell$  طول بخشی از سیم رساناست که در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  قرار دارد. زاویه‌ای را که جهت جریان با جهت بردار میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  می‌سازد با  $\alpha$  نشان داده‌ایم (شکل ۴-۱۲).



شکل ۴-۱۲ سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی یکنواخت. نیروی مغناطیسی وارد بر سیم عمود بر صفحه کتاب و به طرف داخل است.

### پرسش ۴-۵

اگر در شکل ۴-۱۲ سیم حامل جریان در امتداد میدان مغناطیسی قرار گیرد، نیروی مغناطیسی وارد بر آن چقدر خواهد بود؟ در چه حالتی بزرگی این نیرو بیشینه می‌شود؟



نیکولا تسلا (۱۸۵۶-۱۹۴۳) در کرواسی به دنیا آمد. بعداً او به آمریکا مهاجرت و مدتی با ادیسون همکاری کرد. ادیسون همواره با جریان مستقیم (dc) کار می‌کرد، با این وجود وی کارکردن با جریان متناوب (ac) و با ولتاژهای بسیار بالا را عملی ساخت. تسلا از اینکه جریان متناوب برای اولین بار در صندلی الکتریکی به منظور اعدام مورد استفاده قرار گرفت شدیداً ناراحت بود. وی همچنین طراح تولید برق در آبشار نیاگارا بود. به پاس خدمات وی، یکای میدان مغناطیسی در SI را تسلا نشان می‌دهند.

**یکای میدان مغناطیسی:** رابطه ۱-۴ نشان می‌دهد وقتی سیم حامل جریان عمود بر راستای میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  قرار بگیرد ( $\sin\alpha=1$ ) بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر سیم به طول  $l$  و حامل جریان  $I$ ، بیشینه می‌شود. در این صورت داریم:

$$F_{\text{بیشینه}} = I\ell B \quad (۲-۴)$$

معمولاً از رابطه ۲-۴ که به صورت  $B = \frac{F_{\text{بیشینه}}}{I\ell}$  بازنویسی می‌شود، برای تعریف یکای میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. یکای میدان مغناطیسی در SI **تسلا** نام دارد و با نماد  $T$  نشان داده می‌شود. بنا به تعریف، یک تسلا، بزرگی میدان مغناطیسی است که در آن، بر یک متر از سیمی که حامل جریان یک آمپر است و در راستای عمود بر بردار میدان قرار دارد نیرویی به بزرگی یک نیوتون وارد شود. در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$1 \text{ تسلا} = \frac{1 \text{ نیوتون}}{(1 \text{ متر}) \times (1 \text{ آمپر})}$$

تسلا یکای بزرگی است و در کاربردهای عملی از یکای کوچک‌تری به نام **گاوس** استفاده می‌کنند که با نماد  $G$  نمایش داده می‌شود.

$$1 T = 10^4 G \quad \text{یا} \quad 1 G = 10^{-4} T$$

### مثال ۱-۴

یک سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی به بزرگی  $4 \text{ mT}$  در راستایی قرار دارد که با جهت میدان زاویه  $3^\circ$  می‌سازد. اگر جریان در سیم پنج آمپر باشد، نیروی مغناطیسی وارد بر یک متر از این سیم را محاسبه کنید.  
**پاسخ:** با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$B = 4 \text{ mT} = 4 \times 10^{-3} \text{ T} = 4 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$\alpha = 3^\circ, \ell = 1 \text{ m}, I = 5 \text{ A}, F = ?$$

با قراردادن داده‌های بالا در رابطه ۱-۴ داریم:

$$\begin{aligned} F &= I\ell B \sin\alpha \\ &= (5 \text{ A})(1 \text{ m})(4 \times 10^{-5} \text{ T}) \sin 3^\circ \\ &= 1 \times 10^{-5} \text{ N} = 0.1 \text{ mN} \end{aligned}$$

این نیرو بسیار کوچک و مقدار آن تقریباً ده مرتبه از وزن یک سوزن ته‌گرد کمتر است.

## پرسش ۴-۴

سیم افقی مستقیم حامل جریانی در یک میدان مغناطیسی یکنواخت افقی که جهت آن از شمال به جنوب است، قرار دارد. جهت نیروی مغناطیسی وارد بر سیم را تعیین کنید؛ الف) اگر سیم در راستای شمال - جنوب و جریان آن از شمال به جنوب باشد. ب) اگر سیم در راستای شرق - غرب و جریان آن از غرب به شرق باشد.



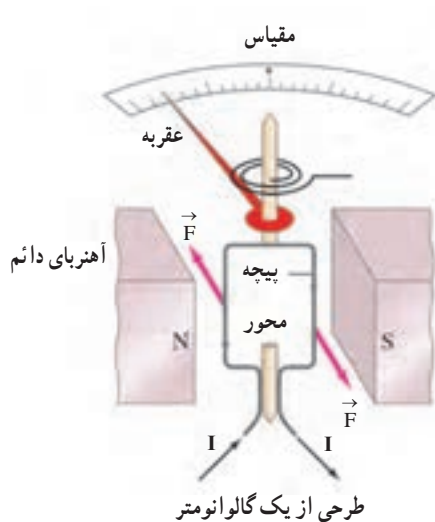
کارل فریدریش گاوس (۱۷۷۷-۱۸۵۵)، ریاضی‌دان، فیزیک‌دان و ستاره‌شناس آلمانی است که مدتی مدیر رصدخانه گوتینگن بوده است. گاوس یکی از ریاضی‌دان‌های بزرگ و برجسته‌ترین کارش در نظریه اعداد است. او به انجام محاسبه‌های بی‌اندازه بغرنج علاقه‌مند بود. وی همچنین روش‌های تازه‌ای برای محاسبه در مکانیک سماوی به دست آورد. گاوس روی پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی نیز فعالیت زیادی کرد و قانونی به نام وی در مبحث الکتریسته وجود دارد.

## تمرین ۴-۴

در قسمتی از دیوار خانه‌ای، یک سیم مستقیم  $2/5$  متری قرار دارد که در لحظه‌های معینی، حامل جریان  $1/5A$  از شرق به غرب است. بزرگی میدان مغناطیسی زمین در محل این سیم  $55^\circ$  گاوس و جهت آن از جنوب به شمال است. نیروی مغناطیسی وارد بر این سیم، با توجه به شرایط ذکر شده، چقدر است؟

## فعالیت ۳-۴

آزمایشی را طراحی کنید که به کمک آن بتوان نیروی وارد بر سیم حامل جریان الکتریکی را اندازه‌گیری کرد.



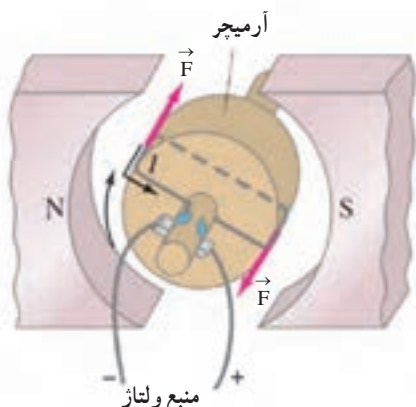
**الف) طرز کار گالوانومتر:** گالوانومتر وسیله‌ای است که با آن جریان‌های الکتریکی بسیار کوچک را اندازه می‌گیرند. امروزه وسیله‌های اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی (یعنی شدت جریان، اختلاف پتانسیل، مقاومت و ...) معمولاً عقربه‌ای یا رقمی (دیجیتالی) هستند. با استفاده از مطالبی که تاکنون فراگرفته‌ایم، می‌توان ساز و کار گالوانومتر عقربه‌ای را مورد بررسی قرار داد.

هر گالوانومتر قابی دارد که دور آن سیم پیچیده شده است. این قاب در یک میدان مغناطیسی دائمی قوی قرار دارد. وقتی جریان از این پیچ می‌گذرد، میدان مغناطیسی با وارد کردن نیرو به قاب، آن را می‌چرخاند (شکل روبه‌رو را ببینید) و عقربه متصل به قاب منحرف می‌شود. هر قدر جریان



بزرگ تر شود، چرخش پیچه و انحراف عقربه بیشتر خواهد شد.

اگر جهت جریان وارون شود، جهت چرخش پیچه و انحراف عقربه نیز وارون خواهد شد. با قطع جریان، فنر ظرفی که در پشت پیچه قرار دارد، پیچه و عقربه را به حالت اولیه خود برمی گرداند. صفحه گالوانومتر که عقربه در مقابل آن می چرخد را برحسب آمپر مدرج می کنند، به این ترتیب که در مقابل هر زاویه، اندازه جریانی که عقربه را به اندازه آن زاویه منحرف می کند، ثبت می کنند.



طرحی از یک موتور الکتریکی ساده. در این نوع از موتورهای پیچه دور یک استوانه آهنی پیچیده می شود که به آن روتور می گویند.

**ب) موتور الکتریکی:** موتورهای الکتریکی ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می کنند. این موتورها در انجام کارهای مختلف روزانه مورد استفاده قرار می گیرند، و اساس کار بسیاری از دستگاه‌ها نظیر جاروی برقی، مته برقی، آسیاب برقی، ماشین لباسشویی، پنکه و ... را تشکیل می دهند.

ساختمان برخی از موتورهای الکتریکی مانند ساختمان گالوانومتر است، از این نظر که در این نوع موتور الکتریکی نیز عبور جریان از یک قاب (به نام روتور) واقع در میدان مغناطیسی، باعث چرخش پیچه می شود (شکل روبه‌رو). چرخش قطعات در دستگاه‌های نام برده در بالا از این حرکت پیچه ناشی می شود.

**ب) میدان‌های مغناطیسی بدن:** تمام یاخته‌های زنده بدن انسان به‌طور الکتریکی فعال اند. جریان‌های الکتریکی ضعیف در بدن، میدان‌های مغناطیسی ضعیف ولی قابل اندازه‌گیری تولید می کنند. اندازه میدان‌های حاصل از عضله‌های اسکلتی کوچک ترا از  $10^{-1} T$ ، یعنی در حدود یک میلیونیم میدان مغناطیسی زمین است. میدان‌های مغناطیسی حاصل از مغز بسیار ضعیف تر و در حدود  $10^{-12} T$  هستند و برای اندازه‌گیری آنها باید مغناطیس سنج‌های بسیار حساس به کار برد. در حال حاضر، چنین مغناطیس سنج‌هایی به نام **اسکوئید** ساخته شده‌اند. شکل روبه‌رو یک دستگاه اسکوئید را نشان می‌دهد که در حال اندازه‌گیری میدان مغناطیسی تولید شده در مغز است.



### ۴-۴- نیروی وارد بر ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی

در بخش پیش دیدیم که بر سیم حامل جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی نیرو وارد می‌شود. اگر جریان صفر شود، نیروی وارد بر سیم نیز صفر می‌شود. در فصل ۳ دیدیم که جریان الکتریکی در واقع حرکت بارهای الکتریکی است و صفر شدن جریان در یک رسانا به طور متوسط به معنای توقف حرکت بارهای الکتریکی است. پس نتیجه می‌گیریم که نیروی وارد بر سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی، در واقع بر بارهای متحرکی وارد می‌شود که در سیم جریان الکتریکی را به وجود می‌آورند.

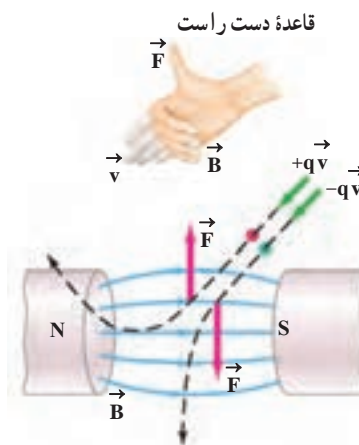
آزمایش نشان می‌دهد که اگر ذره باردار  $q$  با سرعت  $\vec{v}$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  حرکت کند، (به شرط آنکه جهت حرکت آن موازی با میدان نباشد) بر آن نیروی وارد خواهد شد که مطابق شکل ۴-۱۳ بر راستای  $\vec{v}$  و میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  عمود است. این نیرو را **نیروی مغناطیسی** می‌نامند و جهت آن مطابق شکل به کمک قاعده دست راست تعیین می‌شود. باید توجه کنیم که جهت نیروی وارد بر بار منفی همواره در خلاف جهت نیروی وارد بر بار مثبت است.

آزمایش نشان می‌دهد اندازه نیروی مغناطیسی وارد بر یک ذره باردار متحرک در میدان مغناطیسی مطابق رابطه زیر به چهار عامل بستگی دارد:

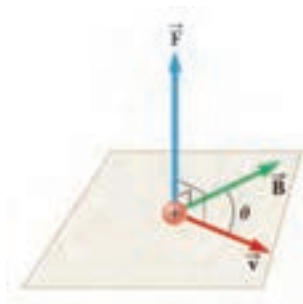
$$F = qvB \sin \theta$$

(۴-۳)

در این رابطه  $\theta$  زاویه‌ای است که جهت حرکت بار الکتریکی (یعنی بردار  $\vec{v}$ ) با جهت میدان مغناطیسی (یعنی بردار  $\vec{B}$ ) می‌سازد (شکل ۴-۱۴).



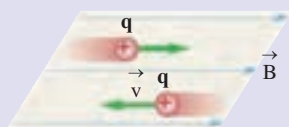
**شکل ۴-۱۳** بر ذره باردار  $+q$  یا  $-q$  که با سرعت  $\vec{v}$  در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  حرکت می‌کند نیروی مغناطیسی  $\vec{F}$  وارد می‌شود که جهت آن با قاعده دست راست تعیین می‌شود.



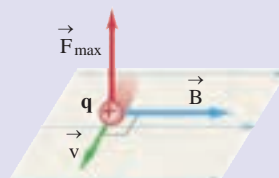
**شکل ۴-۱۴** نیروی  $\vec{F}$  بر هر دو بردار  $\vec{v}$  و  $\vec{B}$  عمود است. به عبارت دیگر نیروی  $\vec{F}$  بر صفحه‌ای که توسط  $\vec{v}$  و  $\vec{B}$  تشکیل می‌شود عمود است.

### پرسش ۴-۷

با توجه به رابطه ۴-۳ دریافت خود را از هر یک از شکل‌های الف و ب به طور جداگانه بیان کنید.



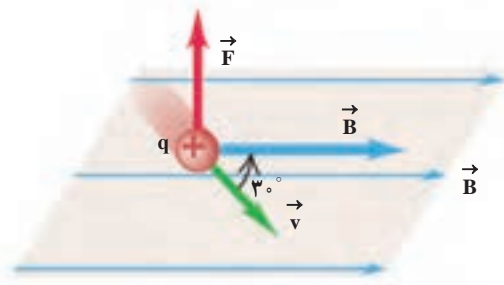
(ب)



(الف)



## مثال ۲-۴



ذره‌ای با بار  $+4$  میکروکولن و با سرعت  $2 \times 10^2 \text{ m/s}$  در جهتی حرکت می‌کند که با میدان مغناطیسی یکنواخت  $100 \text{ G}$  زاویه  $3^\circ$  می‌سازد (شکل روبه‌رو). بزرگی نیروی مغناطیسی وارد بر این ذره را محاسبه کنید.

پاسخ: با توجه به فرض‌های مسئله داریم:

$$q = +4 \mu\text{C} = +4 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$v = 2 \times 10^2 \text{ m/s}, B = 100 \text{ G} = 100 \times 10^{-4} \text{ T} = 10^{-2} \text{ T}$$

$$\theta = 3^\circ, F = ?$$

$$F = qvB \sin \theta$$

$$= (4 \times 10^{-6} \text{ C})(2 \times 10^2 \text{ m/s})(10^{-2} \text{ T}) \sin 3^\circ$$

$$= 4 \times 10^{-5} \text{ N}$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۳-۴ داریم:

## تمرین ۲-۴

بر الکترونی ( $q = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) که با زاویه  $6^\circ$  نسبت به یک میدان مغناطیسی به بزرگی  $35 \text{ G}$  حرکت می‌کند، نیروی مغناطیسی به بزرگی  $4/6 \times 10^{-15} \text{ N}$  وارد می‌شود. بزرگی سرعت این الکترون چقدر است؟

## مطالعه آزاد



## کمر بندهای تابشی ون آلن

در بیرون از جو زمین، ذره‌های باردار بسیاری با سرعت‌های فوق‌العاده زیادی در حرکت‌اند. این ذره‌های سریع را که معمولاً از جنس پرتون، هسته اتم هلیوم (ذره آلفا) و الکترون هستند پرتوهای کیهانی می‌نامند. این پرتوها علاوه بر فضا نوردان، برای سامانه‌های الکترونیکی واقع در فضا نیز خطرناک‌اند. خوشبختانه بیشتر این پرتوهای باردار توسط میدان مغناطیسی زمین منحرف می‌شوند و مانع از آسیب‌رسانی به موجودات و سامانه‌های روی زمین می‌شود. ذرات بارداری که در میدان مغناطیسی زمین به دام می‌افتند،

**کمرندهای تابشی ون آلن** را تشکیل می‌دهند (شکل صفحه قبل). این کمرندها که دو حلقه کلوچه مانند میان تهی را در اطراف زمین تشکیل می‌دهند، ون آلن در سال ۱۹۵۸ میلادی از داده‌های گردآوری شده توسط ماهواره اکسپلورر I کشف



تصویری خیره کننده از شفق قطبی

کرد و به افتخار او نام گذاری شده‌اند. فضانوردان در فاصله‌های ایمن بسیار پایین تر از این کمرندهای تابشی دور زمین می‌گردند. توفان‌های خورشیدی، ذره‌های باردار را به صورت فواره‌های عظیمی پرتاب می‌کنند که بسیاری از آنها از نزدیکی زمین می‌گذرند و در میدان مغناطیسی آن به دام می‌افتند. **شفق قطبی (نورهای شمالی)** پدیده زیبایی است که بر اثر برخورد ذره‌های باردار موجود در کمرند ون آلن با مولکول‌های جو زمین به وجود می‌آید (شکل روبه‌رو). در نیمکره جنوبی این پدیده **شفق جنوبی** نامیده می‌شود.

#### ۴-۵- آثار مغناطیسی جریان الکتریکی

تا اینجا نیروهایی را بررسی کردیم که بر بارهای متحرک و رساناهای حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شوند. هر چند پی بردیم که در فضای اطراف آهنرباهای دائمی نیز میدان مغناطیسی وجود دارد. با وجود این، در ادامه این فصل با چشمه‌های دیگر میدان مغناطیسی آشنا خواهیم شد. اورستد دانشمند دانمارکی، در سال ۱۸۲۰ میلادی ضمن انجام برخی آزمایش‌های الکتریسیته، مشاهده کرد که عقربه مغناطیسی در کنار سیم حامل جریان الکتریکی منحرف می‌شود (شکل ۴-۱۵). او با انجام دادن آزمایش‌های بیشتر کشف کرد که عبور جریان الکتریکی از یک سیم رسانا، در اطراف آن یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. این کشف اورستد نخستین گام در راه درک رابطه بین الکتریسیته و مغناطیس بود که به گسترش مبحث الکترومغناطیس انجامید. در این بخش، به بررسی میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم‌ها می‌پردازیم.



هانس کریستین اورستد (۱۷۷۷-۱۸۵۱)، فیزیک‌دان دانمارکی ابتدا به مطالعه فلسفه طبیعت رو آورد و سپس مطالب بسیاری درباره موضوع‌های فلسفی نوشت. اورستد در مقاله‌ای که به سال ۱۸۱۳ منتشر شد پیش‌بینی کرد که رابطه‌ای میان الکتریسیته و مغناطیس می‌توان یافت. او در سال ۱۸۲۰ قطب‌نمایی را زیر یک سیم حامل جریان گذاشت و کشف کرد که یک میدان مغناطیسی جریان الکتریکی را احاطه می‌کند. در سال‌های بعد او نظر دانشمندان دیگر مبنی بر اینکه کشف او درباره الکترومغناطیس تصادفی بوده است را به شدت انکار کرد.



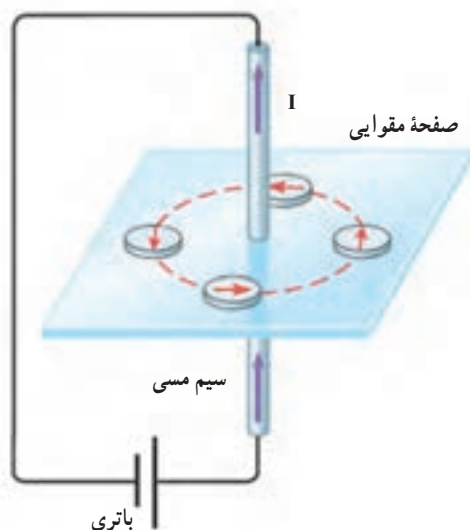
**شکل ۴-۱۵** میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را می‌توان با قرار دادن تعدادی عقربه مغناطیسی پیرامون آن نشان داد.

## آزمایش ۳-۴

## بررسی میدان مغناطیسی در اطراف سیم حامل جریان (آزمایش اورستد)

وسایله های آزمایش: باتری، سیم مسی نسبتاً ضخیم، صفحه مقوایی، عقربه مغناطیسی (قطب نما) و سیم رابط

## شرح آزمایش:



۱- سیم مسی را از صفحه مقوایی بگذرانید و با آن مداري مطابق شکل روبه رو تشکیل دهید.

۲- قبل از برقراری جریان الکتریکی، عقربه مغناطیسی را در مجاورت سیم، روی مقوا قرار دهید و به راستای قرار گرفتن آن توجه کنید.

۳- با وصل کردن مدار، جریان الکتریکی را از سیم مسی عبور دهید و به جهت گیری عقربه مغناطیسی توجه کنید.

۴- عقربه مغناطیسی را در نقطه های مختلف روی مقوا قرار دهید و جهت آن را بررسی کنید.

۵- با توجه به جهت گیری عقربه در نقاط مختلف صفحه مقوایی، چند خط میدان مغناطیسی را رسم کنید.

۶- این آزمایش را بار دیگر با جریانی در جهت مخالف تکرار کنید.

۷- به کمک چند باتری دیگر، تحقیق کنید که افزایش یا کاهش جریان چه تأثیری در نتیجه آزمایش دارد؟

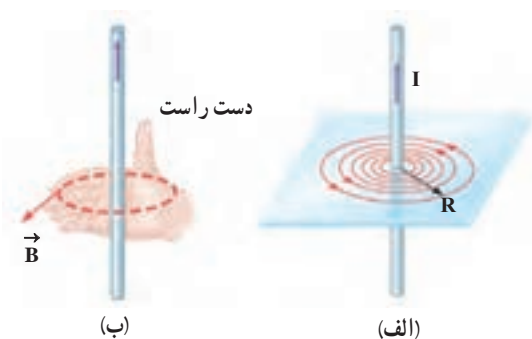
۸- نتیجه این آزمایش را در گروه خود بحث کنید و آن را به کلاس گزارش دهید.

با انجام این آزمایش می بینید که خط های میدان مغناطیسی حاصل از یک

سیم حامل جریان، مطابق شکل ۴-۱۶ الف به صورت دایره های هم مرکزی در اطراف سیم حامل جریان هستند. جهت خط های میدان مغناطیسی سیم حامل جریان را می توان به کمک عقربه مغناطیسی تعیین کرد. علاوه بر آن، با استفاده از قاعده دست راست نیز می توان این جهت را تعیین کرد؛ بنابراین قاعده، اگر سیم را مطابق شکل ۴-۱۶ ب در دست راست خود بگیرید به گونه ای که انگشت شست در جهت جریان الکتریکی باشد، جهت خم شدن چهار انگشت دست شما جهت خط های میدان مغناطیسی را در اطراف سیم نشان می دهد.

آزمایش نشان می دهد که اندازه میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  در اطراف یک سیم نازک دراز مستقیم حامل جریان الکتریکی ای به شدت  $I$  در نقطه ای که فاصله عمودی آن از سیم برابر  $R$  است (شکل ۴-۱۶ الف) با  $I$  نسبت مستقیم و با  $R$  نسبت وارون دارد؛ یعنی:

$$B \propto \frac{I}{R}$$

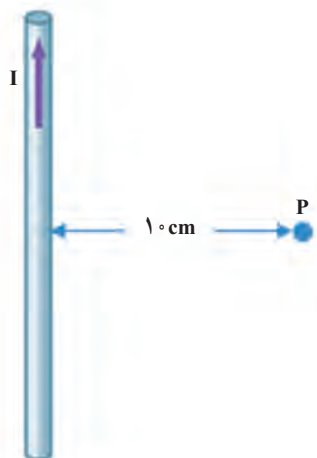


شکل ۴-۱۶ الف) خط های میدان مغناطیسی در اطراف سیم بلند حامل جریان  $I$ . ب) استفاده از قاعده دست راست برای تعیین جهت  $\vec{B}$  در اطراف یک سیم بلند حامل جریان  $I$ .

ضریب تناسب در SI برابر  $\frac{\mu_0}{2\pi}$  است که در آن  $\mu_0$  تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر با  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A}$  است؛ در نتیجه داریم:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (4-4)$$

## مثال ۳-۴



اندازه میدان مغناطیسی ناشی از جریان  $20$  آمپر را که از سیمی دراز و مستقیم می‌گذرد، در نقطه‌ای به فاصله  $10$  cm از سیم حساب کنید (شکل روبه‌رو).

**پاسخ:** با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$I = 20 \text{ A}, \quad R = 10 \text{ cm} = 0.10 \text{ m}, \quad B = ?$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۴-۴ داریم:

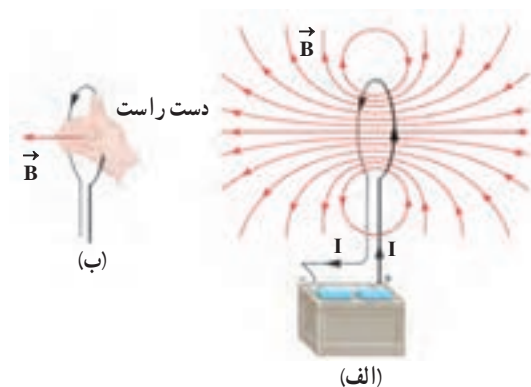
$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A})(20 \text{ A})}{2\pi(0.10 \text{ m})} \\ &= 4.0 \times 10^{-5} \text{ T} = 0.40 \text{ G} \end{aligned}$$

## تمرین ۳-۴

سیم مستقیم بلندی حامل جریان  $1$  A است. بزرگی میدان مغناطیسی حاصل از این جریان در چه فاصله‌ای از سیم برابر  $B = 0.5$  G (حدود بزرگی میدان مغناطیسی زمین) می‌شود؟

## میدان مغناطیسی ناشی از یک حلقه دایره‌ای حامل

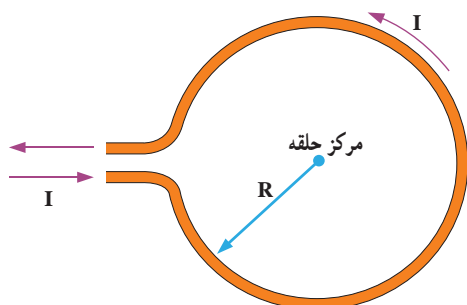
**جریان:** هرگاه سیم حامل جریانی را به صورت یک حلقه درآوریم، میدان مغناطیسی ناشی از آن در نقاط درون حلقه به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در شکل ۴-۱۷ الف یک حلقه رسانای دایره‌ای به شعاع  $R$  که حامل جریان  $I$  است نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود خط‌های میدان مغناطیسی در ناحیه داخلی حلقه به یکدیگر نزدیک‌ترند؛ یعنی، میدان در این ناحیه قوی‌تر است. افزون بر این، در نقطه‌های روی محور حلقه، میدان موازی محور است. جهت خط‌های میدان مغناطیسی حلقه را می‌توان با قاعده دست راست تعیین کرد که در شکل ۴-۱۷ ب نشان داده شده است.



**شکل ۴-۱۷ الف** خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک حلقه حامل جریان. (ب) استفاده از قاعده دست راست برای تعیین جهت خط‌های میدان مغناطیسی یک حلقه حامل جریان.

بزرگی میدان مغناطیسی حلقه‌ای به شعاع  $R$  و حامل جریان  $I$  در مرکز حلقه از رابطه زیر به دست می‌آید (شکل ۴-۱۸).

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (۵-۴)$$



شکل ۴-۱۸

اگر به یک موتور الکتریکی، آهنربای الکتریکی یا زنگ در بنگرید، پیچه‌هایی از سیم با تعداد زیادی دور را خواهید یافت که آن قدر به هم نزدیک‌اند که با تقریب خوبی می‌توان آن را یک حلقه دایره‌ای مسطح در نظر گرفت. از این پیچه‌ها که معمولاً به آنها **پیچه‌های مسطح** نیز گفته می‌شود، برای تولید میدان مغناطیسی در بسیاری از وسیله‌های برقی استفاده می‌شود.

بزرگی میدان مغناطیسی در مرکز پیچه مسطحی به شعاع  $R$ ، دارای  $N$  دور و حامل جریان  $I$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (۶-۴)$$

### مثال ۴-۱۴

از پیچه مسطحی به شعاع  $۶/۳\text{cm}$  که از  $۲۰۰۰$  دور سیم نازک درست شده است، جریان  $۲۰\text{mA}$  می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه به دست آورید.

**پاسخ:** با توجه به داده‌های مسئله داریم:

$$R = ۶/۳\text{cm} = ۶/۳ \times ۱۰^{-۲}\text{m} \text{ و } N = ۲۰۰۰ \text{ و } I = ۲۰\text{mA} \text{ و } B = ?$$

با قرار دادن داده‌های بالا در رابطه ۶-۴ داریم:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})(2000)(20 \times 10^{-3} \text{ A})}{2 \times (6/3 \times 10^{-2} \text{ m})} = 4/0 \times 10^{-4} \text{ T} = 4/0 \text{ G}$$

### تمرین ۴-۱۴

بزرگی میدان مغناطیسی دور سر انسان به تقریب برابر  $۳/۰ \times ۱۰^{-۸}\text{G}$  اندازه‌گیری شده است. اگرچه جریان‌هایی که این میدان را به وجود می‌آورند بسیار پیچیده‌اند، ولی با در نظر گرفتن این جریان‌ها به صورت تک حلقه‌ای دایره‌ای به قطر  $۱۶\text{cm}$  (پهنای یک سر نوعی) می‌توان اندازه آنها را تا حدودی تخمین زد. جریان لازم برای تولید این میدان در مرکز حلقه چقدر است؟

### میدان مغناطیسی حاصل از سیملوله حامل جریان :

سیملوله چند دور سیم است که به شکل یک فنر پیچیده شده است (شکل ۱۹-۴ الف). اگر جریان الکتریکی از سیملوله ای عبور کند، در فضای اطراف سیملوله میدان مغناطیسی به وجود می آید.

طرح خط‌های میدان مغناطیسی یک سیملوله حامل جریان الکتریکی در داخل و خارج آن در شکل ۱۹-۴ ب نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل می بینید، خط‌های میدان داخل سیملوله بسیار متراکم تر از خط‌های میدان در خارج آن است و این نشانگر بزرگ تر بودن میدان در داخل سیملوله است. علاوه بر این خط‌های میدان در داخل سیملوله، به ویژه در نقطه‌های نسبتاً دور از لبه‌های آن تقریباً موازی و هم فاصله اند و این نشانگر یکنواخت بودن میدان مغناطیسی درون سیملوله است. همان طور که دیده می شود، جهت میدان مغناطیسی در داخل سیملوله خلاف جهت میدان مغناطیسی در خارج آن است و مشابه حلقه حامل جریان به کمک قاعده دست راست تعیین می شود.

اگر شعاع سیملوله در مقایسه با طول آن، کوچک و حلقه‌های آن، خیلی به هم نزدیک باشند، میدان مغناطیسی داخل سیملوله در نقطه‌های دور از لبه‌ها یکنواخت است و اندازه آن از رابطه زیر به دست می آید :

$$B = \mu_0 n I \quad (۷-۴)$$

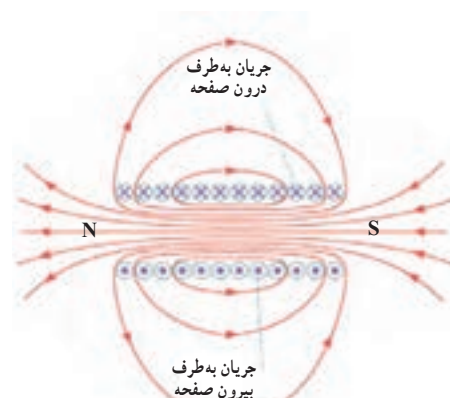
در این رابطه،  $I$  جریان و  $n$  تعداد دورهای سیملوله به ازای واحد طول است که از رابطه زیر به دست می آید :

$$n = \frac{N}{\ell} \quad (۸-۴)$$

که  $N$  تعداد کل دورهای سیملوله و  $\ell$  طول سیملوله است.



(الف)



(ب)

**شکل ۱۹-۴ الف** سیمی که به صورت پیچیده مارپیچی بلند پیچیده شده باشد یک سیملوله است. **ب** میدان مغناطیسی داخل سیملوله (کمی دورتر از لبه‌ها) تقریباً یکنواخت است.

### مثال ۱۴-۵

سیملوله‌ای به طول  $۱۵\text{cm}$  و شعاع  $۰.۷۵\text{cm}$ ، دارای  $۶۰۰$  حلقه سیم نزدیک به هم است. اگر جریانی  $۸۰\text{mA}$  از سیملوله بگذرد، بزرگی میدان مغناطیسی را در نقطه‌ای نزدیک به مرکز سیملوله پیدا کنید.

**پاسخ :** با توجه به داده‌های مسئله داریم :

$$\text{دور } N = ۶۰۰ \text{ و } R = ۰.۷۵\text{cm} \text{ و } \ell = ۱۵\text{cm} = ۰.۱۵\text{m} \text{ و } B = ? \text{ و } I = ۸۰\text{mA}$$

چون شعاع سیملوله خیلی کوچک تر از طول سیملوله است (حدود)، می توان از رابطه ۷-۴ برای پیدا کردن میدان

مغناطیسی درون سیملوله و دور از لبه‌ها، استفاده کرد. به این ترتیب داریم :

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \left(\frac{N}{\ell}\right) I \\ = (4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}) \frac{600 \times (80 \times 10^{-3} \text{ A})}{0.15 \text{ m}} = 4 \times 10^{-3} \text{ T} = 40 \text{ G}$$



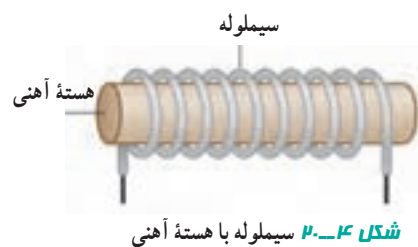
## تمرین ۴-۵

سیملوله‌ای چنان طراحی شده است که میدان مغناطیسی در مرکز آن  $27^\circ$  گاوس باشد. شعاع این سیملوله  $1/4$  cm و طول آن  $40\%$  cm است. اگر بخواهیم جریان بیشینه‌ای که از آن می‌گذرد  $1/2$  A باشد کمترین تعداد دورهای آن در واحد طول چقدر باید باشد؟

## فعالیت ۴-۴



آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان با استفاده از براده آهن طرح خط‌های میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم بلند، یک حلقه دایره‌ای و یک سیملوله حامل جریان به وجود آورد (شکل‌های روبه‌رو).



شکل ۴-۲۰ سیملوله با هسته آهنی

**سیملوله با هسته آهنی – آهنربای الکتریکی:** در بخش ۴-۱ دیدید با قرار دادن یک میله آهنی در میدان مغناطیسی می‌توان ویژگی مغناطیسی در آن القا کرد. اگر میله آهنی در یک سیملوله حامل جریان که میدان در آنجا از هر جای دیگر در اطراف سیملوله قوی‌تر است قرار گیرد، آن را **هسته سیملوله** می‌نامند (شکل ۴-۲۰). پیش از آنکه جریانی از سیملوله عبور کند، سیملوله و هسته آهنی خاصیت مغناطیسی ندارند. اما وقتی جریانی در سیملوله برقرار شود، میدان مغناطیسی سیملوله، خاصیت مغناطیسی در هسته آهنی القا می‌کند و هسته آهنی، آهنربا می‌شود. این آهنربا را **آهنربای الکتریکی** می‌نامند (شکل ۴-۲۱).

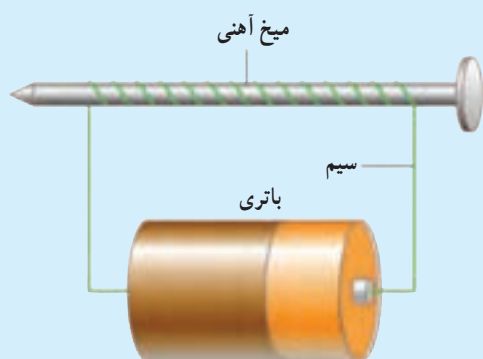
هر چه تعداد دورهای سیملوله در واحد طول و جریانی که از آن می‌گذرد بیشتر باشد، آهنربای الکتریکی قوی‌تر خواهد بود.

وجود هسته آهنی باعث تقویت میدان مغناطیسی سیملوله می‌شود. میدان مغناطیسی سیملوله بدون هسته آهنی به قدری ضعیف است که در عمل کاربردهای کمی دارد.



**شکل ۴-۲۱** این آهنربای الکتریکی صنعتی شامل پیچیده‌ای حامل جریان است که تعداد زیادی دور سیم دارد. میدان مغناطیسی حاصل از آن قادر است مقدار زیادی میله‌های فولادی و دیگر قراضه‌های آهن را بلند کند.

## فعالیت ۱۴



به کمک یک میخ آهنی، یک تکه سیم بلند و یک باتری، یک آهنربای الکتریکی بسازید (شکل روبه‌رو) و اثر آهنربایی آن را روی تعدادی سوزن ته‌گرد، گیره فلزی کاغذی یا مقداری براده آهن بررسی کنید. چه تغییراتی در آهنربای الکتریکی باعث زیاد شدن خاصیت آهنربایی آن می‌شود؟

## ۴-۶- نیروی بین سیم‌های موازی حامل جریان

در آزمایش اورستد، دیدیم که در فضای اطراف هر سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی وجود دارد. همچنین در بخش ۴-۲ دیدیم که آهنربا بر سیم حامل جریان نیرو وارد می‌کند. حال فرض کنید برای تولید میدان مغناطیسی به جای آهنربا از یک سیم حامل جریان استفاده کنیم. اگر سیم حامل جریان دیگری را در نزدیکی این سیم قرار دهیم، آیا نیرویی بر آن وارد می‌شود؟ برای پاسخ دادن به این پرسش، آزمایش ۴-۴ را انجام دهید.

## آزمایش ۴-۴

## بررسی اثر دو سیم حامل جریان بر یکدیگر

وسایله‌های آزمایش: دو تکه سیم بلند نازک (با قطر کم)، باتری، کلید قطع و وصل، سیم رابط، دو عدد پایه

## شرح آزمایش:

۱- مداری مطابق شکل زیر ببندید.

۲- با وصل کردن کلید، جریان را در مدار برقرار کنید. توجه کنید که جریان در دو سیم موازی، همسو است. مشاهده

خود را گزارش دهید.

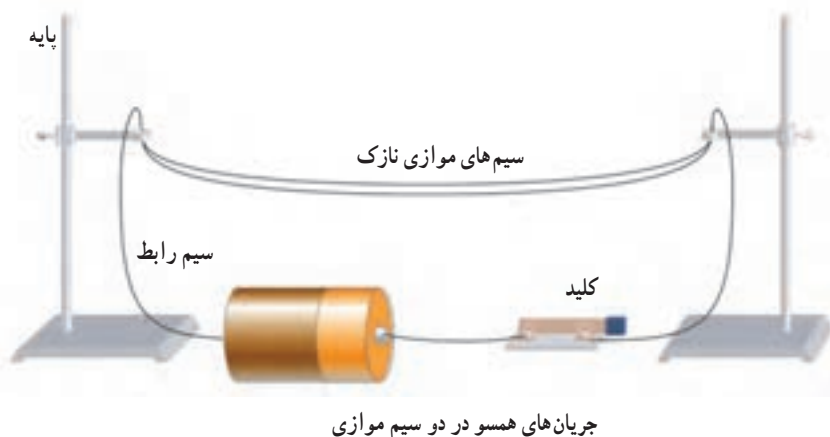
۳- مراحل ۱ و ۲ را برای

وضعیتی که جریان در دو سیم موازی

در جهت‌های مخالف (ناهمسو) باشد

انجام دهید و نتیجه آزمایش را گزارش

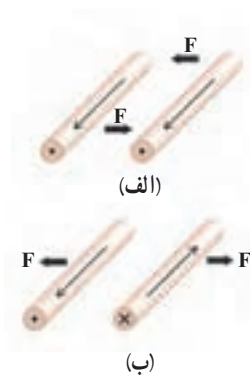
دهید.



جریان‌های همسو در دو سیم موازی



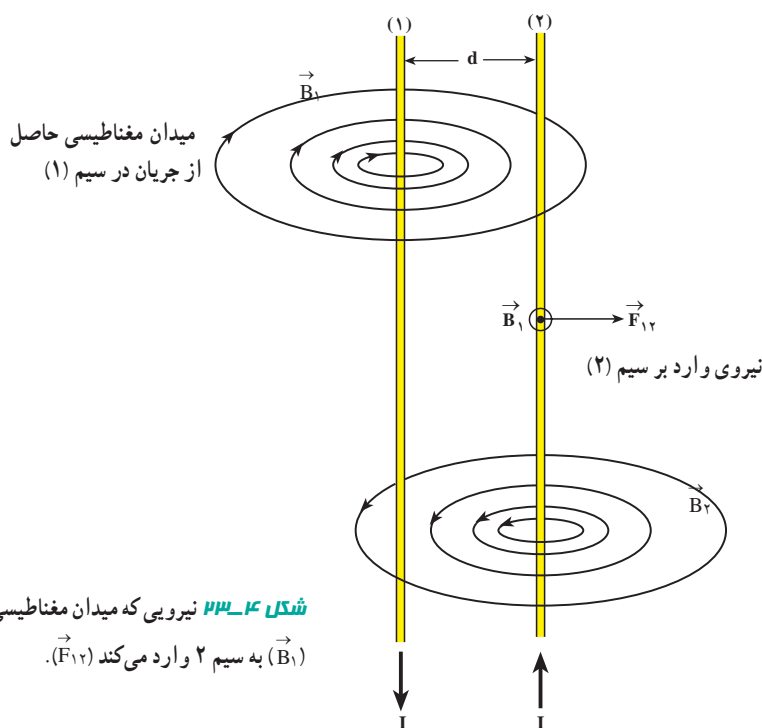
## میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی



شکل ۴-۲۲ الف) دو سیم موازی حامل جریان همسو یکدیگر را می‌ربایند. ب) دو سیم موازی حامل جریان ناهمسو، یکدیگر را می‌رانند.

آزمایش ۴-۴ نشان می‌دهد که سیم‌های حامل جریان الکتریکی بر یکدیگر نیرو وارد می‌کنند. هرگاه جریانی که از دو سیم می‌گذرد همسو باشد، دو سیم یکدیگر را می‌ربایند (شکل ۴-۲۲-الف) و اگر جریانی که از دو سیم می‌گذرد در جهت‌های مخالف باشد، دو سیم یکدیگر را می‌رانند (شکل ۴-۲۲-ب).

نیروی وارده بر هر سیم را می‌توان برحسب میدان مغناطیسی حاصل از جریان الکتریکی در سیم دیگر توضیح داد. برای این کار، دو سیم مستقیم و خیلی دراز موازی حامل جریان  $I$  و به فاصله  $d$  از یکدیگر را مطابق شکل ۴-۲۳ در نظر می‌گیریم. جریان الکتریکی در سیم شماره (۱) در فضای اطراف آن، میدان مغناطیسی  $\vec{B}_1$  را به وجود می‌آورد. جهت میدان  $\vec{B}_1$  در محل سیم شماره (۲) همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است برون‌سو است. چون سیم شماره (۲) نیز حامل جریان الکتریکی  $I$  است، میدان  $\vec{B}_1$  بر آن نیرو وارد می‌کند. این نیرو را در شکل با  $\vec{F}_{12}$  نشان داده‌ایم، جهت  $\vec{F}_{12}$  با استفاده از قاعده دست راست تعیین می‌شود.



شکل ۴-۲۳ نیرویی که میدان مغناطیسی سیم ۱ ( $\vec{B}_1$ ) به سیم ۲ وارد می‌کند ( $\vec{F}_{12}$ ).

## تمرین ۴-۴

الف) جهت نیروی وارد بر سیم شماره (۱) در شکل ۴-۲۳ را با استدلالی مشابه تعیین کنید.  
 ب) جهت نیروها و میدان‌های مغناطیسی مربوط به دو سیم موازی حامل جریان‌های همسو را با رسم شکل و استفاده از قاعده دست راست مشخص کنید.  
 پ) از دو سیم بلند موازی که به فاصله  $d$  از یکدیگر قرار دارند، جریان‌های همسوی  $I$  می‌گذرد. نیرویی را که به یک متر از هر یک از سیم‌ها وارد می‌شود به دست آورید.

دیدیم که در دو سیم مستقیم دراز و موازی حامل جریان، با توجه به جهت جریان برهم نیروهای ربایشی یا رانشی وارد می‌کنند، این واقعیت، اساس تعریف یکای جریان الکتریکی یعنی آمپر در SI است. مطابق این تعریف:

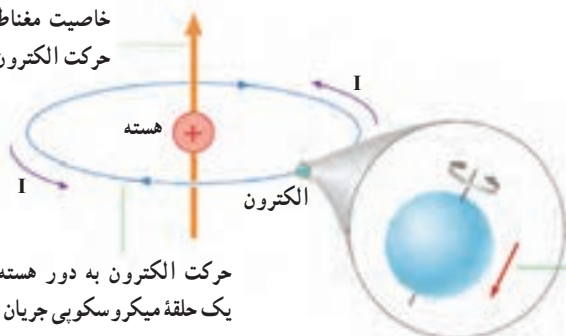
هرگاه از دو سیم نازک، موازی، مستقیم و بسیار دراز که به فاصله یک متر از یکدیگر در خلأ قرار دارند، جریان‌های مساوی به گونه‌ای عبور کند که بر یک متر از طول هریک از سیم‌ها نیرویی برابر  $2 \times 10^{-7}$  نیوتون وارد شود، جریانی که از هریک از سیم‌ها می‌گذرد، برابر یک آمپر است.

#### ۴-۷- خواص مغناطیسی مواد

پیش از این دیدیم که برخی مواد خاصیت آهنربایی دارند، و در برخی مواد دیگر که در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند خاصیت آهنربایی القا می‌شود. برای نمونه، هسته آهنی یک آهنربای الکتریکی را به یاد بیاورید (شکل ۴-۲۰). اکنون این پرسش پیش می‌آید که منشأ این رفتار مواد چیست؟ در این بخش به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

وقتی به بررسی ساختمان کوچک‌ترین جزء سازنده ماده، یعنی اتم می‌پردازیم متوجه می‌شویم که منشأ خاصیت مغناطیسی برخی از مواد ناشی از اتم‌های تشکیل دهنده آنهاست. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع به شکل ۴-۲۴ توجه کنید. در این شکل، اتمی با یک الکترون نشان داده شده است که علاوه بر چرخیدن به دور هسته، به دور خودش نیز می‌چرخد. در واقع منشأ خاصیت مغناطیسی اتم ناشی از این دو نوع حرکت است. به این ترتیب می‌توان گفت هر الکترون چرخان درون اتم، یک آهنربای بسیار ریز است. به طوری که اگر اتم، یک زوج الکترون داشته باشد که در یک جهت بچرخند، آهنربای قوی‌تری را به وجود می‌آورند. اما اگر این زوج الکترون در جهت‌های مخالف یکدیگر بچرخند، برخلاف هم عمل و خاصیت مغناطیسی یکدیگر را خنثی می‌کنند. به همین سبب است که برخی مواد خاصیت مغناطیسی دارند و برخی دیگر خواص مغناطیسی ندارند.

خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون به دور هسته

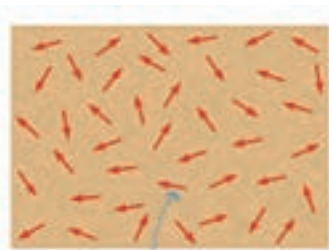


حرکت الکترون به دور هسته مانند یک حلقه میکروسکوپی جریان است.

خاصیت مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون به دور خودش

شکل ۴-۲۴ چرخش الکترون به دور هسته و به دور خودش، منشأ خاصیت مغناطیسی اتم است.

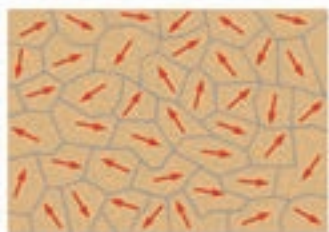
### میدان مغناطیسی و نیروهای مغناطیسی



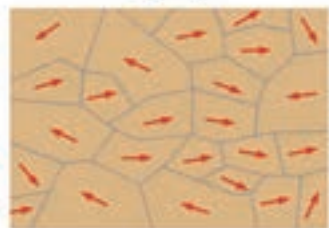
هر ذره سازنده مواد مغناطیسی، یک آهنربای بسیار ریز است که آن را دوقطبی مغناطیسی می‌نامند.

**شکل ۱۴-۲۵** سمتگیری کاتوره‌ای دوقطبی‌های مغناطیسی در یک ماده پارامغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی

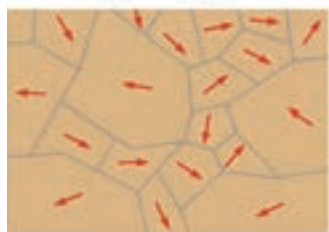
$$\vec{B} = 0$$



(الف)



(ب)



(پ)

**شکل ۱۴-۲۶** الف) ماده فرومغناطیسی در نبود میدان مغناطیسی خارجی ( $\vec{B} = 0$ )، ب) ماده فرومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی ضعیف، پ) ماده فرومغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی قوی.

موادی که اتم‌ها یا مولکول‌های سازنده آنها دارای خاصیت مغناطیسی باشند را **مواد مغناطیسی** می‌نامند. در واقع می‌توان گفت کوچک‌ترین ذره‌های تشکیل دهنده این مواد (اتم‌ها یا مولکول‌ها) هر کدام آهنرباهای بسیار ریزی هستند که به آنها **دوقطبی مغناطیسی** نیز گفته می‌شود. در این کتاب، دوقطبی‌های مغناطیسی را با یک پیکان کوچک نشان می‌دهیم که می‌تواند جهت‌گیری‌های متفاوتی داشته باشد و هر کدام از آنها وابسته به یک اتم یا مولکول‌اند. در ادامه به بررسی برخی از مواد مغناطیسی می‌پردازیم.

**مواد پارامغناطیسی:** دوقطبی‌های مغناطیسی در یک ماده پارامغناطیسی سمت‌گیری مشخص و منظمی ندارند و در جهت‌های کاتوره‌ای قرار دارند (شکل ۴-۲۵). 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 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 و به سرعت به وضعیت کاتوره‌ای در غیاب میدان برمی‌گردند.

به این ترتیب، مواد پارامغناطیسی در میدان‌های مغناطیسی قوی تا حدودی خاصیت مغناطیسی موقت پیدا می‌کنند. اورانیم، پلاتین، آلومینیم، سدیم، اکسیژن و اکسید نیتروژن از جمله مواد پارامغناطیسی‌اند.

**مواد فرومغناطیسی:** در برخی از مواد مغناطیسی، دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک خودبه‌خود با دوقطبی‌های مجاور خود هم‌خط می‌شوند. این گونه مواد را **فرومغناطیسی** می‌نامند.

در عمل، همه بخش‌های مغناطیسی در یک ماده فرومغناطیسی در یک راستا قرار ندارند؛ بلکه این گونه مواد از بخش‌های بسیار کوچکی به نام **حوزه مغناطیسی** تشکیل شده‌اند که ابعاد آن در بیشتر مواد فرومغناطیسی حدود  $10^{-6}$  تا  $10^{-4}$  متر است. هر حوزه از تعداد بسیار زیادی اتم تشکیل شده است به طوری که دوقطبی‌های مغناطیسی آنها به طور کامل، هم‌خط‌اند. ولی سمتگیری دوقطبی‌های مغناطیسی هر حوزه با حوزه‌های مجاور آن تفاوت دارد (شکل ۴-۲۶ الف). این گونه مواد را می‌توان با قراردادن در یک میدان مغناطیسی، آهنربا کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی بر حوزه‌های مغناطیسی باعث می‌شود که دوقطبی‌های مغناطیسی هر حوزه تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند و جهت آنها به جهت میدان خارجی متمایل شود. علاوه بر این، حوزه‌هایی که نسبت به میدان در وضع مناسبی قرار دارند (با میدان همسو هستند) رشد می‌کنند؛ یعنی حجمشان زیاد می‌شود و در نتیجه، حوزه‌هایی که سمتگیری آنها نسبت به میدان مناسب نیست، کوچک می‌شوند؛ یعنی مرز بین حوزه‌ها جابه‌جا می‌شود، و در نتیجه ماده در مجموع، خاصیت آهنربایی پیدا می‌کند.

در شکل ۴-۲۶ ب ماده فرومغناطیسی را در یک میدان مغناطیسی خارجی  $\vec{B}$  قرار داده‌ایم؛ مرزهای حوزه‌ها جابه‌جا شده‌اند و در نتیجه، ماده در مجموع خاصیت مغناطیسی پیدا کرده است. در شکل ۴-۲۶ پ میدان مغناطیسی خارجی آن قدر قوی است که بیشتر حجم ماده را حوزه‌های با سمتگیری مناسب (همسو با میدان) اشغال کرده‌اند.

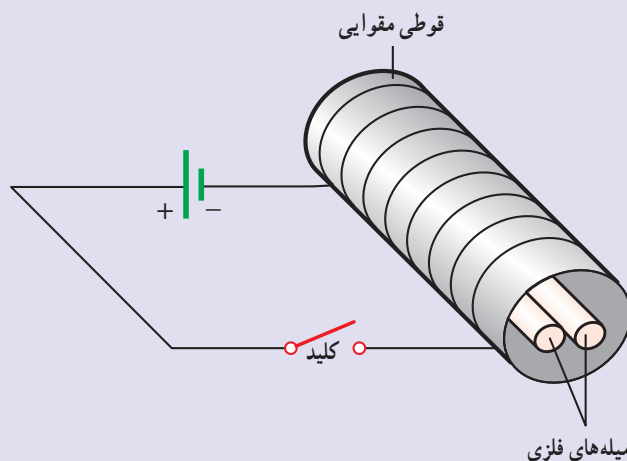
در برخی از مواد فرومغناطیسی مانند آهن، کبالت و نیکل در صورتی که خالص باشند، حجم حوزه‌ها به سهولت تغییر می‌کند و در نتیجه با این روش به آسانی آهنربا می‌شوند و خاصیت آهنربایی خود را نیز به راحتی از دست می‌دهند. این مواد را **فرومغناطیسی نرم** می‌نامند. از این گونه مواد در هسته سیملوله‌ها استفاده می‌شود. 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 مواد دیگر مانند فولاد (آهن به اضافه دو درصد کربن)، آلیاژهای آهن، کبالت و نیکل به سختی آهنربا می‌شوند؛ یعنی حجم حوزه‌ها در آنها به سختی تغییر می‌کند. این مواد را **فرومغناطیسی سخت** می‌نامند. در این گونه مواد برای افزایش حجم حوزه‌هایی که سمت‌گیری مناسب دارند (یعنی با میدان خارجی همسو هستند) به میدان‌های مغناطیسی خارجی قوی‌تری نیازمند است. در این مواد، سمت‌گیری دو قطبی‌های مغناطیسی حوزه‌ها پس از حذف میدان خارجی به سهولت تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، پس از برداشتن میدان مغناطیسی خارجی، ماده فرومغناطیسی سخت، خاصیت آهنربایی خود را تا اندازه قابل توجهی حفظ می‌کند. به همین دلیل این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی مناسب‌اند.

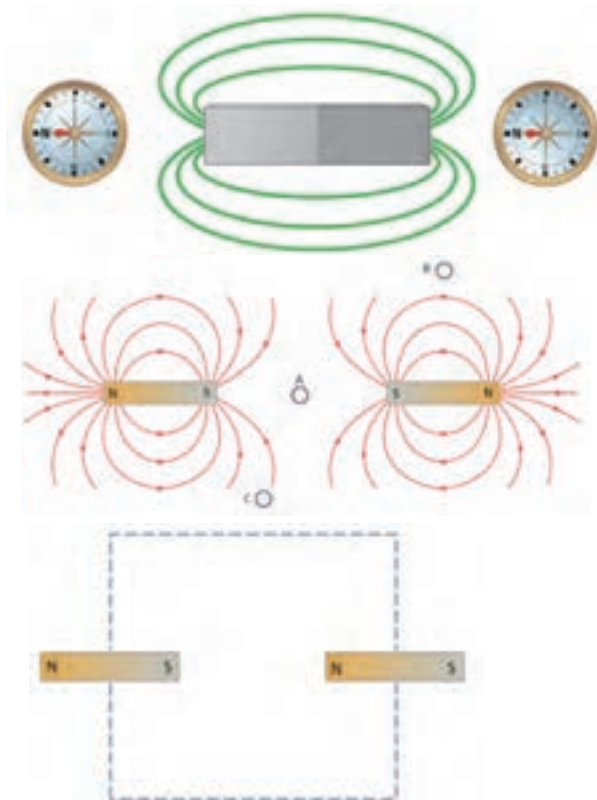
برای خاصیت آهنربایی هر ماده فرومغناطیسی، مقدار اشباع یا پیشینه‌ای وجود دارد. این وضعیت هنگامی به وجود می‌آید که ماده فرومغناطیسی در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار گیرد؛ به طوری که درصد بالایی از دو قطبی‌های مغناطیسی اتمی به موازات یکدیگر هم‌خط شوند. به عبارت دیگر حجم حوزه‌هایی که با میدان مغناطیسی خارجی همسو هستند به بیشترین مقدار خود برسد.

#### پرسش ۸-۴

دو میله فلزی بلند مطابق شکل زیر درون پیچۀ درازی قرار دارند. با بستن کلید و عبور جریان از این پیچه، مشاهده می‌شود دو میله از یکدیگر دور می‌شوند و هنگامی که کلید باز و جریان قطع می‌شود، میله‌ها به محل اولیه بازمی‌گردند.  
الف) چرا با عبور جریان از پیچه، میله‌ها از یکدیگر دور می‌شوند؟  
ب) با دلیل توضیح دهید میله‌های فلزی از نظر مغناطیسی چه نوعی هستند؟



## پرسش‌ها



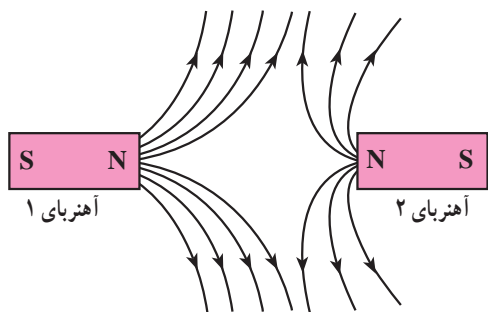
۱ الف) با توجه به جهت‌گیری عقربه‌های مغناطیسی در شکل روبه‌رو، قطب‌های آهنربای میله‌ای و جهت خط‌های میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

ب) آیا خط‌های میدان در داخل آهنربای میله‌ای نیز وجود دارند؟ در صورتی که پاسخ مثبت است، آنها را رسم کنید.

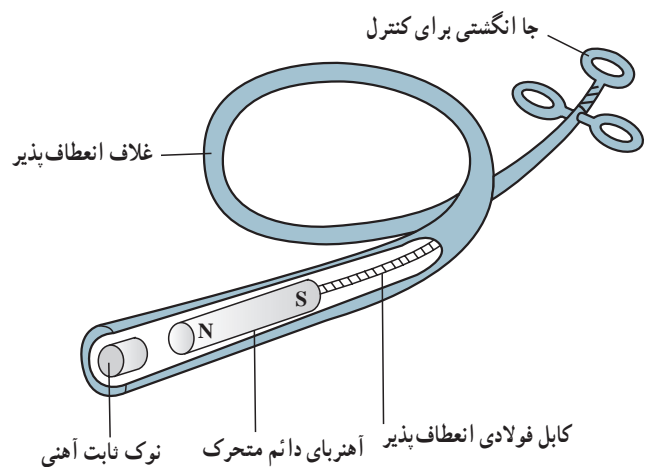
۲ شکل روبه‌رو، خط‌های میدان مغناطیسی را در نزدیکی دو آهنربای میله‌ای نشان می‌دهد.

الف) دربارهٔ میدان مغناطیسی در قسمت A چه می‌توان گفت؟  
ب) با رسم شکل نشان دهید عقربهٔ قطب‌نما در قسمت‌های B و C به ترتیب در کدام جهت قرار می‌گیرد؟

پ) اگر مانند شکل روبه‌رو یکی از آهنرباها را بچرخانیم تا جای قطب‌های آن عوض شود، خط‌های میدان مغناطیسی را در ناحیهٔ نقطه چین رسم کنید.



۳ الف) آهنربایی میله‌ای با قطب‌های نامشخص در اختیار داریم. دست کم دو روش را برای تعیین قطب‌های این آهنربا بیان کنید.  
ب) خط‌های میدان مغناطیسی بین دو آهنربا در شکل روبه‌رو نشان داده شده است؛ میدان مغناطیسی در نزدیکی قطب‌های کدام آهنربا ضعیف‌تر است؟



۴ یک قطعهٔ کوچک فلز در گلولی کودکی که آن را بلعیده است گیر کرده است. پزشک می‌خواهد آن را با دستگاه شکل روبه‌رو بیرون بیاورد.

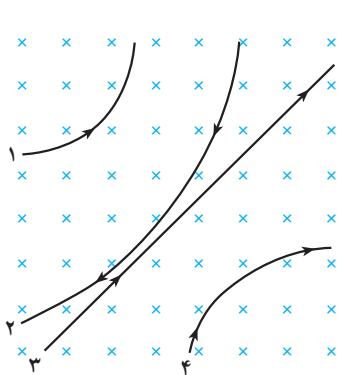
الف) هنگامی که آهنربای دائمی به نوک ثابت آهنی نزدیک می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟

ب) ساختن نوک ثابت آهنی چه مزیتی دارد؟

پ) این وسیله را باید به درون گلولی کودکی وارد و به سوی فلز بلعیده شده هدایت کرد؛ چرا غلاف باید انعطاف پذیر باشد؟

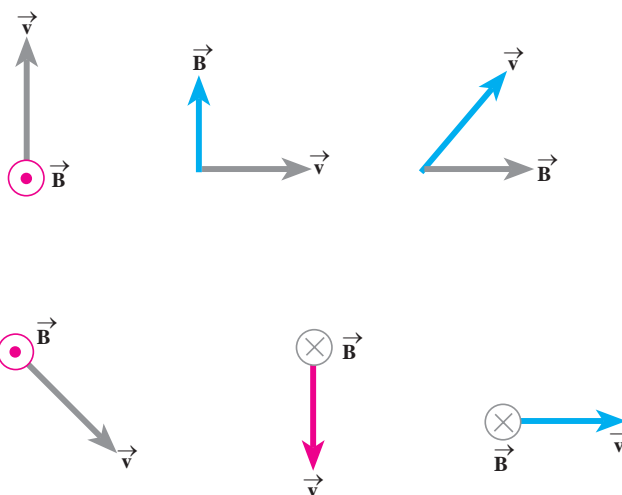
ت) پزشک می‌خواهد یک گیرهٔ آهنی کاغذ و یک واشر

آلومینیومی را از گلولی کودکی بیرون بیاورد؛ کدام یک را می‌توان بیرون آورد؟ چرا؟

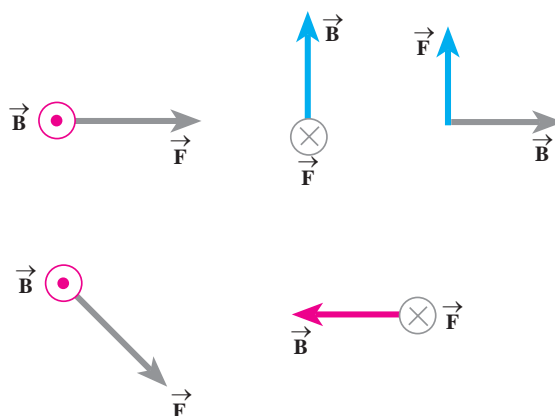


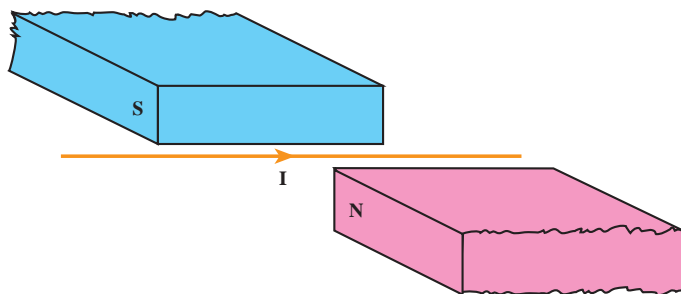
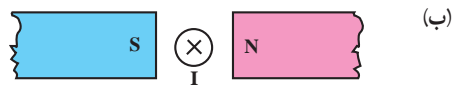
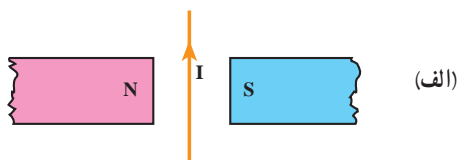
۵ چهار ذره هنگام عبور از میدان مغناطیسی درون سو مسیرهایی مطابق شکل روبه‌رو می‌پیمایند. درباره‌ی نوع بار هر ذره چه می‌توان گفت؟

۶ جهت نیروی مغناطیسی وارد بر بار مثبت را در هریک از حالت‌های نشان داده شده در شکل زیر تعیین کنید.



۷ نیروی مغناطیسی  $\vec{F}$  وارد بر الکترونی که در میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  در حرکت است، در شکل زیر نشان داده شده است. فرض کنید راستای حرکت الکترون بر میدان مغناطیسی عمود است؛ در هریک از حالت‌های نشان داده شده جهت سرعت الکترون را تعیین کنید.





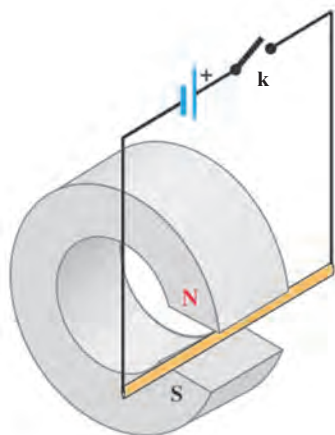
۸ جهت نیروی الکترومغناطیسی بر سیم حامل جریان را در هر یک از شکل‌های الف، ب و پ با استفاده از قاعده دست راست بیابید.



۹ کدام باتری را در مدار شکل روبه‌رو قرار دهیم تا عقربه قطب‌نما که روی سیم قرار دارد، در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت بچرخد؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.



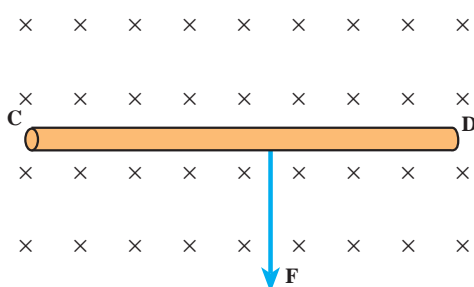
۱۰ کدام باتری را در مدار شکل روبه‌رو قرار دهیم تا آهنربای میله‌ای آویزان شده به طرف سیملوله جذب شود؟ دلیل انتخاب خود را توضیح دهید.



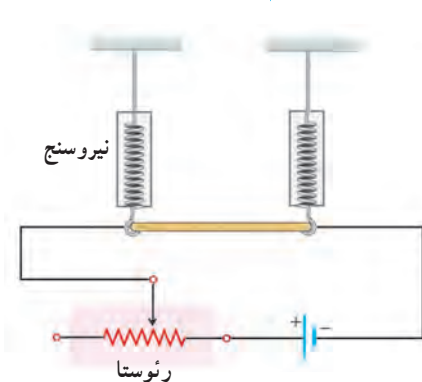
۱۱ یک میله رسانا به پایانه‌های یک باتری وصل شده و مطابق شکل در فضای بین قطب‌های یک آهنربای نعلی شکل آویزان شده است؛ با بستن کلید K، چه اتفاقی برای میله رسانا رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.



## مسئله‌ها



۱ سیم رسانای CD به طول ۲m مطابق شکل روبه‌رو عمود بر میدان مغناطیسی با اندازه  $5\text{T}$  قرار گرفته است؛ اگر نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیم برابر ۱N باشد، جهت و اندازه جریان عبوری از سیم را تعیین کنید.



۲ یک سیم حامل جریان  $1/6$  آمپر مطابق شکل روبه‌رو با دو نیروسنج فتری که به دو انتهای آن بسته شده‌اند، به‌طور افقی و در راستای غرب به شرق قرار دارد. میدان مغناطیسی زمین را افقی و یکنواخت و درست به طرف شمال با بزرگی  $5\text{mT}$  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 کند؟ جرم یک متر از طول این سیم ۸ گرم است ( $g = 10\text{N/kg}$ ).

۳ پروتونی با سرعت  $10^6\text{m/s}$  تحت زاویه  $4/4$  در میدان مغناطیسی  $18\text{mT}$  در حرکت است. الف) بزرگی نیروی وارد بر این پروتون را محاسبه کنید.

ب) اگر تنها این نیرو بر پروتون وارد شود، شتاب پروتون را حساب کنید. (بار الکتریکی پروتون  $10^{-19}\text{C}$  و جرم آن  $10^{-27}\text{kg}$  است.)

۴ از پیچه مسطحی به شعاع  $5\text{cm}$  که از  $200$  دور سیم نازک درست شده است، جریان  $1/2\text{A}$  می‌گذرد. میدان مغناطیسی را در مرکز پیچه حساب کنید.

۵ سیملوله‌ای شامل  $250$  دور حلقه است که دور یک لوله پلاستیکی توخالی به طول  $14$  متر پیچیده شده است. اگر جریان گذرنده از سیملوله  $8\text{A}$  باشد، بزرگی میدان مغناطیسی درون سیملوله را حساب کنید.

۶ در (شکل روبه‌رو) دو سیملوله P و Q هم‌محور، طول برابر و تعداد دور متفاوت دارند. تعداد دور سیملوله P برابر  $200$  و تعداد دور سیملوله Q برابر  $300$  است. اگر جریان  $1\text{A}$  از سیملوله Q عبور کند، از سیملوله P چه جریانی باید عبور کند تا برآیند میدان مغناطیسی ناشی از دو سیملوله در نقطه M (روی محور دو سیملوله) صفر شود؟

۷ الکترونی با سرعت  $10^5\text{m/s}$  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 الکتریکی‌ای همین نیرو را ایجاد می‌کند؟ (بار الکتریکی الکترون  $10^{-19}\text{C}$  است.)

## القای الکترومغناطیسی



القای الکترومغناطیسی، اساس تولید انرژی الکتریکی در همهٔ نیروگاه‌های برق است که جریان متناوب را تولید، منتقل و توزیع می‌کند. پالش مهم مهندسان برق، طراحی و سافت سامانه‌هایی است که به کمک آنها توان الکتریکی را به‌طور مؤثر و با اتلاف کم منتقل کنند.

یک تکه سیم مسی را به صورت سیملوله یا پیچه، دور یک مداد بپیچید. اگر این پیچه را در مداری قرار دهید خواهید دید که رفتاری کاملاً متفاوت از یک تکه سیم راست خواهد داشت. در یک موتور بنزینی اتومبیل، پیچه‌ای شبیه این باعث می‌شود باتری ۱۲ ولتی اتومبیل، هزاران ولت اختلاف پتانسیل برای تولید جرقه در سر شمع‌ها تأمین کند و موتور اتومبیل را به راه اندازد. پیچه‌های دیگری شبیه این برای روشن کردن لامپ‌های کم مصرف یا مهتابی به کار می‌روند. پیچه‌های بزرگی که زیر سطح خیابان‌های شهری برای کنترل رفت و آمد و به کار انداختن چراغ‌های راهنمایی قرار داده می‌شوند نیز نمونه دیگری از کاربرد القای الکترومغناطیسی است که در این فصل با آن آشنا خواهیم شد.

### ۵-۱- پدیده القای الکترومغناطیسی

در فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیدیم که با استفاده از روش القای الکتریکی می‌توان اجسام رسانا را باردار کرد. در فصل گذشته نیز با پدیده القای مغناطیسی آشنا شدیم. در مورد اول بر اثر القا، بار الکتریکی در ماده رسانا پدیدار می‌شود. در مورد دوم، بر اثر القا در ماده فرومغناطیسی خاصیت مغناطیسی به وجود می‌آید. پدیده القایی دیگری نیز وجود دارد که در آن، جریان الکتریکی در یک رسانا القا می‌شود. این پدیده را القای الکترومغناطیسی می‌نامند. با انجام آزمایش زیر با این پدیده آشنا می‌شوید.

### آزمایش ۵-۱

#### بررسی پدیده القای الکترومغناطیسی

**وسایله‌های آزمایش:** میلی آمپرسنج صفر وسط (گالوانومتر)، آهنربای میله‌ای، سیملوله یا پیچه و سیم رابط  
**شرح آزمایش:**

- ۱- با سیملوله و گالوانومتر مداری مانند شکل زیر را ببندید.
- ۲- قطب N آهنربای میله‌ای را مطابق شکل به سیملوله نزدیک کنید. مشاهدات خود را هنگام انجام دادن این عمل، یادداشت کنید.
- ۳- قطب N آهنربای میله‌ای را نزدیک سیملوله نگه دارید. سپس آن را از سیملوله دور کنید؛ مشاهده خود را بنویسید.
- ۴- بندهای ۲ و ۳ را با قطب S آهنربا نیز انجام دهید.
- ۵- آزمایش بالا را در حالی انجام دهید که آهنربا ثابت باشد و سیملوله نسبت به آن دور و نزدیک شود؛ آیا در نتیجه آزمایش تغییری رخ می‌دهد؟ توضیح دهید.



## القای مغناطیسی



**شکل ۱-۵** با حرکت آهنربا به طرف سیملوله یا پیچه گالوانومتر جریان القایی را نشان می‌دهد.

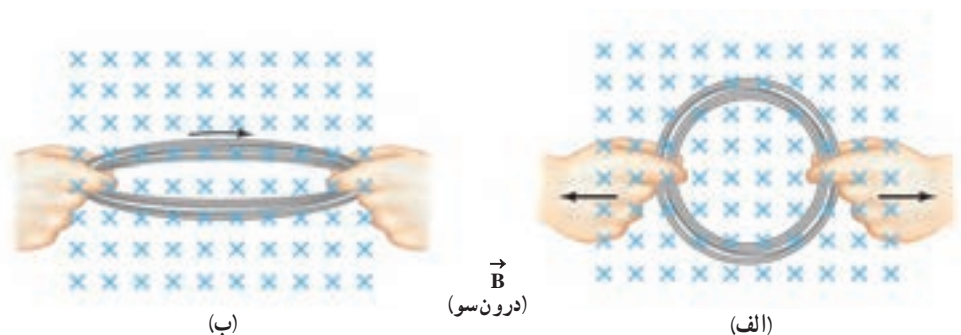
در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی دانشمند انگلیسی و تقریباً همزمان با او جوزف هانری دانشمند آمریکایی، با انجام دادن آزمایش‌هایی مانند آزمایش ۵-۱ دریافتند که هنگام دور و نزدیک کردن آهنربا به پیچه، عقربه میلی آمپرسنج منحرف می‌شود، و عبور جریانی را از مدار نشان می‌دهد؛ مانند وقتی که مولد در مدار وجود داشته باشد. یعنی با حرکت آهنربا نسبت به پیچه، یک جریان الکتریکی در مدار القا می‌شود. این پدیده را **القای الکترومغناطیسی** و جریان تولید شده را **جریان الکتریکی القایی** می‌نامند. القای الکترومغناطیسی اساس کار مولد جریان متناوب، دینام، مبدل‌ها و بسیاری از وسیله‌های الکتریکی است.

دور یا نزدیک شدن آهنربا به پیچه باعث تغییر میدان مغناطیسی در محل پیچه می‌شود (شکل ۱-۵)؛ و همین امر جریان الکتریکی را در پیچه القا می‌کند. پس می‌توان چنین نتیجه گرفت که **تغییر اندازه میدان مغناطیسی در محل یک مدار بسته باعث القای جریان الکتریکی در آن مدار می‌شود.**

آزمایش نشان می‌دهد که علاوه بر روش گفته شده، به روش‌های دیگر نیز می‌توان در یک پیچه جریان الکتریکی القا کرد.

اگر پیچه‌ای از یک سیم انعطاف‌پذیر را مطابق شکل ۵-۲ در میدان مغناطیسی یکنواخت B قرار دهیم، سپس شکل پیچه را تغییر دهیم تا مساحت حلقه آن تغییر کند، خواهیم دید که در هنگام این کار نیز جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که:

**تغییر مساحت مدار بسته در میدان مغناطیسی نیز می‌تواند جریان القایی در مدار تولید کند.**



**شکل ۲-۵** با تغییر مساحت پیچه در میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

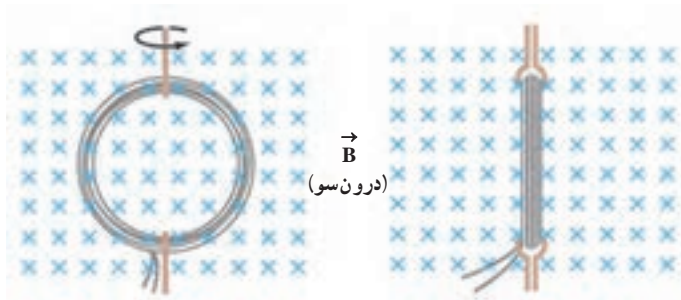
با انجام دادن فعالیت زیر، با یک روش دیگر تولید جریان القایی آشنا می‌شوید.

## فعالیت ۱-۵

یک آهنربای میله‌ای را در نزدیکی پیچه‌ای قرار دهید. بدون تغییر فاصله آهنربا از پیچه، آن را بچرخانید. هر تغییری را که در گالوانومتر مشاهده می‌کنید، گزارش دهید.

با چرخاندن پیچه در میدان مغناطیسی یکنواخت مطابق شکل ۳-۵، اندازه میدان مغناطیسی و مساحت حلقه مدار تغییر نمی‌کند، ولی زاویه بین میدان مغناطیسی و سطح پیچه تغییر می‌کند. از این فعالیت می‌توان نتیجه گرفت که:

تغییر زاویه بین پیچه و راستای میدان مغناطیسی نیز سبب برقراری جریان الکتریکی القایی می‌شود.



شکل ۳-۵ هنگام چرخش پیچه در میدان مغناطیسی و تغییر زاویه بین پیچه و میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود.

### مثال ۱-۵

دریافت خود را از شکل‌های زیر بنویسید.



**پاسخ:** در شکل الف با ورود آهنربا به پیچه جریانی در آن القا شده است. در شکل ب، آهنربا با همان شرایط قسمت الف، وارد پیچه‌ای با تعداد دور بیشتر شده است. در نتیجه همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود جریان بزرگ‌تری در پیچه القا شده است.

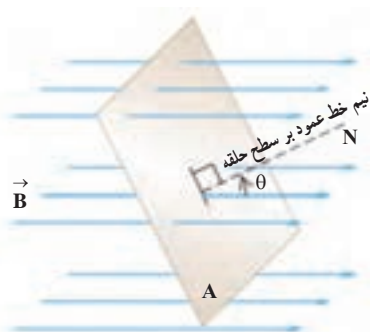
### پرسش ۱-۵

دریافت خود را از شکل‌های زیر بنویسید.



## الفای مغناطیسی

## ۲-۵- شار مغناطیسی



شکل ۲-۴ نیم خط عمود بر سطح

A با میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  زاویه  $\theta$  می‌سازد.

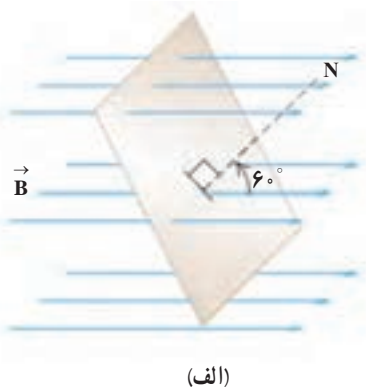
در آزمایش‌های قبل دیدیم که بر اثر تغییر میدان مغناطیسی در حلقه، تغییر مساحت حلقه، و یا تغییر زاویه بین سطح حلقه و جهت میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در پیچه القا می‌شود. کمیت موسوم به شار مغناطیسی، این سه کمیت را دربر دارد. این کمیت نرده‌ای به صورت زیر معرفی می‌شود. فرض کنید حلقه‌ای به مساحت A مطابق شکل ۲-۵ در میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  قرار دارد. شار میدان مغناطیسی یکنواخت<sup>۱</sup> که از سطح حلقه می‌گذرد به صورت زیر تعریف و با نماد  $\Phi$  نشان داده می‌شود.

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (۱-۵)$$

که در آن،  $\theta$  زاویه بین بردار میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  و نیم خط عمود بر سطح حلقه است (این نیم خط را می‌توان به طور اختیاری در هر یک از دو طرف سطح حلقه رسم کرد، ولی پس از انتخاب نباید جهت آن را عوض کرد). یکای شار مغناطیسی در SI ویر (Wb) است. از معادله ۱-۵ چنین برمی‌آید:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$$

## مثال ۲-۵



(الف)

الف) شار مغناطیسی عبوری از سطح یک قاب مستطیلی شکل به ابعاد  $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  را به دست آورید که نیم خط عمود بر آن با میدان مغناطیسی یکنواخت  $100 \text{ G}$  مطابق شکل الف زاویه  $60^\circ$  می‌سازد.

ب) اگر این قاب را بچرخانیم به طوری که زاویه نیم خط عمود بر آن با خط‌های میدان مغناطیسی از  $60^\circ$  به  $30^\circ$  کاهش یابد، شار مغناطیسی چقدر تغییر می‌کند؟

پاسخ: الف) مطابق شکل الف زاویه بین خط‌های میدان و نیم خط عمود بر سطح برابر  $60^\circ$  است. بنابراین داریم:

$$A = 30 \times 20 = 600 \text{ cm}^2 = 6 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$B = 100 \text{ G} = 10^{-2} \text{ T}$$

$$\Phi = BA \cos \theta = (10^{-2} \text{ T}) \times (6 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \cos 60^\circ = 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

ب) در وضعیت شکل ب،  $\theta = 30^\circ$  است. به این ترتیب داریم:

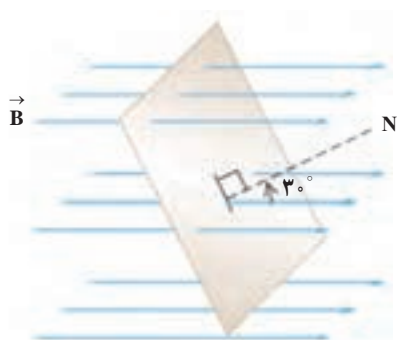
$$\Phi' = BA \cos \theta' = (10^{-2} \text{ T}) \times (6 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \cos 30^\circ$$

$$\Phi' = 5/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

به این ترتیب تغییر شار حاصل از این چرخش برابر است با:

$$\Delta \Phi = \Phi' - \Phi = 5/2 \times 10^{-4} \text{ Wb} - 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Delta \Phi = 2/2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

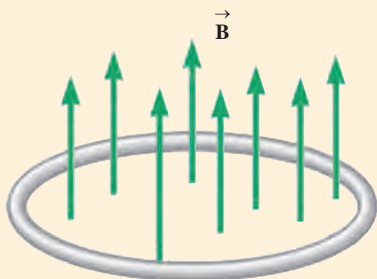


(ب)

۱- اگر میدان مغناطیسی یکنواخت نباشد، رابطه مربوط به شار مغناطیسی پیچیده‌تر می‌شود که فراتر از سطح این کتاب است.



## تمرین ۱۵



حلقه‌ای به مساحت  $5 \text{ cm}^2$  مطابق شکل روبه‌رو در یک میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  قرار دارد، به طوری که خط‌های میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  بر سطح حلقه عمودند. اگر اندازه میدان مغناطیسی بدون تغییر جهت به  $3 \text{ T}$  افزایش یابد، شار مغناطیسی عبوری از سطح حلقه چقدر تغییر می‌کند؟

تا اینجا دیدیم که تغییر هر یک از کمیت‌های  $A$ ،  $B$  و زاویه بین  $\vec{B}$  و نیم‌خط عمود بر سطح پیچیده باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، و تغییر شار مغناطیسی جریان الکتریکی القایی در مدار به وجود می‌آورد. این وضعیت درست شبیه به حالتی است که یک مولد در مدار باشد، و نیروی محرکه آن جریانی در مدار ایجاد کرده باشد. علاوه بر این، آزمایش نشان می‌دهد که هرچه تغییر شار سریع‌تر باشد، جریان القایی بزرگ‌تر خواهد شد؛ مثلاً در آزمایش‌های مربوط به شکل‌های ۲-۵ تا ۴-۵ هرچه حرکتی که باعث تغییر شار مغناطیسی می‌شود، سریع‌تر انجام شود، عقربه گالوانومتر بیشتر منحرف می‌شود، و این نشان می‌دهد که جریان القایی بزرگ‌تری به وجود آمده است.

قانون القای الکترومغناطیسی فارادی، که موضوع بخش بعدی است، نشان می‌دهد که هنگام تغییر شار مغناطیسی، یک نیروی محرکه الکتریکی که آن را **نیروی محرکه القایی** می‌نامیم در پیچیده ایجاد می‌شود.

## ۳-۵- قانون القای الکترومغناطیسی فارادی

عامل مشترک در تمام اثرهای القای الکترومغناطیسی که در بخش قبل دیدیم، تغییر شار مغناطیسی عبوری از یک مدار بسته است. بنابر قانون فارادی هرگاه شار مغناطیسی‌ای که از مدار بسته‌ای می‌گذرد تغییر کند، نیروی محرکه‌ای در آن القا می‌شود که بزرگی آن با آهنگ تغییر شار مغناطیسی متناسب است؛ یعنی هرچه آهنگ تغییر شار مغناطیسی بیشتر باشد، نیروی محرکه القایی و در نتیجه جریان القایی تولید شده در مدار بیشتر خواهد بود. قانون فارادی را برای یک مدار بسته تک حلقه می‌توان با رابطه زیر بیان کرد.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2-5)$$

در این رابطه  $\mathcal{E}$  نیروی محرکه القایی بر حسب ولت و  $\frac{d\Phi}{dt}$  آهنگ تغییر شار مغناطیسی (یعنی مشتق شار نسبت به زمان) بر حسب ویر بر ثانیه  $\left(\frac{\text{Wb}}{\text{s}}\right)$  است.



مایکل فارادی (۱۷۹۱-۱۸۶۷)

پسر یک آهنگر انگلیسی بود. به گفته خود او: «تحصیلات من بسیار معمولی بود. خواندن را کمی بیشتر از حد مقدماتی و نوشتن و ریاضیات را در حد شاگرد یک مدرسه روزانه می‌دانستم. ساعت‌های خارج از مدرسه من در خانه و خیابان‌ها می‌گذشت.» او در سن ۱۲ سالگی به عنوان شاگرد در یک کتابفروشی مشغول به کار شد. پس از آن با یک صحافی همکاری داشت.

فارادی ۱۹ ساله بود که به او اجازه داده شد تا در جلسه سخنرانی بیرهمفوری دیوی که در مؤسسه سلطنتی لندن برگزار می‌شد، حضور یابد. مؤسسه سلطنتی یک مرکز مهم پژوهش و آموزش علوم بود. فارادی به شدت علاقه‌مند علوم شد و پیش خود به تحصیل علم شیمی پرداخت. در سال ۱۸۱۳ تقاضای شغلی در مؤسسه سلطنتی کرد و دیوی او را به عنوان یک همکار در امور پژوهشی استخدام کرد. فارادی به زودی نوع خود را به عنوان یک آزمایشگر نشان داد. او مقاله‌های مهمی در شیمی، خواص مغناطیسی، الکتریسیته و نور نوشت و سرانجام به عنوان رئیس مؤسسه سلطنتی برگزیده شد. فارادی را به سبب کشف‌های بسیارش یکی از بزرگ‌ترین دانشمندان تجربی عصر خود می‌دانند.



اگر مدار از پیچهای با  $N$  دور مشابه تشکیل شده باشد، قانون القای فارادی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3-5)$$

اگر مقاومت پیچه برابر  $R$  باشد، جریان القا شده در آن از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (4-5)$$

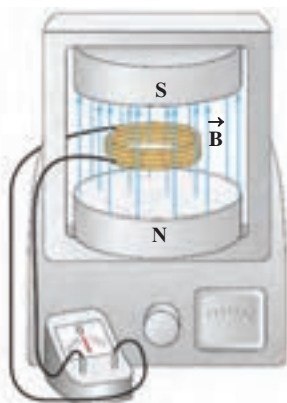
همچنین اگر شار مغناطیسی که از پیچه می گذرد در بازه زمانی  $\Delta t$  به اندازه  $\Delta\Phi$  تغییر کرده باشد، آهنگ متوسط تغییر شار مغناطیسی در بازه زمانی  $\Delta t$  با  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  متناسب خواهد بود. نیروی محرکه القایی متوسط (که با  $\bar{\mathcal{E}}$  نمایش داده می شود) در این پیچه از رابطه زیر به دست می آید:

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5-5)$$

همان طور که از رابطه (4-5) دیده می شود، هرچه مقاومت پیچه یا مداری که در آن شار مغناطیسی تغییر می کند، بیشتر باشد، جریان القایی کوچک تر می شود. لازم به توجه است که

برای پیدا کردن جریان القایی متوسط در پیچه به جای رابطه 4-5، باید از رابطه  $\bar{I} = -\frac{N}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  استفاده کنیم.

### مثال 3-5



پیچه ای شامل  $200$  دور که مساحت هر حلقه آن  $24 \text{ cm}^2$  است مطابق شکل روبه رو بین قطب های یک آهنربای الکتریکی قرار گرفته است که میدان مغناطیسی یکنواخت تولید می کند. خط های میدان بر سطح پیچه عمودند. اگر بزرگی میدان  $\vec{B}$  در بازه زمانی  $3/2 \text{ ms}$  از  $0.18 \text{ T}$  به  $0.22 \text{ T}$  افزایش یابد،

الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط ایجاد شده در پیچه چقدر است؟

ب) اگر مقاومت پیچه  $1 \Omega$  باشد، اندازه جریان القایی متوسط که از پیچه می گذرد

چقدر است؟

پاسخ: الف) با توجه به داده های مسئله داریم:

$$N=200 \text{ دور}, A=24 \text{ cm}^2=24 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \theta=0$$

$$B_1=0.18 \text{ T}, B_2=0.22 \text{ T}, \Delta t=3/2 \text{ ms}=3/2 \times 10^{-3} \text{ s}, \bar{\mathcal{E}}=?$$

ابتدا شار مغناطیسی را در دو حالت اولیه و نهایی پیدا می کنیم.

$$\Phi_1 = B_1 A \cos\theta = (0.18 \text{ T})(24 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \cos 0^\circ \simeq 4/3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_r = B_r A \cos\theta = (0.22 \text{ T})(24 \times 10^{-2} \text{ m}^2) \cos 0^\circ \simeq 5.3 \times 10^{-2} \text{ Wb}$$

تغییر شار مغناطیسی برابر است با:

$$\Delta\Phi = \Phi_r - \Phi_i = (5.3 \times 10^{-2} \text{ Wb}) - (4.3 \times 10^{-2} \text{ Wb}) = 1.0 \times 10^{-2} \text{ Wb}$$

با قرار دادن این مقدار و داده‌های بالا در رابطه ۵-۵ داریم:

$$\bar{\mathcal{E}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(200) \frac{(1.0 \times 10^{-2} \text{ Wb})}{(3/2 \times 10^{-3} \text{ s})} = -620 \text{ V}$$

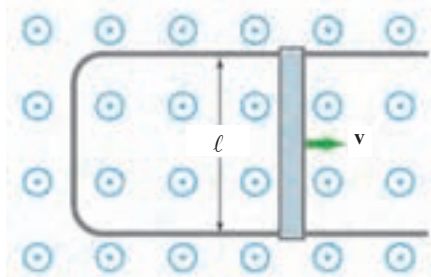
و اندازه آن برابر است با:

$$|\bar{\mathcal{E}}| = 620 \text{ V} = 6.2 \text{ V}$$

ب) اندازه جریان متوسط که در پیچ برقرار می‌شود برابر است با:

$$\bar{I} = |\bar{\mathcal{E}}|/R = (6.2 \text{ V})/(10 \Omega) = 0.62 \text{ A}$$

### مثال ۴-۵

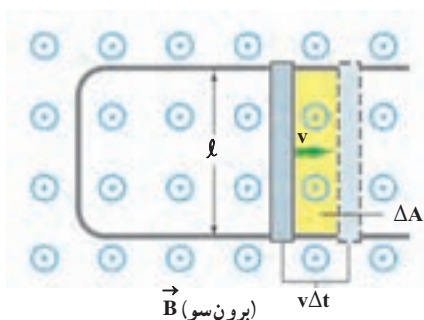


$\vec{B}$  (برون سو)

شکل روبه‌رو رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  به بزرگی  $0.18 \text{ T}$  نشان می‌دهد که عمود بر صفحه شکل و رو به بیرون است. میله‌ای فلزی (سیم لغزنده) به طول  $l = 20 \text{ cm}$  بین دو بازوی رسانا قرار دارد و مداری را تشکیل می‌دهد. میله را با سرعت ثابت  $v = 20 \text{ m/s}$  به طرف راست حرکت می‌دهیم. بزرگی نیروی محرکه القایی متوسط را پیدا کنید.

**پاسخ:** با حرکت میله فلزی و به دلیل افزایش سطح حلقه، شار مغناطیسی تغییر می‌کند. چون میدان مغناطیسی در سطح حلقه یکنواخت است، پس می‌توانیم شار مغناطیسی را از رابطه  $\Phi = BA \cos\theta$  محاسبه کنیم. از طرفی زاویه نیم خط عمود بر سطح حلقه با جهت میدان  $\vec{B}$  صفر است ( $\theta = 0^\circ$ ). در نتیجه  $\Phi = BA$ . از قانون القای فارادی داریم:

$$\bar{\mathcal{E}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = -B \frac{\Delta A}{\Delta t}$$



$\vec{B}$  (برون سو)

برای محاسبه  $\Delta A/\Delta t$ ، توجه کنید که میله فلزی لغزنده در مدت  $\Delta t$  مسافت  $v\Delta t$  را طی می‌کند (شکل روبه‌رو) و سطح حلقه به مقدار  $\Delta A = \ell v\Delta t$  افزایش می‌یابد. به این ترتیب نیروی محرکه القا شده برابر است با:

$$\bar{\mathcal{E}} = -B \frac{\ell v \Delta t}{\Delta t} = -B \ell v$$

با قرار دادن مقادیر داده شده، در رابطه بالا، داریم:

$$\bar{\mathcal{E}} = -(0.18 \text{ T})(20 \times 10^{-2} \text{ m})(20 \text{ m/s}) = -0.72 \text{ V}$$

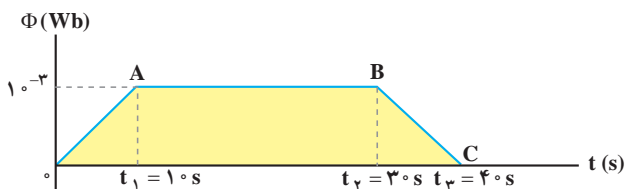
و اندازه آن برابر است با:

$$|\bar{\mathcal{E}}| = 0.72 \text{ V} = 720 \text{ mV}$$

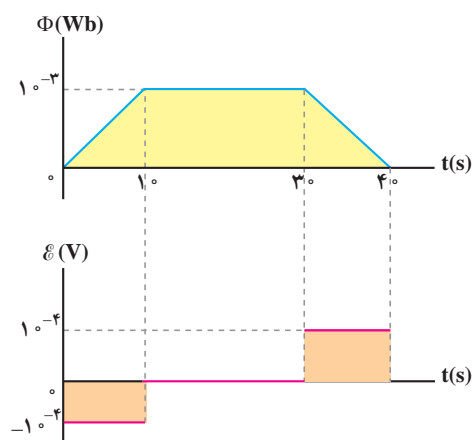
## القایی مغناطیسی

توجه کنید که به علت ثابت بودن سرعت میله لغزنده، نیروی محرکه القایی ثابت است. از این رو، رسانای U شکل با سیم لغزنده یک مولد جریان مستقیم است. سرانجام چون میله از رسانای U شکل خارج و تماس آن قطع و جریان متوقف می شود، این وسیله کاربرد چندانی ندارد.

## مثال ۵-۵

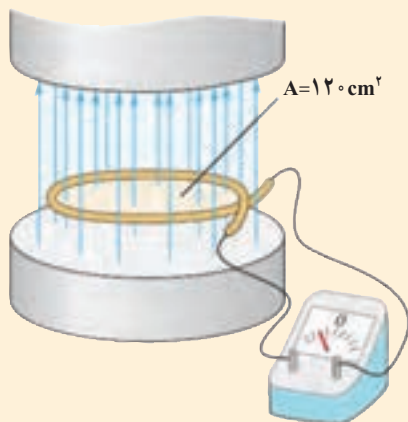


تغییرات شار مغناطیسی برحسب زمان که از یک حلقه می گذرد در نمودار شکل روبه رو داده شده است. نمودار نیروی محرکه القا شده در حلقه را برحسب زمان رسم کنید.



**پاسخ:** نمودار شار مغناطیسی برحسب زمان نشان می دهد که در بازه زمانی  $0$  تا  $t_1$  شار به صورت خطی افزایش می یابد. در نتیجه، در این بازه نیروی محرکه القایی که برابر است با  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ، مقداری ثابت (برابر شیب خط OA) و منفی خواهد داشت و برابر است با  $10^{-4}$  ولت. در بازه زمانی  $t_1$  تا  $t_2$  شار ثابت مانده است. بنابراین،  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0$  و نیروی محرکه القایی در این بازه برابر صفر است. در بازه زمانی  $t_2$  تا  $t_3$ ، شار به صورت خطی کاهش یافته است،  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$ ؛ در نتیجه، نیروی محرکه القایی در این بازه مثبت و برابر است با  $10^{-4}$  ولت. نمودار نیروی محرکه القایی برحسب زمان در شکل روبه رو رسم شده است.

## تمرین ۵-۵



میدان مغناطیسی بین قطب های آهنربای الکتریکی شکل روبه رو که بر سطح حلقه عمود است با زمان تغییر می کند و در مدت  $\Delta t = 0.5$  S از  $0.28$  T به  $-0.12$  T می رسد (تغییر علامت نشان می دهد که جهت میدان  $\vec{B}$  وارون شده است). الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در حلقه را به دست آورید. ب) اگر مقاومت حلقه  $2 \Omega$  باشد بزرگی جریان القایی متوسط در حلقه را پیدا کنید.



سرعت سنج دو چرخه های مسابقه ای شامل یک آهنربای کوچک و یک پیچه است. آهنربا به یکی از پره های چرخ جلو و پیچه به دو شاخ فرمان متصل است (شکل روبه رو). دو سر پیچه با سیم های رسانا به سرعت سنج (که در واقع یک رایانه کوچک است) وصل شده است. به نظر شما سرعت سنج دو چرخه چگونه کار می کند؟ این موضوع را در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس درس ارائه دهید.



(الف) ذره های فزومغناطیسی، که در واقع هر کدام آهنربای بسیار کوچکی هستند، داده ها را به صورت صفر یا یک در خود ذخیره می کنند. در نوار مغناطیسی پشت هر کارت میلیاردها ذره فزومغناطیسی وجود دارد.



کارت خوان

(ب) با کشیدن کارت در دستگاه کارت خوان، میدان مغناطیسی ناشی از ذره های فزومغناطیسی، جریان اندکی در پیچه تعبیه شده در دستگاه کارت خوان القا می کند.

### کارت های اعتباری و دستگاه های کارت خوان

نوار مغناطیسی پشت کارت های اعتباری حاوی میلیاردها ذره فزومغناطیسی (آهنربای بسیار کوچک) است که نوعی چسب خاص، آنها را به هم متصل می کند. داده ها را که به صورت دودویی، با صفر و یک به رمز درآورده اند، در این ذره های مغناطیسی ذخیره می کنند (شکل الف). وقتی کارت اعتباری شما درون دستگاه کارت خوان کشیده می شود، میدان مغناطیسی ناشی از ذره های مغناطیسی، روی پیچه تعبیه شده در دستگاه کارت خوان اثر می گذارد و جریان اندکی را در آن القا می کند (شکل ب). این جریان بسیار کوچک توسط دستگاه دیگری تقویت و داده های ذخیره شده در آن رمزگشایی می شود. پس از رمزگشایی داده ها، دستور مورد نظر انجام می شود.

### مطالعه آزاد



### معاینه مغز با نیروهای محرکه القایی

برانگیزش مغناطیسی فرا جمجمه ای (TMS)<sup>۱</sup> روشی برای بررسی عملکرد بخش های مختلف مغز است. در این روش پیچه ای روی سر شخص بیمار قرار داده می شود که جریان الکتریکی متغیری از آن می گذرد و در نتیجه میدان مغناطیسی متغیری تولید می کند. این میدان نیروی محرکه القایی به وجود می آورد و باعث فعالیت الکتریکی مغز در ناحیه ای می شود که در زیر پیچه قرار دارد. با مشاهده واکنش TMS مغز (مثلاً اینکه کدام عضله ها به علت برانگیزش بخش خاصی از مغز حرکت می کنند) پزشک می تواند شرایط عصب شناختی مختلفی را بیازماید.

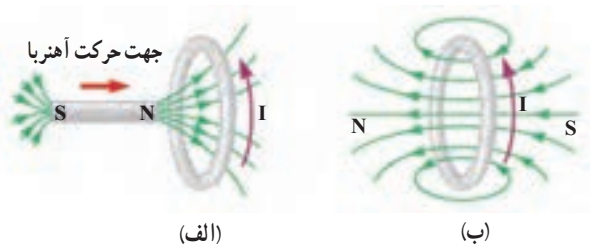
۱- Transcranial Magnetic Stimulation (TMS)

## ۴-۵- قانون لنز

سه سال پس از آنکه فارادی قانون القای الکترومغناطیسی را ارائه کرد، هاینریش لنز دانشمند روس تبار در سال ۱۸۳۴ میلادی قاعده‌ای را موسوم به **قانون لنز**، برای تعیین جهت جریان القایی در یک مدار پیشنهاد کرد. قانون لنز حاکی از آن است که: **جریان حاصل از نیروی محرکه القایی در یک مدار یا پیچ در جهتی است که آثار مغناطیسی ناشی از آن با عامل به وجودآورنده جریان القایی، یعنی تغییر شار مغناطیسی، مخالفت می‌کند.**

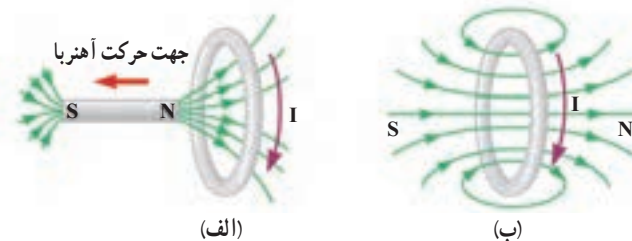
علامت منفی در رابطه ۵-۵ نشان دهنده همین مخالفت است که دلیل آن توسط قانون لنز بیان می‌شود. توضیح دقیق‌تر این مطلب فراتر از سطح این کتاب است و در اینجا تنها به ذکر مثال‌هایی از چگونگی استفاده از قانون لنز برای تعیین جهت جریان القایی اکتفا می‌کنیم. شکل ۵-۵ الف آهنربایی را در حال نزدیک شدن به یک حلقه رسانا نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود جریان در حلقه در جهتی القا شده است که میدان مغناطیسی حلقه با نزدیک شدن آهنربا به حلقه مخالفت می‌کند (شکل ۵-۵ ب).

**شکل ۵-۵ الف** با نزدیک شدن آهنربا به حلقه رسانا، در آن جریان القایی ایجاد می‌شود. (ب) جریان حاصل از نیروی محرکه القایی در حلقه در جهتی است که با نزدیک شدن آهنربا مخالفت می‌کند. در شکل ب برای سادگی، آهنربا نشان داده نشده است.

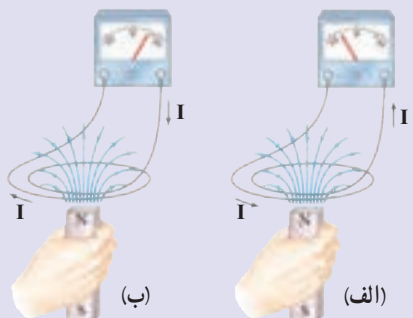


همچنین اگر مطابق شکل ۵-۶ الف، قطب N آهنربا را از حلقه رسانا دور کنیم، باز هم جریان القایی در جهتی خواهد بود که میدان مغناطیسی تولید شده توسط حلقه، در مقابل قطب N آهنربا قطب S ایجاد و ربایش بین این دو قطب با دور شدن قطب N آهنربا مخالفت کند (شکل ۵-۶ ب).

**شکل ۵-۶ الف** با دور شدن آهنربا از حلقه، جریانی در آن القا می‌شود. (ب) میدان مغناطیسی حاصل از جریان القایی در حلقه، با دور شدن آهنربا از حلقه مخالفت می‌کند. در شکل ب برای سادگی، آهنربا نشان داده نشده است.



## پرسش ۳-۵



با توجه به جهت جریان القایی در هر یک از شکل‌های الف و ب، و با توجه به قانون لنز، در هر مورد توضیح دهید که آیا آهنربا رو به بالا حرکت می‌کند یا رو به پایین.

## مطالعه آزاد

## اثر دیامغناطیسی

در فصل قبل با مواد پارامغناطیسی و فرومغناطیسی آشنا شدیم. همان طور که دیدیم در این مواد هر اتم دارای یک دو قطبی مغناطیسی دائمی است.

از دیدگاه فیزیک کلاسیک، گردش هر الکترون به دور هسته اتم را می توان به صورت یک حلقه بسیار کوچک جریان در نظر گرفت. هرگاه ماده ای در یک میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، بنا بر قانون لنز در این حلقه های کوچک جریان، یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیسی خارجی القا می شود. به این ویژگی که در اتم های همه مواد در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی رخ می دهد، پدیده یا اثر دیامغناطیسی گفته می شود.

اثر دیامغناطیسی در موادی که اتم های آن دارای دو قطبی های مغناطیسی دائم نباشند، بهتر نمایان می شود. این اثر در مواد فرو مغناطیسی و پارامغناطیسی نمود کمتری دارد؛ زیرا اثر دو قطبی های مغناطیسی دائم این گونه مواد بسیار بیشتر از اثر دو قطبی های القایی است که بر اثر میدان مغناطیسی خارجی در اتم های ماده القا می شود.

در موادی نظیر بیسموت، جیوه، نقره، سرب، مس، نمک طعام و شیشه، اثر دیامغناطیسی به خوبی نمایان می شود. به همین جهت به این گونه مواد، مواد دیامغناطیسی نیز گفته می شود.

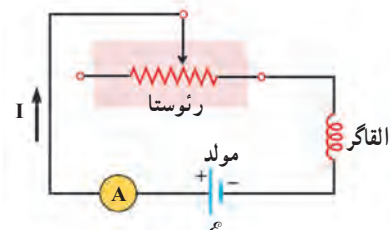
## ۵-۵- القاگرها و اثر خودالقایی

در فصل ۲ دیدیم که در فضای بین صفحه های یک خازن، میدان الکتریکی ایجاد می شود و انرژی الکتریکی توسط همین میدان در خازن ذخیره می شود. به همین ترتیب، می توان از القاگر که در ادامه معرفی خواهد شد، برای تولید میدان مغناطیسی دلخواه و همچنین ذخیره انرژی مغناطیسی توسط میدان مغناطیسی استفاده کرد. افزون بر این، القاگر مانند مقاومت و خازن یکی از اجزای ضروری مدارهای الکترونیکی است. در مدار جریان مستقیم، القاگر به پایا نگاه داشتن جریان در برابر افت و خیزهای emf اعمال شده کمک می کند؛ در مدار جریان متناوب (که در پایان همین فصل با آن آشنا خواهید شد)، القاگر از تغییرات جریان که سریع تر از مقدار تعیین شده باشد جلوگیری می کند. شکل ۵-۷ تصویر چند القاگر را در اندازه ها و شکل های متفاوت نشان می دهد. نماد مداری معمول برای القاگر به صورت  $\text{---}\text{---}\text{---}$  است.

برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر، مداری را مطابق شکل ۵-۸ در نظر بگیرید. این مدار شامل یک مولد (باتری)، یک رئوستا و القاگری است که به طور متوالی به یکدیگر بسته شده اند. با تغییر مقاومت رئوستا، جریان در مدار تغییر می کند (چرا؟). تغییر جریان در مدار، سبب تغییر جریان عبوری از القاگر می شود و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از القاگر تغییر می کند. این فرایند سبب القای نیروی محرکه خودالقایی در القاگر می شود که بنا به قانون لنز با هرگونه تغییر جریان عبوری از آن مخالفت می کند. این پدیده که می تواند در هر القاگری (از قبیل پیچه یا سیملوله) رخ دهد اثر خودالقایی نامیده می شود.



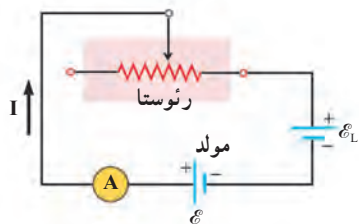
شکل ۵-۷ تصویری از چند القاگر در اندازه ها و شکل های متفاوت



شکل ۵-۸ مداری ساده برای بررسی اثر خودالقایی در یک القاگر



## القای مغناطیسی



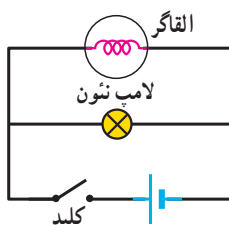
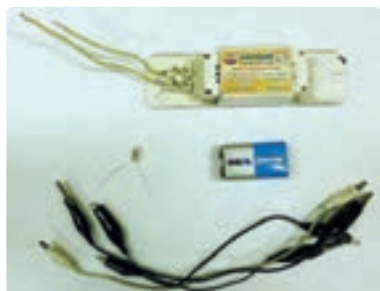
**شکل ۹-۵** اثر خودالقایی سبب می‌شود که القاگر مانند مولدی با نیروی محرکه  $\mathcal{E}_1$  در مدار عمل کند.

در مدار شکل ۵-۸، بنابه قانون لنز جهت نیروی محرکه خودالقایی چنان است که می‌خواهد مانع تغییر شار مغناطیسی‌ای شود که مولد ایجاد می‌کند. برای مثال، اگر مقاومت رئوستا کاهش یابد، جریان و در نتیجه شار مغناطیسی عبوری از القاگر می‌خواهد افزایش یابد. در نتیجه نیروی محرکه خودالقایی در جهتی ایجاد می‌شود که با افزایش شار مخالفت می‌کند. به عبارت دیگر در این حالت نیروی محرکه خودالقایی معادل نیروی محرکه باتری‌ای عمل می‌کند که در جهت مخالف مولد در مدار قرار گرفته باشد (شکل ۵-۹).

## پرسش ۱۴-۵

فرض کنید در مدار شکل ۵-۹، به جای کاهش مقاومت رئوستا، مقاومت آن را افزایش دهیم. دلیل ایجاد نیروی محرکه خودالقایی و جهت آن را مورد بحث قرار دهید.

## آزمایش ۲-۵



## بررسی اثر خودالقایی در یک پیچه

**وسایله‌های آزمایش:** لامپ نئون (لامپ فازمتری)، القاگر (۱۰۰۰ دور یا بالاتر)، باتری ۹ ولتی، سیم رابط

## شرح آزمایش:

- ۱- مدار مطابق شکل روبه‌رو ببندید. (لامپ، باتری و القاگر با یکدیگر موازی اند).
- ۲- سر آزاد سیم رابط را به‌طور بی‌دری به قطب دیگر باتری تماس داده و جدا

کنید. دلیل آنچه را مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

**توجه:** مطابق شکل، به جای القاگر می‌توانید از القاگر لامپ‌های مهتابی (که به اشتباه ترانس نامیده می‌شوند) استفاده کنید.

## مطالعه آزاد



## القاگر، انتقال انرژی الکتریکی و آذرخش

برخورد آذرخش به بخشی از یک سامانه انتقال توان الکتریکی (برق) موجب افزایش ناگهانی ولتاژ می‌شود و می‌تواند به اجزای سامانه و هر چیز دیگری که به آن وصل باشد (برای مثال، وسیله‌های برقی خانگی) آسیب برساند. برای کمینه کردن این آثار، القاگرهای بزرگی را در مسیر سامانه انتقال قرار می‌دهند. این کار باعث می‌شود که یک القاگر با هر تغییر سریع در جریان مخالفت کند و آن را فرو نشاناند!



**ضریب خودالقایی:** آزمایش نشان می‌دهد که نیروی محرکه خودالقایی القاگر، به عواملی که در رابطه زیر آمده است بستگی دارد.

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (۶-۵)$$

در این رابطه  $L$  ضریب خودالقایی یا القایدگی القاگر است و یکای آن به افتخار جوزف هانری، کاشف قانون القای الکترومغناطیسی و هم عصر با فارادی، هانری نامیده و با نماد  $H$  نشان داده می‌شود. ضریب خودالقایی  $L$  از ویژگی‌های ساختمانی القاگر است و به تعداد دور، طول، سطح مقطع و... القاگر بستگی دارد (مثال ۵-۸ را ببینید). رابطه ۶-۵ همچنین روشی به نسبت ساده برای اندازه‌گیری ضریب خودالقایی نامعلوم یک مدار را در اختیار ما می‌گذارد. به این منظور کافی است جریان را در مداری با آهنگ معلوم  $dI/dt$  تغییر دهیم و  $\mathcal{E}_L$  را اندازه بگیریم. نسبت این دو مقدار فیزیکی برابر  $L$  است.

#### مثال ۴-۵

جریان در یک القاگر با آهنگ  $1 \text{ A/s}$  تغییر می‌کند. اگر ضریب خودالقایی القاگر  $1 \text{ H}$  باشد، بزرگی نیروی محرکه خودالقایی در القاگر چقدر است؟

**پاسخ:** از داده‌های مسئله داریم:

$$\frac{dI}{dt} = 1 \frac{\text{A}}{\text{s}}, \quad L = 1 \text{ H}, \quad |\mathcal{E}_L| = ?$$

با قراردادن این مقادیر در رابطه ۶-۵ داریم:

$$|\mathcal{E}_L| = \left| -L \frac{dI}{dt} \right| \\ = |-(1 \text{ H})(1 \text{ A/s})| = 1 \text{ V}$$

به این ترتیب می‌توان گفت: یک هانری ( $1 \text{ H}$ ) ضریب خودالقایی القاگری است که اگر جریان عبوری از آن با آهنگ یک آمپر بر ثانیه ( $1 \text{ A/s}$ ) تغییر کند، نیروی محرکه خودالقایی برابر یک ولت ( $1 \text{ V}$ ) در آن القا می‌شود.

#### مثال ۷-۵

از سیملوله‌ای به ضریب خودالقایی  $0.4 \text{ H}$ ، جریان متغیری می‌گذرد که با زمان به صورت  $I = (4t - 3) \times 10^{-3}$  تغییر می‌کند ( $I$  برحسب آمپر و  $t$  برحسب ثانیه است). بزرگی نیروی محرکه خودالقایی را محاسبه کنید.

**پاسخ:** از داده‌های مسئله داریم:

$$L = 0.4 \text{ H}, \quad I = (4t - 3) \times 10^{-3}, \quad |\mathcal{E}_L| = ?$$

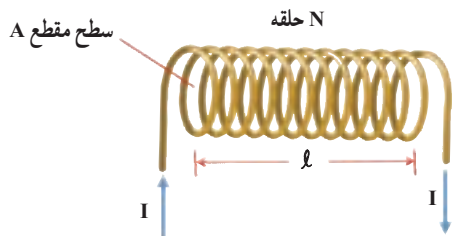
ابتدا آهنگ تغییر جریان نسبت به زمان ( $dI/dt$ ) را به دست می‌آوریم:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} [(4t - 3) \times 10^{-3}] = 4 \times 10^{-3} \text{ A/s} = 4 \text{ mA/s}$$

با استفاده از رابطه ۶-۵ داریم:

$$|\mathcal{E}_L| = \left| -L \frac{dI}{dt} \right| = |-(0.4 \text{ H})(4 \times 10^{-3} \text{ A/s})| \\ = 1/6 \times 10^{-3} \text{ V} = 1/6 \text{ mV}$$

## مثال ۸-۵



شکل روبه‌رو سیملوله‌ای حامل جریان I به طول l و سطح مقطع A را نشان می‌دهد که از N حلقه نزدیک به هم تشکیل شده است. ضریب خودالقایی این سیملوله را پیدا کنید.

**پاسخ:** در فصل ۴ دیدیم که میدان مغناطیسی درون سیملوله حامل جریان I از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

با توجه به اینکه میدان مغناطیسی درون سیملوله یکنواخت و موازی با محور آن است، شار مغناطیسی حاصل از آن، که از سیملوله می‌گذرد برابر است با:

$$\Phi = BA = \mu_0 \frac{NA}{l} I$$

با تغییر جریان، شار مغناطیسی عبوری از سیملوله نیز تغییر می‌کند. در این صورت نیروی محرکه خودالقایی برابر است با:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_L &= -N \frac{d\Phi}{dt} \\ &= -N \frac{d}{dt} \left( \mu_0 \frac{NA}{l} I \right) \end{aligned}$$

$$\mathcal{E}_L = -\mu_0 \frac{N^2 A}{l} \frac{dI}{dt}$$

یا

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

از مقایسه این رابطه با رابطه ۵-۶ داریم:

همان‌طور که انتظار داشتیم این رابطه نشان می‌دهد که القایدگی یا ضریب خودالقایی یک القاگر، تنها تابع ویژگی‌های ساختاری آن است.

**توجه:** در فصل ۴ دیدیم که اگر سیملوله هسته داشته باشد، میدان مغناطیسی حاصل از آن تقویت می‌شود. به همین دلیل وجود هسته درون القاگر نیز سبب تقویت القایدگی آن می‌شود و در نتیجه برای سیملوله دارای هسته داریم:

$$L = K\mu_0 \frac{N^2 A}{l}$$

در این رابطه، K ضریبی بدون یکا است که به جنس هسته داخل سیملوله بستگی دارد و به آن ضریب تراوایی مغناطیسی نسبی هسته می‌گویند.

## مثال ۹-۵

ضریب خودالقایی سیملوله بدون هسته به طول ۵ cm و سطح مقطع ۱ cm<sup>2</sup> متشکل از ۲۰۰۰ حلقه نزدیک به هم را پیدا کنید.

پاسخ: از داده‌های مسئله داریم:

$$\ell = 50 \text{ cm} = 0.5 \text{ m} \text{ و } A = 10 \text{ cm}^2 = 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ و } N = 2000 \text{ دور}$$

$$L = ?$$

با استفاده از نتیجه مثال ۵-۸ و قراردادن مقادیر بالا در آن داریم:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{\ell} = (4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}) \frac{(2000)^2 \times (10^{-3} \text{ m}^2)}{0.5 \text{ m}}$$

$$= 10^{-2} \text{ H} = 10 \text{ mH}$$

### تمرین ۳-۵

دو سیمولوله بدون هسته با سطح مقطع و تعداد دور یکسان را در نظر بگیرید. اگر طول یکی از سیمولوله‌ها دو برابر دیگری باشد، نسبت ضریب خودالقایی آنها را محاسبه کنید.

### القای متقابل: دو پیچه مجاور هم را مطابق شکل ۵-۱۰

در نظر بگیرید. جریان عبوری در پیچه ۱، میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  را به وجود می‌آورد و در نتیجه این میدان یک شار مغناطیسی از پیچه ۲ می‌گذراند. اگر جریان در پیچه ۱ تغییر کند، شار عبوری از پیچه ۲ نیز تغییر می‌کند؛ بنابر قانون فارادی، این تغییر شار نیروی محرکه‌ای در پیچه ۲ القا می‌کند. این فرایند القای متقابل نامیده می‌شود و به کمک آن می‌توان انرژی را از پیچه‌ای به پیچه دیگر منتقل کرد.

اگر در شرایط آرمانی تمام شار مغناطیسی پیچه ۱ از پیچه

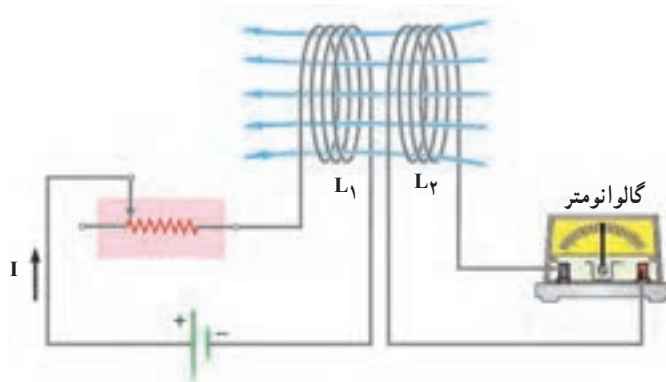
۲ بگذرد، ضریب القای متقابل که آن را با نماد  $M$  نشان می‌دهند،

از رابطه  $M = \sqrt{L_1 L_2}$  به دست می‌آید. از آنجا که تغییرات جریان در یک مدار می‌تواند نیروهای

محرکه ناخواسته‌ای در دیگر مدارهای مجاور القا کند، القای متقابل می‌تواند مزاحمتی در مدارهای الکتریکی باشد. برای هر چه کم کردن این اثرها، سامانه‌های چندمداری باید به گونه‌ای طراحی شوند

تا  $M$  تا حد ممکن کوچک باشد. القای متقابل کاربردهای مفید بسیاری نیز دارد. مثلاً در مبدل‌ها که در پایان همین فصل با آنها آشنا خواهید شد مقدار  $M$  نقش مهمی در مقدار ولتاژ خروجی آنها ایفا

می‌کند.



شکل ۱۰-۱ با تغییر جریان عبوری از القاگر  $L_1$ ، شار مغناطیسی عبوری از القاگر  $L_2$  نیز تغییر می‌کند. این تغییر شار مغناطیسی یک نیروی محرکه القایی در القاگر  $L_2$  تولید می‌کند که می‌توان جریان ناشی از آن را با یک گالوانومتر مشاهده کرد.

## کاربرد القاها در لامپ‌های فلوروسان



چون القاها با تغییرات جریان مخالفت می‌کنند، نقش مهمی در لامپ‌های فلوروسان (موسوم به لامپ‌های مهتابی) دارند (شکل روبه‌رو). در این لامپ‌ها، جریان الکتریکی از گازی که فضای درون لامپ را پر کرده است می‌گذرد، گاز را یونیده می‌کند و باعث درخشش آن می‌شود؛ ولی گاز یونیده یک رسانای کاملاً غیراھمی است. هرچه جریان بیشتر باشد، گاز را بیشتر یونیده می‌کند و مقاومت آن کمتر می‌شود. اگر ولتاژ به حد کافی بالایی به گاز اعمال شود، جریان می‌تواند بسیار زیاد شود و به مدار بیرونی لامپ

فلوروسان آسیب برساند. برای جلوگیری از این مسئله، یک القاگر یا متعادل‌کننده مغناطیسی را به‌طور متوالی با لامپ فلوروسان می‌بندند تا مانع افزایش زیاد جریان شود. متعادل‌کننده همچنین امکان کار لامپ فلوروسان با ولتاژ متناوب را فراهم می‌سازد. این ولتاژ به‌طور سینوسی تغییر می‌کند؛ به‌طوری که با توجه به ویژگی‌های برق تولیدی در ایران، در هر ثانیه ولتاژ یکصد بار به‌طور لحظه‌ای صفر می‌شود. اگر متعادل‌کننده وجود نداشته باشد، با صفرشدن ولتاژ، گاز داخل لامپ به سرعت وایونیده (غیریونیده) و لامپ خاموش می‌شود. متعادل‌کننده، نیروی محرکه خودالقایی جریان را برقرار می‌سازد و لامپ را روشن نگه می‌دارد.

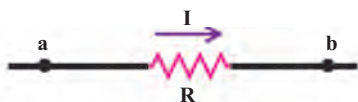
## ۵-۶- انرژی ذخیره‌شده در القاگر

وقتی در دو سر القاگری اختلاف پتانسیل برقرار شود، مولد به القاگر انرژی می‌دهد. بخشی از این انرژی در مقاومت الکتریکی سیم‌های القاگر به‌صورت گرما تلف و بقیه آن در میدان مغناطیسی القاگر ذخیره می‌شود که مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

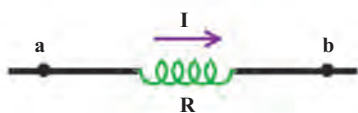
$$U = \frac{1}{2} LI^2 \quad (7-5)$$

لازم است توجه کنید که رفتار مقاومت و القاگر را به لحاظ انرژی اشتباه نگیرید (شکل ۱۱-۵). هنگام عبور جریان از مقاومت، انرژی وارد آن می‌شود، جریان چه پایا باشد و چه تغییر کند، این انرژی در مقاومت به‌صورت گرما تلف می‌شود. برخلاف آن، انرژی تنها وقتی وارد یک القاگر آرمانی با مقاومت صفر می‌شود که جریان در آن/فزیس یابد. این انرژی تلف نمی‌شود، بلکه در القاگر ذخیره شده و هنگام کاهش جریان، آزاد می‌شود. هنگام عبور جریان پایا از یک القاگر، انرژی به آن وارد یا از آن خارج نمی‌شود.

مقاومت با جریان  $I$ : انرژی تلف شده است.



القاگر با جریان  $I$ : انرژی ذخیره شده است.



**شکل ۱۱-۵** مقاومت قطعه‌ای است که در آن انرژی به‌طور غیرقابل برگشت تلف می‌شود. برخلاف آن، انرژی ذخیره شده در القاگر حامل جریان را می‌توان وقتی جریان به صفر کاهش می‌یابد بازیافت کرد.

## مثال ۱-۵

متخصصان صنعت برق، علاقه‌مندند راه‌های مؤثری را برای ذخیره انرژی الکتریکی تولیدی در ساعت‌های کم‌مصرف بیابند تا با استفاده از آن، نیاز مشترکان را در ساعت‌های پر مصرف تأمین کنند. یک ایده این است که: شاید بتوان از یک القاگر بزرگ استفاده کرد. ضریب خودالقایی این القاگر چقدر باشد تا بتواند  $1 \text{ kW.h}$  انرژی الکتریکی را در پیچه حامل جریان  $200 \text{ A}$  ذخیره کند؟

**پاسخ:** مقدار انرژی ذخیره شده مورد نیاز  $U = 1 \text{ kW.h}$  و جریان  $I = 200 \text{ A}$  داده شده است. از معادله  $U = \frac{1}{2} LI^2$  ضریب خودالقایی  $L$  را به دست می‌آوریم:

$$U = 1 \text{ kW.h} = (1 \times 10^3 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2 \Rightarrow L = \frac{2U}{I^2}$$

$$L = \frac{2 \times 3.6 \times 10^6 \text{ J}}{(200 \text{ A})^2} = 18 \text{ H}$$

همان‌طور که نتیجه بالا نشان می‌دهد ضریب خودالقایی لازم، صدها هزار برابر بیشتر از ضریب خودالقایی یک القاگر معمولی است که در آزمایشگاه از آن استفاده می‌کنیم. سیم‌های معمولی که حامل  $200 \text{ A}$  جریان اند، برای اجتناب از اتلاف ناخواسته انرژی ناشی از گرمای  $RI^2t$  باید قطر بزرگی داشته باشند تا مقاومت القاگر پایین بیاید. در نتیجه اندازه یک القاگر  $18 \text{ H}$  که از سیم‌های معمولی ساخته شده باشد، باید خیلی بزرگ (به اندازه یک اتاق بزرگ) باشد. با توجه به فناوری‌های موجود این طرح غیر عملی و توجیه اقتصادی ندارد.

## تمرین ۴-۵

سیملوله بدون هسته به طول  $25 \text{ cm}$  و مساحت سطح مقطع  $5 \text{ cm}^2$ ، شامل  $400$  حلقه حامل جریان  $1/5 \text{ A}$  است. مطلوب است:

- الف) ضریب خودالقایی سیملوله  
ب) انرژی ذخیره شده در القاگر

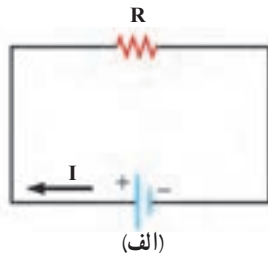
## مطالعه آزاد



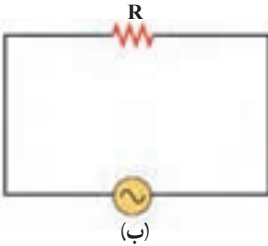
انرژی لازم برای جرقه زدن شمع اتومبیل، از انرژی مغناطیسی ذخیره شده در پیچه احتراق تأمین می‌شود.

انرژی میدان مغناطیسی نقش مؤثری در دستگاه‌های احتراق اتومبیل‌های با موتور بنزینی دارد. پیچه اولیه با حدود  $250$  دور به باتری اتومبیل بسته شده است و میدان مغناطیسی قوی‌ای تولید می‌کند. این پیچه را یک پیچه ثانویه با  $2500$  دور سیم خیلی نازک احاطه کرده است. هنگام جرقه زدن شمع برای انفجار، جریان در پیچه اولیه قطع می‌شود و میدان مغناطیسی به سرعت به صفر فرو می‌آید و نیروی محرکه ده‌ها هزار ولتی در پیچه ثانویه القا می‌کند. در نتیجه انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی به صورت جریان لحظه‌ای بسیار زیاد از پیچه ثانویه به طرف شمع می‌رود و جرقه‌ای تولید می‌کند که سبب احتراق مخلوط سوخت - هوا در سیلندرهای موتور می‌شود (شکل روبه‌رو).

## ۵-۷- جریان متناوب



(الف)



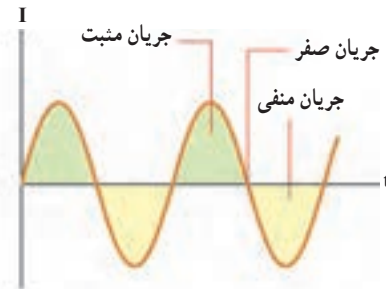
(ب)

شکل ۵-۱۲ (الف) مدار ساده جریان

مستقیم و (ب) مدار ساده جریان متناوب

در سال ۱۸۸۰ میلادی بحث‌های داغی بین دو مخترع دربارهٔ بهترین روش توزیع توان الکتریکی صورت گرفت. توماس ادیسون موافق جریان مستقیم (dc)، یعنی جریانی بود که با زمان تغییر نمی‌کند. جورج وستینگهاوس از **جریان متناوب (ac)** حمایت می‌کرد که در آن ولتاژ و جریان به طور سینوسی تغییر می‌کند. سرانجام، وستینگهاوس پیروز شد و پس از آن بیشتر وسایل خانگی و سامانه‌های توزیع برق با جریان متناوب کار می‌کنند.

شکل ۵-۱۲ دو مدار سادهٔ جریان مستقیم و جریان متناوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید جهت جریان در مدار جریان مستقیم مشخص است در حالی که در مدار جریان متناوب، به دلیل تغییر جهت جریان بر حسب زمان، نمی‌توان جهت مشخص و دائمی را برای جریان در نظر گرفت. تمامی نیروگاه‌های تولید برق در دنیا و از جمله ایران، جریان متناوب تولید می‌کنند که تابعی سینوسی از زمان است و به همین دلیل **جریان متناوب سینوسی** نامیده می‌شود (شکل ۵-۱۳).

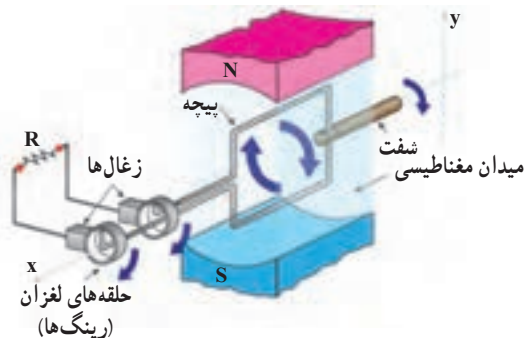


شکل ۵-۱۳ جریان متناوب سینوسی،  
متداول‌ترین شکل جریان متناوب است.

یکی از کاربردهای مهم القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. دیدیم که برای تولید نیروی محرکهٔ القایی باید شار عبوری از مدار تغییر کند، و شار مغناطیسی که از یک پیچه می‌گذرد از رابطهٔ  $\Phi = AB \cos \theta$  محاسبه می‌شود که در آن  $\theta$  زاویهٔ بین نیم خط عمود بر سطح پیچه و میدان مغناطیسی است.

ساده‌ترین راه برای تغییر شار، تغییر زاویهٔ  $\theta$  است. به همین دلیل متداول‌ترین روش تولید جریان القایی، تغییر زاویهٔ  $\theta$  است.

شکل ۵-۱۴ پیچه‌ای را نشان می‌دهد که می‌تواند در میدان مغناطیسی یکنواخت دور محور x بچرخد. محور y را منطبق بر راستای میدان مغناطیسی انتخاب کرده‌ایم.



شکل ۵-۱۴ اجزای یک مولد (ژنراتور) سادهٔ ac. حرکت مکانیکی از طریق میل‌گردان، سبب چرخیدن پیچه در میدان مغناطیسی می‌شود و جریان متناوبی را در مدار به وجود می‌آورد.

اگر زمان یک دور چرخش پیچه T ثانیه باشد، پیچه در مدت t ثانیه، به اندازه  $\frac{t}{T}$  دور خواهد چرخید. هر دور کامل برابر  $2\pi$  رادیان است. در نتیجه اگر پیچه در لحظه  $t=0$  در وضعیت عمود بر میدان مغناطیسی ( $\theta=0$ ) باشد، پس از گذشت t ثانیه زاویه  $\theta$  برابر است با:

$$\theta = 2\pi \frac{t}{T}$$

T یعنی زمان چرخش یک دور کامل را «دوره» یا «زمان تناوب» می‌نامند.  $\frac{2\pi}{T}$  را با  $\omega$  نمایش می‌دهند و به آن **بسامد زاویه‌ای** می‌گویند. در نتیجه داریم:

$$\theta = \omega t$$

به این ترتیب شار مغناطیسی  $\Phi = AB \cos \theta$  که در لحظه t از پیچه عبور می‌کند برابر است با:

$$\Phi = AB \cos \omega t$$

نیروی محرکه القاشده در پیچه با توجه به قانون فارادی از رابطه ۳-۵ محاسبه می‌شود:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NAB \frac{d(\cos \omega t)}{dt}$$

یا:

$$\mathcal{E} = NAB\omega \sin \omega t$$

یعنی نیروی محرکه‌ای که در پیچه القا می‌شود با زمان تغییر می‌کند. بیشترین مقدار این نیروی

محرکه مربوط به زمانی است که برای آن  $\sin \omega t = 1$  باشد و برابر است با  $\mathcal{E}_m = NAB\omega$ ; در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t \quad (۸-۵)$$

این رابطه نشان می‌دهد که نیروی محرکه القاشده به طور دوره‌ای تغییر می‌کند.

اگر مقاومت مدار برابر R باشد، جریان حاصل از این نیروی محرکه از رابطه زیر به دست

می‌آید:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin \omega t$$

این رابطه نشان می‌دهد که جریان نیز با زمان تغییر می‌کند. بیشترین مقدار جریانی که از مدار

می‌گذرد، مربوط به زمانی است که  $\sin \omega t = 1$  باشد، و برابر است با  $I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R}$ . در نتیجه می‌توانیم بنویسیم:

$$I = I_m \sin \omega t \quad (۹-۵)$$

رابطه ۹-۵ نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تولید شده در مدار پیچه به طور سینوسی تغییر

می‌کند. به چنین جریانی، **جریان متناوب** می‌گوییم. نمودار این جریان بر حسب زمان، در یک دوره در

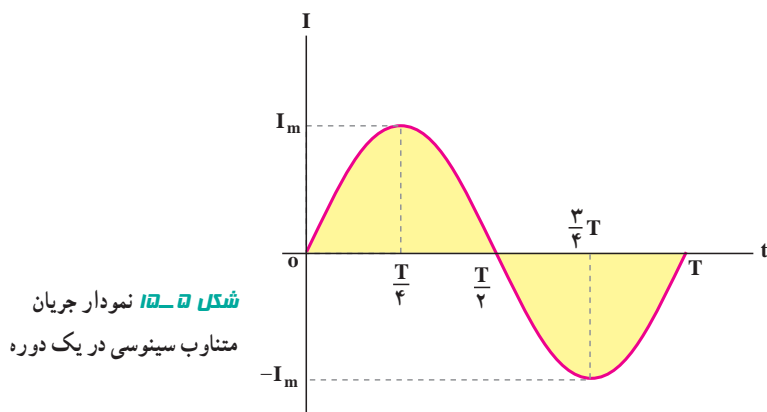
شکل ۱۵-۵ رسم شده است.



هانری (۱۸۷۸-۱۹۹۷)

هانری در آمریکا به دنیا آمد. او در خانواده فقیری می‌زیست و از جوانی مجبور بود کار کند و در نتیجه تحصیلات مرتبی نداشت. او در سیزده سالگی شاگرد ساعت‌سازی شد و شبانه به تحصیل می‌پرداخت. پس از آن با کوشش بسیار توانست در یکی از مدارس روستایی به شغل معلمی بپردازد. سپس به تحصیل طب و مهندسی علاقه‌مند شد و سرانجام به سمت استاد ریاضیات و فیزیک انتخاب گردید. او از سال ۱۸۶۸ تا پایان عمر ریاست آکادمی ملی علوم را عهده‌دار بود. او تجربیات زیادی در مورد الکترومغناطیس داشت و با پیچیدن سیم‌های ظریف عایق‌بندی شده به تعداد زیاد به دور هسته‌های آهنی، آهنرباهای الکتریکی پرقدرتی را ساخت. سپس موفق به کشف پدیده خودالقایی شد. او همچنان یک موتور الکتریکی ساخت که بعداً در تلگراف مورد استفاده زیادی قرار گرفت. یکای القایدهی به احترام او هانری نامیده می‌شود.

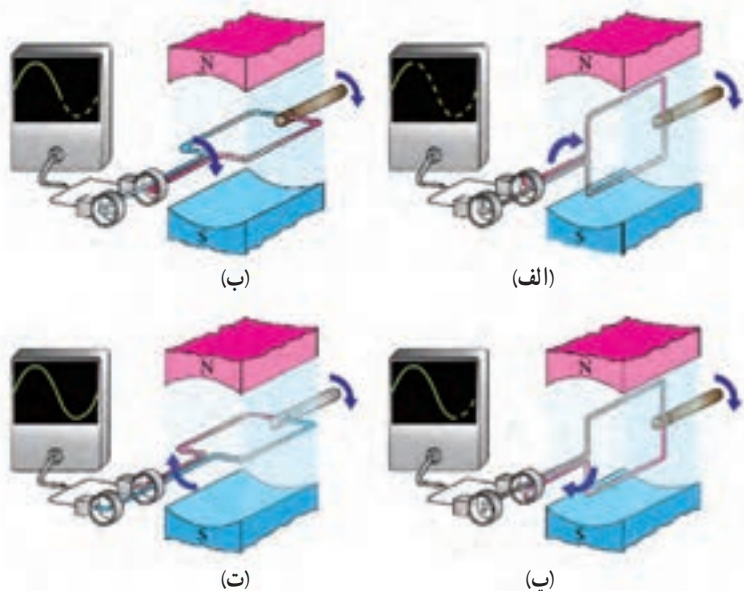




شکل ۱۵-۱ نمودار جریان  
متناوب سینوسی در یک دوره

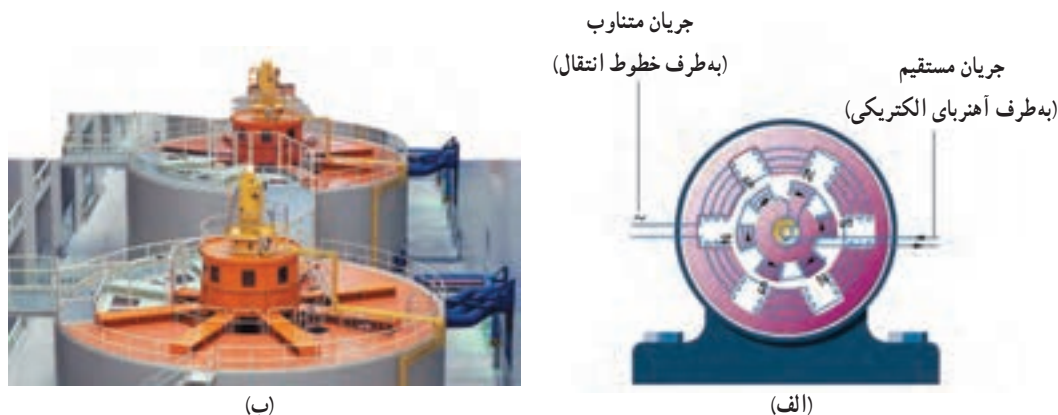
اکنون خواهیم دید که چگونه جریان متناوب سینوسی توسط مولد در یک چرخه کامل تولید می‌شود. این موضوع در شکل ۱۶-۵ در چهار مرحله یا به عبارت دیگر چهار ربع چرخه نشان داده شده است.

در  $t=0$  سطح پیچه بر خطوط میدان مغناطیسی عمود است و جریانی در مدار وجود ندارد. پیچه به اندازه  $\frac{1}{4}$  دور می‌چرخد تا در وضعیت شکل ۱۶-۵ الف قرار بگیرد. در حین این چرخش، شار مغناطیسی عبوری، از پیچه تغییر می‌کند و جریان از صفر به مقدار بیشینه مثبت می‌رسد (اولین ربع چرخه). پیچه به چرخیدن ادامه می‌دهد تا در وضعیت شکل ۱۶-۵ ب قرار بگیرد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه مثبت به صفر می‌رسد (دومین ربع چرخه). پس از آن پیچه از وضعیت شکل ۱۶-۵ ب به وضعیت شکل ۱۶-۵ پ می‌رسد. در حین این چرخش، جریان از صفر به مقدار بیشینه منفی می‌رسد (سومین ربع چرخه). سرانجام پیچه یک دور دیگر می‌چرخد و یک چرخه کامل طی می‌کند و به وضعیت شکل ۱۶-۵ ت می‌رسد. در نتیجه جریان از مقدار بیشینه منفی به صفر می‌رسد. این حرکت به طور متناوب (پی در پی) در پیچه ادامه می‌یابد و جریان متناوب تولید می‌کند.



شکل ۱۶-۵ تولید جریان  
متناوب در یک چرخه کامل

در نیروگاه‌های تولید برق، برای تولید جریان متناوب از مولدهای خاصی استفاده می‌شود که به آنها **مولدهای صنعتی جریان متناوب** می‌گویند. در مولدهای صنعتی پیچ‌ها ساکن‌اند و آهنربای الکتریکی در آنها می‌چرخد (شکل ۵-۱۷). در ایران بسامد برق تولید شده  $50\text{ Hz}$  است که این عدد نشان می‌دهد آهنربای الکتریکی در هر ثانیه،  $50$  مرتبه به‌طور کامل در پیچ‌ها می‌چرخد.



**شکل ۵-۱۷ الف)** در مولدهای صنعتی با چرخیدن آهنربای الکتریکی بین پیچ‌ها، جریان متناوب تولید می‌شود. (ب) نمایی از مولدهای صنعتی تولید برق

### مثال ۵-۱۱



شکل روبه‌رو، نمودار جریان متناوب سینوسی را نشان می‌دهد که یک مولد جریان متناوب تولید کرده است. معادلهٔ جریان برحسب زمان را بنویسید. **پاسخ:** چون ربع چرخه در  $5\text{ ms}$  طی شده است، دورهٔ تناوب برابر  $T = 20\text{ ms}$  است و در نتیجه بسامد زاویه‌ای برابر است با:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi \text{rad}}{20 \times 10^{-3} \text{s}} = 100\pi \text{ rad/s}$$

با توجه به نمودار بیشینهٔ جریان برابر  $I_m = 4\text{ A}$  است. به این ترتیب از رابطهٔ ۵-۹ داریم:

$$I = 4 \sin 100\pi t$$

توجه کنید که رابطهٔ بالا برحسب یکاهای SI نوشته شده است.

### تمرین ۵-۵

معادلهٔ جریان - زمان یک مولد جریان متناوب برحسب یکاهای SI به صورت زیر است:

$$I = 2 \times 10^{-2} \sin 120\pi t$$

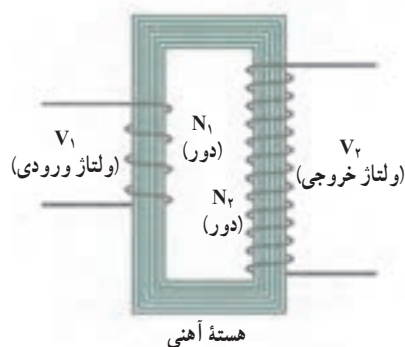
الف) مقدار جریان در لحظهٔ  $t = \frac{1}{30}\text{ s}$  چقدر است؟

ب) نمودار جریان برحسب زمان را در یک چرخهٔ کامل رسم کنید.

**مبدل‌ها:** یکی از امتیازهای مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن است که افزایش و کاهش ولتاژ ac بسیار آسان‌تر از dc است. در انتقال توان در فاصله‌های دور می‌خواهیم تا حد امکان از ولتاژ هرچه بالاتر و جریان هرچه کمتری استفاده کنیم، این کار اتلاف  $RI^2$  را در خط‌های انتقال کم می‌کند و می‌توان از سیم‌های نازک‌تری استفاده و در مصرف مواد اولیه صرفه جویی کرد. خط‌های انتقال توان الکتریکی به‌طور معمول از ولتاژهای در حدود ۴۰۰ کیلوولت استفاده می‌کنند (شکل ۵-۱۸). از طرف دیگر، ملاحظات ایمنی و الزامات عایق‌بندی در ساخت وسایل خانگی و صنعتی، ولتاژهای به نسبت پایین‌تری را ضروری می‌کند. ولتاژ استاندارد برای سیم‌کشی خانگی در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر ۲۲۰ V است. تبدیل ولتاژ مورد نیاز با استفاده از **مبدل‌ها**، که به دو صورت کاهنده و افزایشنده ساخته می‌شوند، صورت می‌گیرد.

**شکل ۵-۱۸** قبل از انتقال توان الکتریکی

از نیروگاه‌ها، مبدل‌های افزایشنده، ولتاژ را تا حدود ۴۰۰ کیلوولت افزایش می‌دهند. در انتهای مسیر، مبدل‌های کاهنده، ولتاژ را کاهش می‌دهند تا با امنیت بیشتر به محل مصرف برسد.



**شکل ۵-۱۹** یک مبدل آرمانی شامل دو پیچه که روی یک هسته آهنی پیچیده شده‌اند.

شکل ۵-۱۹ مبدلی شامل دو پیچه با تعداد دورهای متفاوت را نشان می‌دهد که به دور یک هسته آهنی (فرومغناطیس نرم) پیچیده شده‌اند (پیچه‌ها نسبت به هسته عایق‌بندی شده‌اند). در عمل پیچه اولیه با  $N_1$  دور به یک مولد جریان متناوب بسته شده است که ولتاژ بیشینه آن  $V_1$  است. پیچه ثانویه با  $N_2$  دور به مصرف‌کننده‌ای وصل شده است که ولتاژ بیشینه  $V_2$  را تأمین کند. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچه‌های آن ناچیز است، رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (۵-۱۰)$$

### مثال ۵-۱۲



شکل روبه‌رو یک مبدل ۲۲۰ ولت به ۱۲ ولت را نشان می‌دهد. تعداد دورهای پیچه ثانویه را پیدا کنید.

**پاسخ:** با توجه به داده‌های روی شکل داریم:

$$N_2 = ? \text{ و } V_2 = 12V \text{ و دور } N_1 = 8000 \text{ و } V_1 = 220V$$

با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه ۵-۱۰ داریم:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

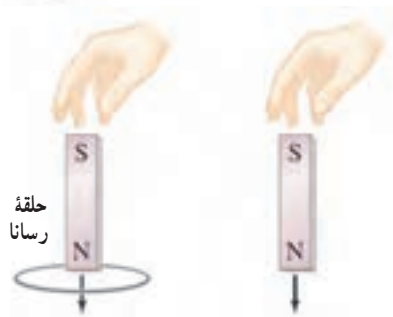
$$\frac{12V}{220V} = \frac{N_2}{8000} \Rightarrow N_2 = 436 \text{ دور}$$

## پرسش‌ها

۱ قطب N یک آهنربا را مطابق شکل روبه‌رو به یک حلقهٔ رسانا نزدیک می‌کنیم. جهت جریان القایی را در حلقه مشخص کنید.



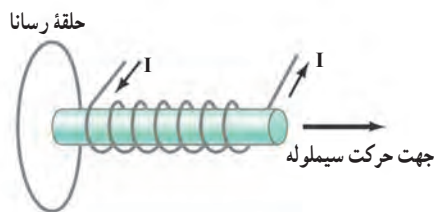
۲ دو آهنربای میله‌ای مشابه را به‌طور قائم از ارتفاع معینی نزدیک سطح زمین رها می‌کنیم (شکل روبه‌رو). اگر سطح زمین در محل برخورد آهنرباها نرم باشد، مقدار فرورفتگی آهنرباها را در زمین با یکدیگر مقایسه کنید. تأثیر میدان مغناطیسی زمین روی آهنرباها را نادیده بگیرید.



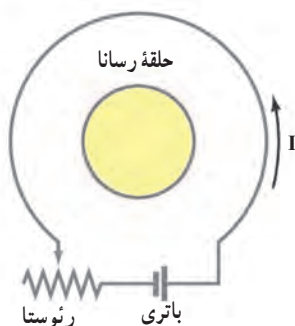
۳ جهت جریان القایی در هریک از حلقه‌های رسانای نشان داده شده در شکل روبه‌رو در چه جهتی است؟



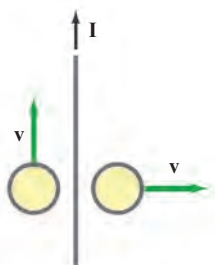
۴ شکل روبه‌رو سیم‌لولهٔ حامل جریانی را نشان می‌دهد که در حال دور شدن از یک حلقهٔ رساناست. جهت جریان القایی را در حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



۵ اگر در مدار شکل روبه‌رو مقاومت رئوستا افزایش یابد، جهت جریان القایی را در حلقهٔ رسانا با ذکر دلیل تعیین کنید.



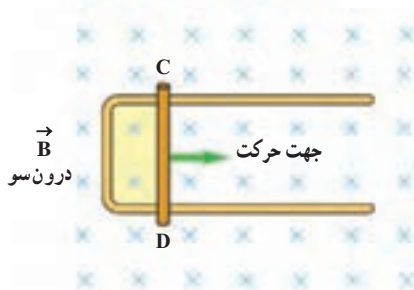
## الفای مغناطیسی



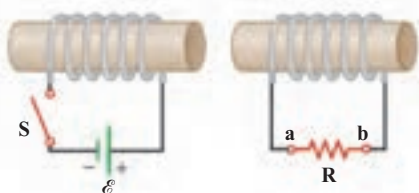
۶ دو حلقهٔ رسانا در مجاورت یک سیم دراز حامل جریان ثابت  $I$  قرار دارند؛ این دو حلقه با سرعت ثابت، ولی جهت‌های متفاوت مطابق شکل روبه‌رو حرکت می‌کنند. جهت جریان القایی را در هر حلقه با ذکر دلیل تعیین کنید.



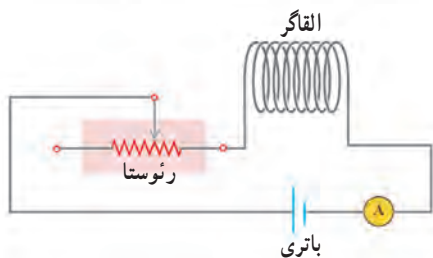
۷ حلقهٔ رسانای مستطیل شکلی را مطابق شکل روبه‌رو به طرف راست می‌کشیم و از میدان مغناطیسی درون سویی خارج می‌کنیم. جهت جریان القایی در حلقه در چه جهتی است؟



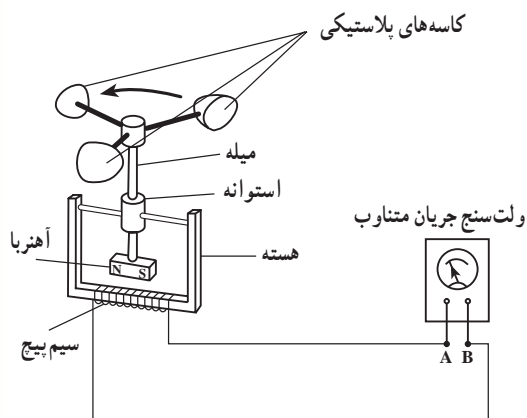
۸ شکل روبه‌رو رسانای U شکلی را درون میدان مغناطیسی یکنواخت  $\vec{B}$  که عمود بر صفحهٔ شکل و روبه داخل صفحه است نشان می‌دهد. وقتی میلهٔ فلزی CD به طرف راست حرکت کند، جهت جریان القایی در مدار در چه جهتی است؟



۹ در مدار نشان داده شده در شکل روبه‌رو، جهت جریان القایی را در مقاومت  $R$  در هریک از دو حالت زیر با ذکر دلیل پیدا کنید:  
الف) در لحظهٔ بستن کلید  $S$   
ب) در لحظهٔ باز کردن کلید  $S$



۱۰ شکل روبه‌رو مداری را نشان می‌دهد که شامل یک الفاگر (سیملوله)، باتری، رئوستا و آمپرسنج است که به‌طور متوالی به یکدیگر بسته شده‌اند. اگر بخواهیم بدون تغییر ولتاژ مولد، انرژی ذخیره شده در الفاگر را زیاد کنیم چه راه‌هایی پیشنهاد می‌کنید؟



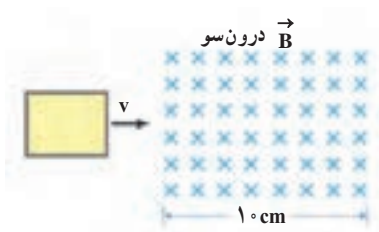
۱۱ شکل روبه‌رو ساختمان یک بادسنج را نشان می‌دهد. اگر این بادسنج را روی بام خانه نصب کنیم، به هنگام وزیدن باد، میلهٔ آن می‌چرخد و ولت‌سنج عددی را نشان می‌دهد.

الف) چرا چرخش میله سبب انحراف عقربهٔ ولت‌سنج می‌شود؟  
ب) آیا با افزایش سرعت باد، عددی که ولت‌سنج نشان می‌دهد تغییر می‌کند؟ چرا؟

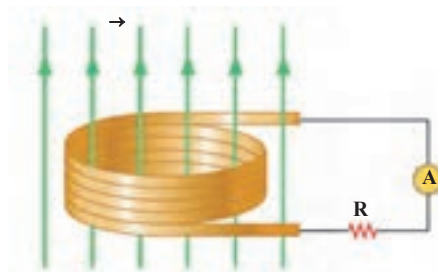
پ) برای بهبود و افزایش دقت کار دستگاه دو پیشنهاد ارائه دهید.



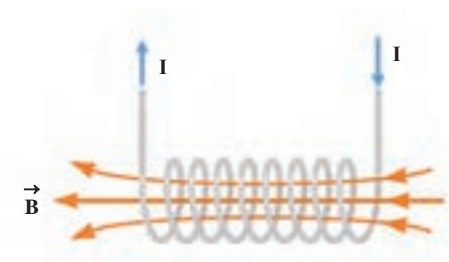
## مسئله‌ها



۱ حلقه فلزی مستطیلی شکلی به ابعاد  $3\text{ cm} \times 4\text{ cm}$  مطابق شکل روبه‌رو با سرعت ثابت  $2\text{ m/s}$  وارد میدان مغناطیسی یکنواخت  $2\text{ T}$  می‌شود و از طرف دیگر آن خارج می‌شود. نمودار شاری که از حلقه می‌گذرد و همچنین نیروی محرکه القاشده در آن را برحسب زمان رسم کنید.



۲ شکل روبه‌رو، بخشی از یک مدار الکتریکی را نشان می‌دهد. در این مدار با افزایش شار مغناطیسی عبوری از القاگر (پیچه) در مدت  $2\text{ ms}$ ، جریانی که آمپرسنج می‌خواند از صفر به  $1\text{ A}$  می‌رسد. اگر ضریب خودالقایی القاگر  $5\text{ H}$  باشد، بزرگی نیروی محرکه خودالقایی متوسط القاگر چند ولت است؟

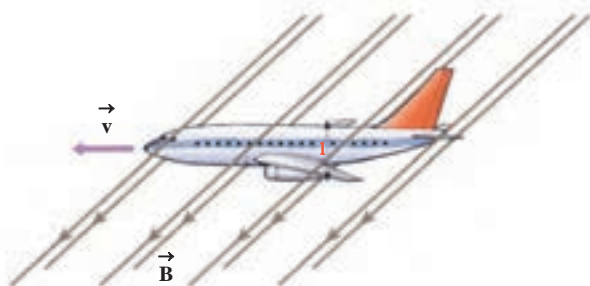


۳ سطح مقطع و طول سیملوله شکل روبه‌رو به ترتیب  $2\text{ cm}^2$  و  $8\text{ cm}$  است. اگر این سیملوله از  $1000$  حلقه نزدیک به هم تشکیل شده باشد، الف) ضریب خودالقایی آن را پیدا کنید.

ب) چه جریانی از سیملوله بگذرد تا در میدان مغناطیسی آن  $4\text{ J}$  انرژی ذخیره شود؟

۴ پیچه‌ای که دارای  $1000$  حلقه است، عمود بر میدان مغناطیسی یکنواختی که اندازه آن  $4\text{ T}$  و جهت آن از راست به چپ است، قرار دارد. میدان مغناطیسی در مدت  $1\text{ s}$  تغییر می‌کند و به  $4\text{ T}$  در خلاف جهت اولیه می‌رسد. اگر سطح هر حلقه پیچه  $5\text{ cm}^2$  باشد، الف) اندازه نیروی محرکه القایی متوسط در پیچه را حساب کنید. ب) شکلی برای پیچه رسم کنید و جهت جریان القایی را روی این شکل تعیین کنید.

۵ پیچه‌ای با سطح مقطع  $3\text{ cm}^2$  و متشکل از  $1000$  حلقه، در ابتدا بر میدان مغناطیسی زمین عمود است. اگر در مدت  $2\text{ s}$  پیچه بچرخد و موازی میدان مغناطیسی زمین قرار بگیرد، نیروی محرکه متوسط القایی در آن چقدر است؟ اندازه میدان زمین را  $5\text{ G}$  در نظر بگیرید.



۶ شکل روبه‌رو هواپیمایی را نشان می‌دهد که در راستای افق درون میدان مغناطیسی زمین در حال حرکت است. نیروی محرکه الکتریکی بین دو طرف انتهایی بال‌های هواپیما را که به فاصله  $l$  از یکدیگر واقع اند پیدا کنید. فرض کنید  $B=5\text{ }\mu\text{T}$ ،  $l=3\text{ m}$ ،  $v=200\text{ m/s}$  و  $\theta=3^\circ$ . (راهنمایی: به مثال ۴-۵ توجه کنید.)

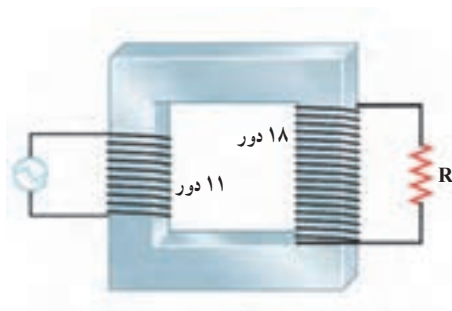
## القای مغناطیسی

۷ اگر شار مغناطیسی عبوری از حلقه‌ای مطابق رابطه زیر (در SI) تغییر کند، بزرگی نیروی محرکه القایی در حلقه در لحظه  $t = 2s$  چقدر است؟

$$\Phi_B = (4t^2 + 3t - 1) \times 10^{-3}$$

۸ جریان متناوبی که بیشینه آن  $2A$  و دوره آن  $2s$  است از یک رسانای  $5$  اهمی می‌گذرد.  
الف) در چه لحظه‌هایی جریان بیشینه است؟ در این لحظه‌ها نیروی محرکه القایی چقدر است؟  
ب) در لحظه  $t = \frac{1}{4}s$ ، جریان چقدر است؟

۹ در مبدل آرمانی شکل زیر، اگر بیشینه ولتاژ دوسر مقاومت  $R$  برابر  $6V$  باشد، بیشینه ولتاژ مولد چقدر است؟





## عملیات چهارگانه با رقم های بامعنا

در محاسبه ها چنانچه تعداد رقم های بامعناى عددی که به کمک آنها یکی از عمل های چهارگانه (جمع، تفریق، ضرب و تقسیم) را انجام می دهیم، برابر نباشند، حاصل عملیات باید به گونه ای بیان شود که دقتی بیشتر از دقت عددهای اندازه گیری شده را بیان نکند. اگر بخواهیم دو مقدار  $58/3 \text{ m}$  و  $13/24 \text{ m}$  را با هم جمع کنیم، باید توجه داشته باشیم که عدد اول با دقت  $1/10$  متر اندازه گیری شده است، یعنی رقم غیرقطعی آن (۳) دارای دقت از مرتبه دهم متر است و عدد دوم با دقت  $1/100$  متر اندازه گیری شده است و رقم غیرقطعی آن (۴) دارای دقت از مرتبه صدم متر است. اگر حاصل جمع این دو مقدار را برابر  $71/54 \text{ m}$  بیان کنیم، دقت یکصدم متر را برای عدد اول هم به کار برده ایم، در حالی که در اندازه گیری اول، دقت ما تا دهم متر بوده است. حاصل جمع این دو عدد را باید برابر  $71/5 \text{ m}$  بیان کنیم، یعنی عدد ۵ را بزرگ ترین مرتبه عدم قطعیت دار نگه داشته ایم و از رقم ۴ صرف نظر کرده ایم. برای اجتناب از هرگونه اشتباه در بیان نتیجه محاسبه های عددی بامعنا، تعداد رقم های بامعناى حاصل عملیات را به کمک قاعده های کلی زیر تعیین می کنیم:

۱- تعداد رقم های بامعنا که از ضرب یا تقسیم چند عدد به دست می آید باید برابر باشد با تعداد رقم های بامعناى عددی که کمترین تعداد رقم های بامعنا را دارد.

۲- هنگام جمع (یا تفریق)، مرتبه آخرین رقم سمت راست حاصل جمع (یا حاصل تفریق) برابر با مرتبه آخرین رقم سمت راست بامعناى عددی است که مرتبه غیرقطعی آن بیشتر است، یعنی دقت اندازه گیری آن کمتر بوده است. به بیان دیگر در هنگام جمع (یا تفریق) عددها که با یک یا یکا بیان شده اند، تعداد رقم های پشت ممیز عدد حاصل، باید برابر تعداد رقم های پشت ممیز عددی باشد که کمترین رقم بعد از ممیز دارد.

### مثال

شعاع یک کره  $12/5 \text{ cm}$  برآورد شده است. حجم این کره را محاسبه کنید.

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$V = \frac{4}{3} (\pi/14) (12/5 \text{ cm})^3$$

$$V = 8177/083333 \text{ cm}^3$$

با توجه به اینکه شعاع کره با سه رقم بامعنا بیان شده است، حجم کره برابر  $8177 \times 10^3 \text{ cm}^3$  خواهد بود.

پاسخ:

## مثال

جمع زیر را انجام دهید.

$$4/326\text{kg} + 25/13\text{kg}$$

**پاسخ:** مقدار عدد اول با دقت هزارم کیلوگرم و مقدار دومی تا صدم کیلوگرم دقت دارد. در نتیجه، مرتبه رقم غیرقطعی در عدد دوم بیشتر است و رقم غیرقطعی حاصل جمع باید با دقت صدم بیان شود. در نتیجه خواهیم داشت:

$$4/326\text{kg} + 25/13\text{kg} = 29/45\text{kg}$$

در هنگام جمع و یا تفریق دو عدد که یکای آنها یکسان نیست، باید بدون آنکه در تعداد رقم‌های بامعناى آنها تغییری ایجاد شود، ابتدا همه را برحسب یکای مشترکی بنویسیم. آنگاه با توجه به قاعده کلی که بیان شد، محاسبه موردنظر را انجام دهیم.

## مثال

یک سنگ  $2/5$  کیلوگرمی را درون یک جعبه  $264$  گرمی قرار می‌دهیم. جرم کل چند گرم می‌شود؟  
**پاسخ:** ابتدا هر دو عدد را برحسب یکای گرم و به صورت توان یکسان ده می‌نویسیم.

$$m_1 = 2/5\text{kg} = 2/5 \times 10^2\text{g}$$

$$m_2 = 264\text{g} = 264 \times 10^0\text{g}$$

$$m = m_1 + m_2$$

$$m = 2/5 \times 10^2\text{g} + 264 \times 10^0\text{g} = 2/8 \times 10^2\text{g}$$

در نوشتن حاصل جمع، ضمن به کارگیری قاعده بیان شده، از روش گرد کردن نیز استفاده کرده‌ایم و حاصل جمع را به جای  $2/764 \times 10^2$  به صورت  $2/8 \times 10^2$  نوشته‌ایم.

برخی از رابطه‌ها ضریب‌های ثابتی دارند که از محاسبه به دست نیامده‌اند. مانند عدد ۲ در رابطه زیر

(عرض مستطیل + طول مستطیل)  $\times 2$  = (محیط مستطیل)

$$\text{حجم کره} = \frac{4}{3} \pi R^3$$

یا عددهای ۳ و ۴ در رابطه

این گونه ضریب‌ها که رقم غیرقطعی ندارند، به هنگام تعیین تعداد رقم‌های بامعناى حاصل یک محاسبه در نظر گرفته

نمی‌شوند.

## واژه‌نامه فارسی - انگلیسی

Electric resistance	مقاومت الکتریکی	Adiabatic Process	فرایندی دررو
Electro Motive Force (E.M.F.)	نیروی محرکه الکتریکی	Alternating Current	جریان متناوب
Electromagnetic induction	القای الکترومغناطیسی	Angular frequency	بسامد زاویه‌ای
Electric current	جریان الکتریکی	Attraction	ربایش
Equation of state	معادلهٔ حالت	Bar magnet	آهنربای میله‌ای
Equilibrium	تعادل	Boiler	دیگ بخار
Equivalent resistance	مقاومت معادل	Capacitance	ظرفیت
Exhaust (step)	(مرحلهٔ) تخلیه	Condenser	چگالنده
Expansion	انبساط	Coefficient of performance	ضریب عملکرد
Explosion (step)	(مرحلهٔ) آتش گرفتن	Coefficient of resistivity	ضریب دمایی مقاومت ویژه
External combustion engine	ماشین برون سوز	Coil	پیچ
Faraday's law of electromagnetic induction	قانون القای الکترومغناطیسی فاراده	Cold reservoir	منبع سرد
Ferromagnetism	فرومغناطیس	Compression (step)	(مرحلهٔ) تراکم
First law of thermodynamics	قانون اول ترمودینامیک	Capacitor	خازن
Gas constant	ثابت گازها	Conservation of charge	پایستگی بار
Heat engine	ماشین گرمایی	Cosmic ray	پرتو کیهانی
Heat	گرما	Coulomb's Law	قانون کولن
Horseshoe magnet	آهنربای نعلی شکل	Cycle	چرخه
Hot reservoir	منبع گرم	Declination angle	زاویهٔ میل
Ideal gas	گاز کامل	Dielectric constant	ثابت دی الکتریک
Inclination angle	زاویهٔ شیب	Efficiency	بازده
Induced current	جریان القایی	Electric breakdown	فروریزش الکتریکی
Inductance	ضریب خودالقایی (القایدگی)	Environment	محیط
Inductor	القارگر	Electric dipole	دوقطبی الکتریکی
Insulator	عایق	Electric field lines	خط‌های میدان الکتریکی
Intake (step)	(مرحلهٔ) مکش	Electric field	میدان الکتریکی
Internal combustion engine	ماشین درون سوز	Electric force	نیروی الکتریکی
Internal energy	انرژی درونی	Electric motor	موتور الکتریکی
		Electric potential energy	انرژی پتانسیل الکتریکی

Potential difference	اختلاف پتانسیل	Internal resistance	مقاومت درونی
Power (step)	(مرحله) انجام کار	Iron core	هسته آهنی
Pressure	فشار	Isobaric process	فرایند هم فشار
Refrigerator	یخچال	Isochoric process	فرایند هم حجم
Relative magnetic permeability	تراوایی نسبی مغناطیسی	Isothermal process	فرایند هم دما
Repulsion	رانش	Kirochhoff's laws	قانون های کیرشهف
Resistivity	مقاومت ویژه	Lenz's law	قانون لنز
Resistor	مقاومت	Loop	حلقه
Rheostat	رئوستا	Macroscopic quantities	کمیت های ماکروسکوپی
Right hand rule	قاعده دست راست	Magnetic axis	محور مغناطیسی
Second law of thermodynamics	قانون دوم ترمودینامیک	Magnetic declination	میل مغناطیسی
Self – induction	خودالقایی	Magnetic dipole	دوقطبی مغناطیسی
Series circuits	مدارهای متوالی	Magnetic domain	حوزه مغناطیسی
Solenoid	سیملوله	Magnetic energy	انرژی مغناطیسی
South pole	قطب جنوب	Magnetic field lines	خط های میدان مغناطیسی
Steam engine	ماشین بخار	Magnetic field	میدان مغناطیسی
Surface charge density	چگالی سطحی بار	Magnetic flux	شار مغناطیسی
System	دستگاه	Magnetic induction	القای مغناطیسی
Temperature	دما	Magnetic permeability	تراوایی مغناطیسی
Temporary magnet	آهنربای موقت	Mechanism	سازوکار
Thermal equilibrium	تعادل گرمایی	Microscopic quantities	کمیت های میکروسکوپی
Thermodynamic process	فرایند ترمودینامیکی	Molar heat capacity	ظرفیت گرمایی مولی
Thermodynamic variabls	متغیرهای ترمودینامیکی	Net charge	بار خالص
Thermodynamics	ترمودینامیک	Node	گره
to charge	پر کردن – شارژ (خازن)	North pole	قطب شمال
to discharge	خالی کردن (خازن)	Parallel circuits	مدارهای موازی
Valve	دریچه (سوپاپ)	plate capacitor parallel	خازن تخت (خازن با صفحه های موازی)
Variable resistor	مقاومت متغیر	Paramagnetism	پارامغناطیس
Voltage drop	افت پتانسیل	Permanent magnet	آهنربای دائمی
Volume	حجم	Permittivity	ضریب گذردهی
		Polarized	قطبیده

## فهرست منابع

### منابع فارسی

- ۱- مبانی فیزیک (جلدهای اول و دوم)، ویرایش دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و برل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش نظر.
- ۲- فیزیک دانشگاهی (جلدهای اول و دوم)، ویرایش دوازدهم و سیزدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح الله خلیلی بروجنی، محمد تقی فلاحی مروستی، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۳- درک فیزیک با رویکرد تصویری، بریان آرنولد، ترجمه روح الله خلیلی بروجنی و مریم عباسیان. چاپ سوم ۱۳۹۲، انتشارات مدرسه.
- ۴- حرارت و ترمودینامیک، مارک زیمانسکی و ریچارد دیتمن، ترجمه حسین توتونچی، حسن شریفیان عطار و محمد هادی هادی زاده، چاپ اول ۱۳۶۴، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۵- دوره درسی فیزیک (جلد اول) گ.س. لندسبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.
- ۶- اصول فیزیک (جلد اول)، هانس سی. اوهانیان، ترجمه یوسف امیر ارجمند و نادر رابط، چاپ اول ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۷- فیزیک مفهومی، ویرایش دهم، پل جی. هیوئیت، ترجمه منیژه رهبر، چاپ اول ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.
- ۸- فیزیک، مارچلو آلونسو و ادوارد جی. فین، ترجمه لطیف کاشیگر، چاپ اول ۱۳۶۷، مرکز نشر دانشگاهی.
- ۹- دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ترجمه محمد ابراهیم ابوکاظمی و دیگران، چاپ اول ۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
- ۱۰- نمایش هیجان انگیز فیزیک، ویرایش دوم، برل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱.

## منابع انگلیسی

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, McGraw – Hill.
2. Holt Physics, Serway and Faughn, 1999, Holt Rinehart and Winston.
3. Physics, Giambattista and Richardson, Second Edition, 2008, McGraw– Hill.
4. University Physics, Wolfgang Bauer and Gray D. Westfall, 2011, McGraw – Hill.
5. Physics, Eugene Hecht, Second Edition, 1997, Brooks / Cole Publishing Company.
6. University Physics, Hugh D. Young, 1992, Addison – Wesley.
7. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th Edition, 2014, Prentice – Hall International.
8. Principles of Physics, Frank J. Blatt, 1989, Allyn and Bacon.
9. Introduction to physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 9th Edition, 2013, John Wiley & Sons.
10. Contemporay College, Edwin Jones and Richard Childers, 2001, McGraw–Hill.
11. Glencoe physics, Paul W. Zizewitz, 2000, McGraw– Hill.



کتاب فیزیک ۲ و آزمایشگاه	
سال انتشار	ناشر
۹۰	مبتکران/ پیشروان
۹۲	طلایی
کتاب فیزیک ۳ و آزمایشگاه	
سال انتشار	ناشر
۹۱	فاطمی
کتاب فیزیک پیش دانشگاهی، رشته علوم تجربی	
سال انتشار	ناشر
۹۰	مبتکران/ پیشروان
۹۰	اندیشه‌سرا
ویرایش دهم ۹۳	نیاز دانش
۹۳	دانش‌نگار
کتاب فیزیک پیش دانشگاهی، رشته علوم ریاضی	
سال انتشار	ناشر
۹۰	مبتکران/ پیشروان
۹۰	اندیشه‌سرا
ویرایش دهم ۹۳	نیاز دانش
۹۳	دانش‌نگار
عنوان	
ردیف	ردیف
۱	۱
۲	۲
۳	۳
۴	۴
عنوان	
ردیف	ردیف
۱	۱
۲	۲
۳	۳
۴	۴



صفحه ۴ ← مثال ۱-۱ خط اول: «ابعاد» با «حجم» جایگزین شود.

تعیین کنید که در شرایط متعارفی (فشار یک اتمسفر و دمای صفر درجه سلسیوس) در اتاقی به حجم  $36/0 \text{ m}^3$  چند مول هوا وجود دارد؟

صفحه ۱۷ ← مثال ۱-۱۳ خط سیزدهم تمرین «۱-۴» با «۱-۳» جایگزین شود.

ب) در شکل زیر دو منحنی هم‌دما با دماهای  $T_i$  و  $T_f$  رسم شده‌اند. از تمرین ۱-۳ می‌دانیم  $T_f < T_i$  است.

صفحه ۲۲ ← خط هفدهم: «نسبت تراکم» با «ضریب یا نسبت تراکم» جایگزین شود.

فضا  $rV$  است  $r$  را **ضریب یا نسبت تراکم** می‌گویند. وقتی پیستون به پایین‌ترین وضعیت خود رسید، سوپاپ

صفحه ۴۸ ← خط هفتم « $\vec{E}_A$ » با « $\vec{E}_B$ » جایگزین شود. 
$$\vec{E}_B = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = -E_1 \vec{i} + E_2 \vec{i}$$

صفحه ۸۵ ← بعد از پاراگراف اول، جمله زیر اضافه شود:

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

صفحه ۹۴: دو خط پس از رابطه (۳-۵)؛ عبارت «داخلی» حذف شود.

هستند. یعنی درون آنها مقاومتی در برابر حرکت بارها وجود دارد. بنابراین، وقتی جریان از این

صفحه ۱۰۲، شکل ۳-۲۴: جهت جریان‌های  $I_1$  و  $I_2$  وارونه شود.

صفحه ۱۱۹: قبل از پرسش ۳-۴؛ عبارت زیر اضافه شود:

«هرگاه در ناحیه‌ای از فضا جهت و بزرگی میدان مغناطیسی تغییر نکند، میدان مغناطیسی در این ناحیه یکنواخت است»

صفحه ۱۲۲: در توضیح شکل ۴-۱۲، عبارت «یکنواخت» به «میدان مغناطیسی» اضافه شود و در اولین خط پس از رابطه

(۴-۱) عبارت «زاویه حاده‌ای» با عبارت «زاویه‌ای» جایگزین گردد.

زاویه‌ای را که جهت جریان با جهت بردار میدان مغناطیسی  $\vec{B}$  می‌سازد را با  $\alpha$  نشان داده‌ایم (شکل ۴-۱۲).

صفحه ۱۳۶: در توضیح شکل ۴-۲۴؛ دومین جمله (سطرهای دوم و سوم) **شکل ۴-۲۴** چرخش الکترون به دور هسته و به دور

خودش، منشأ خاصیت مغناطیسی اتم است.

حذف شود.

صفحه ۱۵۰ و ۱۵۱، مثال‌های ۴-۵ و ۵-۵: کلیه «d»ها با « $\Delta$ » جایگزین شود (مثلاً  $\Delta t \rightarrow dt$ )

صفحه ۱۵۵: آزمایش ۲-۵؛ شکل روبه‌رو اضافه شود.

صفحه ۱۵۷: خط‌های آخر مثال ۵-۸: عبارت «تراوایی مغناطیسی

نسبی هسته» به «ضریب تراوایی مغناطیسی نسبی هسته» تبدیل شود.

در این رابطه،  $K$  ضریبی بدون یکا است که به جنس هسته داخل سیملوله بستگی دارد و به آن

**ضریب تراوایی مغناطیسی نسبی هسته** می‌گویند.

صفحه ۱۵۸: در شکل ۵-۱؛ جهت خط‌های میدان برعکس شود.

صفحه ۱۶۸: مسئله ۲، سطر سوم: عبارت «توسط» تبدیل به «متوسط» شود.

