درس اوّل: مفاهیم اوّلیهٔ ترمودینامیک

واژهٔ ترمودینامیک از دو بخش «ترمو» به معنی گرما و «دینامیک» به معنی حرکت تشکیل شده است. این علم که مطالعهٔ آن از قرن نوزدهم میلادی آغاز شده، به بررسی رابطهٔ گرما، کار و تبدیل گرما به کار مکانیکی می‌پردازد. تحلیل ماشین‌های گرمایی که گرما را به کار تبدیل می‌کنند، توسط علم ترمودینامیک انجام می‌شود.

دستگاه و محیط

در ترمودینامیک تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً به شکل گاز یا مایع است و با محیط اطراف، خود، گرما و کار مبادله می‌کند. این جسم را دستگاه و اجسام پیرامون دستگاه را که می‌توانند با آن تبادل انرژی داشته باشند، محیط می‌نامیم.

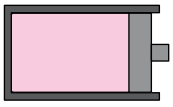
آب داخل کتری، دستگاه است.

در موتور ماشین‌های بنزینی، مخلوط هوا و بخار بنزین داخل سیلندر، دستگاه است.

متغیرهای ترمودینامیکی و معادلهٔ حالت

رفتار دستگاه را می‌توان برحسب کمیت‌هایی مانند فشار، دما و حجم آن توضیح داد. این کمیت‌ها به وضعیت ماده در مقیاس بزرگ بستگی دارند و به جزئیات رفتار تک‌تک مولکول‌ها وابسته نیستند. کمیت‌هایی که وضعیت ماده را در مقیاس بزرگ توصیف می‌کنند، کمیت‌های ماکروسکوپی نامیده می‌شوند. علم ترمودینامیک رفتار دستگاه را برحسب این کمیت‌ها توصیف می‌کند.

مقداری گاز، در محفظه‌ای که با یک پیستون بدون اصطکاک مسدود شده است در نظر بگیرید:



هنگامی که دما و فشار در تمام قسمت‌های این گاز یکسان باشد، می‌گوییم گاز در حالت تعادل ترمودینامیکی است.

در این حالت می‌توان برای گاز یک فشار (P) ، یک حجم (V) و یک دما (T) تعیین کرد. کمیت‌های ماکروسکوپی که حالت دستگاه را توصیف می‌کنند، متغیرهای ترمودینامیکی نام دارند.

متغیرهای ترمودینامیکی از یک‌دیگر مستقل نیستند. رابطهٔ بین متغیرهای ترمودینامیکی، معادله حالت نامیده می‌شود.

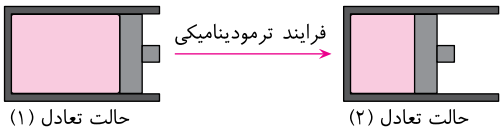
اگر دستگاه، گاز آرمانی باشد، رابطهٔ بین متغیرهای ترمودینامیکی همان‌طور که در فصل چهارم دیدیم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\underset{\text{فشار (Pa)}}{P}\ \underset{\text{حجم }(m^3)}{V} = \underset{\text{مقدار ماده (mol)}}{n}\ R\ \underset{\text{دما (K)}}{T}$$

$$R = 8/314\left(\frac{J}{mol.K}\right) \quad \text{ثابت جهانی گازها}$$

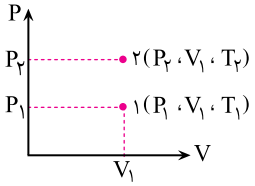
فرایند ترمودینامیکی ایستاوار

وقتی دستگاه ترمودینامیکی از یک حالت تعادل به حالت تعادل دیگر برود، می‌گوییم فرایند ترمودینامیکی انجام شده است. در علم ترمودینامیک تنها فرایندهایی بررسی می‌شوند که دستگاه در حین انجام آن‌ها در حالت تعادل باشند.

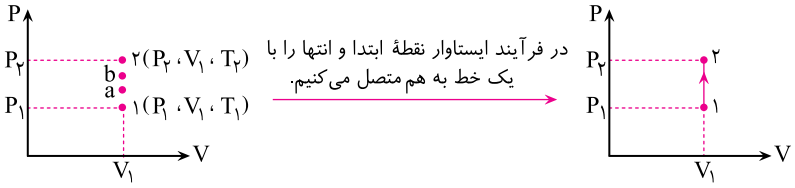


برای مثال اگر به مقداری گاز در حجم ثابت گرما بدهیم که از حالت تعادل «۱» (P_1 , V_1 , T_1) به حالت تعادل «۲» (P_2 , V_2 , T_2) برود و دستگاه در طی این مسیر در حالت تعادل نباشد، نمودار $P-V$ آن به صورت زیر است.

مسیر بین حالت‌های «۱» و «۲» رسم نشده است چون گاز در این مسیر در حال تعادل ترمودینامیکی نبوده است.



اگر بخواهیم در حین انجام فرایند، گاز در حال تعادل باشد، باید گرم کردن را به قدری آهسته انجام دهیم که گاز در هر لحظه فرصت رسیدن به حالت تعادل را داشته باشد. به این صورت که ابتدا گاز را کمی گرم کنیم. به دلیل کم بودن گرمای منتقل شده، دما و فشار تغییر بسیار کمی خواهند داشت و در نتیجه گاز به سرعت در حالت تعادل تازه‌ای قرار می‌گیرد؛ حالت a. اگر گرمادهی تدریجی را به همین صورت ادامه دهیم به حالت‌های تعادلی بعدی (b، c و ...) می‌رسیم، تا این‌که به وضعیت تعادلی «۲» دست پیدا کنیم.



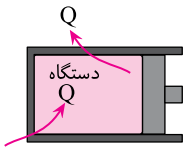
فرایندی که در طی آن، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می‌ماند، فرایند ایستاوار می‌نامیم.

توجه: معمولاً تعادل ترمودینامیکی برای یک دستگاه با قرار دادن آن در یک وضعیت مشخص برای مدت طولانی حاصل می‌شود. یکی از نشانه‌های حالت تعادل در دستگاه این است که متغیرهای ترمودینامیکی آن به طور خود به خود تغییر نکنند.

تبادل انرژی

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

گرما (Q): گرما هنگامی بین دستگاه و محیط مبادله می‌شود که این دو، با هم اختلاف دما داشته باشند. علامت Q طبق قرارداد زیر تعیین می‌شود:



اگر محیط به دستگاه گرما بدهد: $Q > 0$

اگر دستگاه به محیط گرما بدهد: $Q < 0$

معمولاً وقتی که دستگاه با محیط تبادل گرما می‌کند، فرض می‌شود که دستگاه با یک منبع گرما (چشمهٔ گرمایی) در تماس است.

منبع گرمایی: منبع گرمایی جسمی است که به دلیل جرم زیادش اگر گرما بگیرد یا از دست بدهد، دمای آن تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. برای مثال هوای یک اتاق را می‌توانیم برای یک استکان چای داغ به عنوان منبع گرما در نظر بگیریم. اگرچه دمای چای داغ تغییر زیادی می‌کند ولی دمای هوای اتاق تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت.

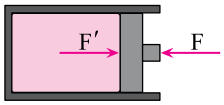
مثال:

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

پاسخ: دمای مخلوط آب و یخ تا زمانی که یخ به طور کامل ذوب نشود یا آب به طور کامل منجمد نگردد، صفر درجهٔ سلسیوس باقی می‌ماند. بنابراین حتی در صورت مبادلهٔ گرما، دمایش تغییر نمی‌کند. در نتیجه می‌توان از این مخلوط به عنوان یک منبع گرما استفاده کرد.

کار (W): در یک فرایند ترمودینامیکی ممکن است حجم دستگاه تغییر کند و انرژی از طریق انجام کار بین دستگاه و محیط مبادله شود.

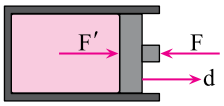
مقداری گاز درون استوانه‌ای دارای پیستونی با اصطکاک ناچیز در نظر بگیرید.



F : نیرویی است که از طرف محیط به دستگاه وارد می شود.

F' : نیرویی است که از طرف دستگاه به محیط وارد می شود.

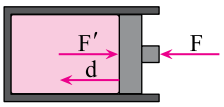
نیروهای F و F'، کنش و واکنش هستند و بنابر قانون سوم نیوتون، اندازهٔ آن‌ها یکسان و جهتشان مخالف یک‌دیگر است. اگر در یک فرایند، گاز منبسط شود و پیستون به سمت راست حرکت کند، کار نیروهای F و F' به صورت زیر محاسبه می شود:



$W = (F\cos\theta)d \xrightarrow{\theta=180^\circ} W = -Fd$ (کار محیط بر روی دستگاه)

$W' = (F'\cos\theta')d \xrightarrow{\theta'=0^\circ} W' = Fd$ (کار دستگاه بر روی محیط)

و اگر در یک فرایند گاز متراکم شود و پیستون به سمت چپ حرکت کند، کار نیروهای F و F' به صورت زیر محاسبه می‌شود:



$W = (F\cos\theta)d \xrightarrow{\theta=0^\circ} W = Fd$ (کار محیط بر روی دستگاه)

$W' = (F'\cos\theta')d \xrightarrow{\theta'=180^\circ} W' = -Fd$ (کار دستگاه بر روی محیط)

نکته ۱: کار محیط بر روی دستگاه (W) همیشه برابر است با منفی کار دستگاه بر روی محیط (W') یعنی: $W = -W'$

نکته ۲:
اگر دستگاه منبسط شود : $W < 0$, $W' > 0$
اگر دستگاه متراکم شود : $W > 0$, $W' < 0$

مثال:

در یک فرایند، دستگاه $500\,J$ کار بر روی محیط انجام و $400\,J$ گرما از دست می‌دهد. W ، W' و Q را در این فرایند مشخص کنید و بگویید که دستگاه متراکم می‌شود یا منبسط؟

پاسخ:

کار دستگاه بر روی محیط : $W' = 500\,J$

کار محیط بر روی دستگاه : $W = -W' = -500\,J$

گرمای مبادله شده : $Q = -400\,J$

با توجه به این‌که $W < 0$ است، دستگاه منبسط می‌شود.

تمرین‌های امتحانی

۱. به کمک جعبهٔ کلمات، عبارت‌های زیر را کامل کنید.

منبع گرمایی - محیط - دستگاه ترمودینامیکی - تعادل ترمودینامیکی - معادلهٔ حالت- فرایند ترمودینامیکی
متغیرهای ترمودینامیکی - ماشین گرمایی

الف. ..... وسیله‌ای است که گرما را به کار تبدیل می‌کند.

ب. در ترمودینامیک بخشی از ماده که مبادلهٔ انرژی بین آن و محیط پیرامون بررسی می‌شود، ..... نام دارد.

پ. اگر حجم مقدار معینی گاز برای مدت طولانی ثابت بماند، گاز به ..... خواهد رسید.

ت. کمیت‌های V ، P و T که برای توصیف حالت تعادل ترمودینامیکی دستگاه به کار می‌روند، ..... نامیده می‌شوند.

ث. رابطهٔ بین متغیرهای ترمودینامیکی را ..... می‌نامند.

ج. تغییر حالت دستگاه از یک وضعیت تعادلی به وضعیت تعادلی دیگر را ..... می‌گوییم.

چ. ..... جسمی است که جرم آن چنان بزرگ است که می‌تواند مقدار زیادی گرما بگیرد یا بدهد بدون آن‌که تغییر دمای محسوسی داشته باشد.

۲. درستی یا نادرستی عبارت‌های زیر را تعیین کنید و صورت درست عبارت‌های نادرست را بنویسید.

الف. کمیت‌هایی که با آن‌ها حالت ترمودینامیکی دستگاه را توصیف می‌کنیم، میکروسکوپی هستند. ☐ درست ☐ نادرست

ب. در حالت‌های غیرتعادلی دستگاه ترمودینامیکی، می‌توانیم مقادیر مشخص و یگانه‌ای را به متغیرهای ترمودینامیکی نسبت دهیم. ☐ درست ☐ نادرست

پ. اگر در طول یک فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حال تعادل بماند، چنین فرایندی را ایستاوار می‌نامیم. ☐ درست ☐ نادرست

ت. تبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق انجام کار و مبادلهٔ گرما صورت می‌پذیرد. ☐ درست ☐ نادرست

ث. حتی هنگامی که محیط و دستگاه اختلاف دما ندارند، باز هم مبادلهٔ گرما بین آن‌ها انجام می‌شود. ☐ درست ☐ نادرست

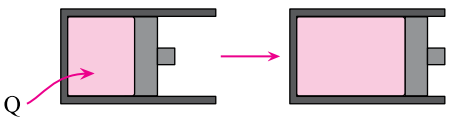
ج. استکان چای داغ برای هوای اتاقی که در آن قرار گرفته است، منبع گرمایی محسوب می‌شود. ☐ درست ☐ نادرست

۳. مقدار $20\,mol$ گاز هلیوم درون مخزنی با فشار $40\,atm$ و دمای $300\,K$ وجود دارد.

الف. حجم مخزن چند لیتر است؟ $(R = 8\frac{J}{mol.K})$

ب. اگر گاز درون مخزن را به مایع تبدیل کنیم، حجم هلیوم مایع چند مترمکعب خواهد بود؟ ($M_{\text{هلیوم}} = 4\frac{g}{mol}$ و $\rho_{\text{هلیوم مایع}} = 125\frac{kg}{m^3}$ است.)

۴. با توجه به شکل، جاهای خالی جملات زیر را پر کنید.

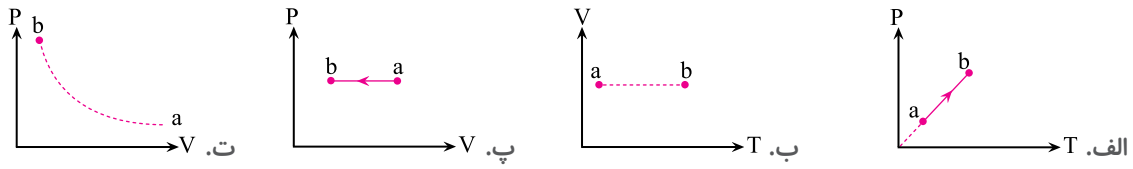


الف. گرما مبادله شدهٔ (Q)، ..... است.

ب. کار محیط بر روی دستگاه (W) ..... است.

پ. کار دستگاه بر روی محیط (W') ..... است.

۵. کدام نمودارهای زیر مربوط به فرایند ایستاوار هستند؟ نوع فرایند را مشخص کنید.



پاسخ تمرین‌های امتحانی

۱ **الف.** ماشین گرمایی **ب.** دستگاه ترمودینامیکی **پ.** تعادل ترمودینامیکی **ت.** متغیرهای ترمودینامیکی
ث. معادلهٔ حالت **ج.** فرایند ترمودینامیکی **چ.** منبع گرمایی

---

۲ موارد درست: عبارت‌های «پ» و «ت»

الف. نادرست، کمیت‌هایی که با آن‌ها حالت ترمودینامیکی دستگاه را توصیف می‌کنیم، ماکروسکوپی هستند.

ب. نادرست، در حالت‌های غیرتعادلی نمی‌توانیم مقادیر مشخص و یگانه‌ای را به متغیرهای ترمودینامیکی نسبت دهیم.

ث. نادرست، محیط و دستگاه هنگامی تبادل گرما دارند که با هم اختلاف دما داشته باشند.

ج. نادرست، هوای اتاق برای استکان چای داغ، منبع گرمایی محسوب می‌شود.

---

۳ **الف.**

$$PV = nRT \Rightarrow ۴۰\times۱۰^{۵}\,Pa \times V = ۲۰\,\cancel{mol} \times ۸\frac{J}{\cancel{mol}.K} \times ۳۰۰\,\cancel{K}$$

$$V = \frac{۴۸۰۰۰J}{۴۰\times۱۰^{۵}\,Pa} = ۰/۰۱۲m^{۳}$$

$$V = ۰/۰۱۲m^{۳} \times (\frac{۱L}{۱۰^{-۳}m^{۳}}) = ۱۲L$$

ب.

$$n = \frac{m}{M} \Rightarrow m = nM = ۲۰mol \times ۴\frac{g}{\cancel{mol}} = ۸۰g = ۰/۰۸kg$$

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow V = \frac{m}{\rho} = \frac{۰/۰۸kg}{۱۲۵\frac{kg}{m^{۳}}} = ۰/۰۰۰۶۴m^{۳}$$

---

۴ **الف.** مثبت **ب.** منفی **پ.** مثبت

---

۵ نمودارهای «الف» و «پ» ایستاوار هستند. «الف» نمودار هم‌حجم و «پ» نمودار هم‌فشار است.