پاسخ تمرین تحویلی ۱

مهلت ارسال پاسخ: تا پایان جمعه ۱۷ مهر

سوال ۱. کتاب ون نس چگونه از یک سیستم ساده و فرضی (داستان حبه‌های قند و جعبه) برای مدل‌سازی قانون اول ترمودینامیک و مفهوم پایستگی انرژی استفاده می‌کند؟

ون نس توضیح می‌دهد که انرژی یک جسم فیزیکی ملموس نیست که بتوان آن را مستقیماً دید یا وزن کرد. برای درک قانون اول، او سیستم را به کمک یک مدل ساده (پسر بچه‌ای به نام دنیس، جعبه سیگار و ۳۷ حبه قند) شبیه‌سازی می‌کند. مادر برای پیگیری حبه‌های قند، یک طرح حسابداری (Accounting Scheme) بر اساس اندازه‌گیری تغییرات داخل سیستم و عبور قندها از مرزها(پنجره‌ها) تنظیم می‌کند . همین ساختار ریاضی در ترمودینامیک برای قانون اول به کار می‌رود: تغییرات انرژی درونی سیستم ΔU با مقدار انرژی عبوری از مرزهای سیستم به‌صورت گرمای ورودی Q و کار خروجی W موازنه می‌شود:

$$\mathbf{\Delta U = Q - W}$$

این مدل ساده نشان می‌دهد که قانون اول یک معادله حسابداری است که موازنه دقیق انرژی میان سیستم و محیط را برقرار می‌سازد.

سوال ۲. هنگام اعمال قانون اول ترمودینامیک بر یک بلوک فولادی لغزنده همراه با اصطکاک، چه تناقض ظاهری پیش می‌آید و ترمودینامیک چگونه با مدل‌سازی درست مرز سیستم این مشکل را حل می‌کند؟

اگر تنها بلوک بالایِ در حال حرکت به عنوان سیستم انتخاب شود، به دلیل سرعت ثابت، نیروی خالص صفر بوده و کار خالص انجام شده بر روی بلوک صفر است $W = 0$. طبق رابطه $\Delta U = Q - W$، نتیجه می‌شود که $\Delta U = Q$. اما از آنجا که اصطکاک دمای بلوک را بالا می‌برد $\Delta U > 0$، این رابطه به اشتباه نشان می‌دهد که گرما Q از محیطِ سردتر به بلوک منتقل شده است. این تناقض به این دلیل رخ می‌دهد که اصطکاک درست روی مرز سیستم اتفاق افتاده است. ترمودینامیک این مسئله را با تغییر مدل و انتخاب هر دو بلوک در داخل یک مرز مشترک حل می‌کند. در این حالت، اصطکاک به داخل سیستم منتقل شده و معادله به‌صورت صحیح زیر نوشته می‌شود:

$$\mathbf{\Delta U_1 + \Delta U_2 = Q - W}$$

این مثال نشان می‌دهد که کاربرد درست ترمودینامیک در سیستم‌های واقعی، نیازمند هوشمندی در تعریف مرزهای سیستم است.

سوال ۳. مفهوم برگشت‌پذیری (Reversibility) در ترمودینامیک چگونه به کمک مدل ساده پیستون و سیلندر و دانه‌های شن تعریف می‌شود و چرا کار برگشت‌پذیر ($W = \int P\, dV$) اهمیت دارد؟

ون نس برای توضیح فرایند برگشت‌پذیر، یک گاز محبوس در پیستون و سیلندر بدون اصطکاک را مدل‌سازی می‌کند که وزنه روی آن با برداشتن دانه‌های بسیار ریز شن (ابعاد دیفرانسیلی) به آرامی سبک می‌شود. در این حالت، نیروهای داخلی و خارجی همواره در حالت تعادل دیفرانسیلی قرار دارند $F = PA$ و با افزودن تنها یک دانه شن، فرایند می‌تواند معکوس شود. چون نیروها در طول مسیر در تعادل هستند، می‌توان کار انبساط گاز را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\mathbf{W_{rev} = \int P\ dV}$$

مفهوم برگشت‌پذیری حد نهایی و حد نظری حداکثر کار قابل استخراج (در انبساط) یا حداقل کار مورد نیاز (در تراکم) را در سیستم‌های ترمودینامیکی مشخص می‌کند و معیاری برای سنجش بازدهی سیستم‌های واقعی است.

سوال ۴. در یک چرخه ایده‌آل و برگشت‌پذیر اتو که روی یک گاز محبوس انجام می‌شود، مقادیر گرمای مبادله‌شده در دو مرحله حجم ثابت به صورت زیر است:

- گرمای ورودی در مرحله احتراق (Q_{in}): $+500\ kJ$
- گرمای خروجی در مرحله تخلیه (Q_{out}): $-200\ kJ$

الف) کار خالص خروجی (W_{cycle}) حاصل از این چرخه را محاسبه کنید.
طبق قانون اول ترمودینامیک، چون سیستم پس از طی یک چرخه کامل به حالت اولیه خود بازمی‌گردد، تغییر کل انرژی درونی صفر است:

$$\Delta U_{\text{cycle}} = 0$$

بنابراین کار خالص برابر است با مجموع گرمای مبادله‌شده:

$$W_{\text{cycle}} = Q_{\text{in}} + Q_{\text{out}} = 500 + (-200) = 300\ \text{kJ}$$

ب) بازده حرارتی (η) این چرخه ایده‌آل چقدر است؟
بازده حرارتی (η) نسبت کار خالص تولیدشده به گرمای ورودی دریافت‌شده است:

$$\eta = \frac{W_{\text{cycle}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{300}{500} = 0.60 \quad (60\%)$$

سوال ۵. فرض کنید در مسئله قبل، به دلیل وجود نابارگشت‌پذیری و اصطکاک در یک موتور واقعی، بازده مراحل تراکم و انبساط برابر $\eta_{step} = 0.8$ باشد. اگر کار لازم برای تراکم ایده‌آل $W_{comp,rev} = -100\ kJ$ و کار تولیدی در انبساط ایده‌آل $W_{exp,rev} = +400\ kJ$ باشد:
الف) کار واقعی تراکم و کار واقعی انبساط را محاسبه کنید.
در مراحل کاری که به ورودی کار نیاز دارند، نابارگشت‌پذیری باعث می‌شود کار بیشتری نسبت به حالت ایده‌آل مصرف شود:

$$W_{\text{comp, act}} = \frac{W_{\text{comp, rev}}}{\eta_{\text{step}}} = \frac{-100}{0.80} = -125\ \text{kJ}$$

در مراحل کاری که کار تولید می‌کنند، نابارگشت‌پذیری باعث کاهش کار خروجی می‌شود:

$$W_{\text{exp, act}} = \eta_{\text{step}} \times W_{\text{exp, rev}} = 0.80 \times 400 = +320\ \text{kJ}$$

ب) کار خالص واقعی و بازده حرارتی جدید موتور را با همان گرمای ورودی $Q_{in} = 500\ kJ$ به دست آورید.
کار خالص واقعی موتور:

$$W_{\text{net, act}} = W_{\text{exp, act}} + W_{\text{comp, act}} = 320 + (-125) = 195\ \text{kJ}$$

بازده حرارتی واقعی موتور:

$$\eta_{\text{act}} = \frac{W_{\text{net, act}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{195}{500} = 0.39 \quad (39\%)$$

نتیجه: وجود نابارگشت‌پذیری با بازده ۸۰٪ در مراحل تراکم و انبساط، بازده کلی موتور را از ۶۰٪ به ۳۹٪ کاهش داده است.