

انرژی و دانشجوی سردرگم^۱

جان جویت^۲



[@roozbehzp](#)

مترجم: روزبه حسن زاده

^۱ این متن ترجمه‌ای است از پنج مجموعه مقاله با عنوان: "Energy and the Confused Student", *Physics Teacher*.
^۲ *John W. Jewett Jr* استاد ممتاز و بازنشسته‌ی دانشگاه پلی‌تکنیک کالیفرنیا و نویسنده‌ی کتابهایی چون «جهان فیزیک؛ عرفان، جادو و اسطوره»، «اصول فیزیک» و «فیزیک برای دانشمندان و مهندسان» می‌باشد.

فهرست

۴	کار	۱-۱
۴	شناسایی جابجایی در تعریف کار:	۱-۱
۶	کار برآیند:	۲-۱
۷	وضعیت‌هایی که در آنها اصطکاک وجود دارد:	۳-۱
۸	پرسش‌ها:	۴-۱
۹	نتیجه‌گیری:	۵-۱
۱۰	سیستم‌ها	۲-۲
۱۰	شناسایی سیستم:	۱-۲
۱۱	طبقه‌بندی کردن سیستم:	۲-۲
۱۲	کار داخلی و خارجی:	۳-۲
۱۳	چندین سیستم:	۴-۲
۱۴	مسائل:	۵-۲
۱۶	نتیجه‌گیری:	۶-۲
۱۷	زبان	۳-۳
۱۷	کار انجام‌شده بر روی ... توسط ...:	۱-۳
۱۷	انرژی پتانسیل:	۲-۳
۱۸	گرما:	۳-۳
۱۹	تبدیل و انتقال انرژی:	۴-۳
۲۰	اتلاف و از دست دادن انرژی:	۵-۳
۲۰	شرط‌های اعتبار:	۶-۳
۲۱	جرم به انرژی تبدیل می‌شود:	۷-۳
۲۱	پرسش‌ها:	۸-۳
۲۲	نتیجه‌گیری:	۹-۳

۴- رهیافت کلی انرژی

۲۳	.....	۱-۴	رهیافت سنتی نوعی:
۲۳	.....	۲-۴	رهیافت کلی:
۲۶	.....	۳-۴	طبقه‌بندی کردن سیستم:
۲۷	.....	۴-۴	فروکاستن از جمله‌های مُعادله‌ی پایستگی انرژی:
۳۰	.....	۵-۴	مسائل:
۳۱	.....	۶-۴	نتیجه‌گیری:

۵- رهیافت تکانه-انرژی برای مسائلی که درگیر سیستم‌های چرخان و

تغییر شکل پذیر هستند

۳۳	.....	۱-۵	اشیاء چرخان و تغییر شکل پذیر:
۳۴	.....	۲-۵	نگاهی دیگر به قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی:
۳۵	.....	۳-۵	نگاهی دیگر به مُعادله‌ی شبه کار یا مُعادله‌ی مرکز جرم:
۳۵	.....	۴-۵	رهیافت انرژی-تکانه:
۳۶	.....	۵-۵	مسائل نمونه:
۴۰	.....	۶-۵	نتیجه‌گیری:

۶- جوابیه‌ی مقاله

۴۲	.....	۱-۶	درباره‌ی تعریفی از کار:
۴۳	.....	۲-۶	پاسخ جوینت:

۷- منابع

۴۴
----	-------	-------	-------

۱- کار

انرژی مفهومی حیاتی در تحلیل پدیده‌های فیزیکی است که اغلب نقطه‌ی شروعی در حل مسائل فیزیک به شمار می‌رود و همینطور مفهومی کلّی است که در تمام برنامه‌های آموزشی فیزیک ظاهر می‌شود: مکانیک، ترمودینامیک، الکترومغناطیس و فیزیک مدرن.

انرژی در قلب توصیف فرآیندها در علوم زیست‌شناسی، شیمی، نجوم و زمین‌شناسی قرار دارد. پس لازم است که عنوان انرژی به وضوح و موثر در کتابهای درسی و ارائه‌های کلاسی گفتگو شود. متأسفانه اگر آموزگار در این باب دقیق نشود، برای دانشجو سردرگمی و گمانه‌های زیادی را در به‌کارگیری انرژی به ارمغان خواهد آورد. در اینجا چند گام در آموزش مفهوم انرژی برداشته می‌شود تا سردرگمی دانشجویان را کم کرده و یا از بین ببرد.

این فصل، نخستین فصل از مجموعه مقالات پنج تایی است که گامی در بهبود مبحث انرژی در کلاسها و کتابهای درسی برداشته تا فهم دانشجویان را از انرژی افزایش داده و از آن در حل مسائل بهره ببرند. ما با مفهوم کار آغاز می‌کنیم. یکی از روش‌های حل مسائل پیچیده در برخی کتابها و کلاسهای درسی، تعریف کار و معرفی تعدادی کمیتهای کارگونه (مثل شبه کار یا کار مرکز جرم) و همینطور معادلات انرژی‌گونه است (مثل قضیه‌ی شبه کار-انرژی جنبشی یا معادله‌ی مرکز جرم).

معرفی این کمیتهای و معادلات می‌تواند دانشجویان تازه‌کار را گیج کند. این مقاله از مسائل پیچیده‌ای گفتگو می‌کند که تنها با یک تعریف از کار و یا یک معادله از انرژی حل می‌شوند بدون اینکه لازم باشد از خواص کارگونه و یا دیگر معادلات انرژی‌گونه استفاده کنیم.

۱-۱ شناسایی جابجایی در تعریف کار:

آموزش کار بحث‌های زیادی را در متون فیزیک برانگیخته است [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12]. کتابهای درسی متداول می‌گویند که اگر نیرویی با اندازه و جهت \mathbf{F} به یک شی وارد شده و آن را به اندازه‌ی $\Delta \mathbf{r}$ جابجا کند آنگاه کار منسوب به این نیرو برابر می‌شود با:

$$W = \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r} = F \Delta r \cos \theta \quad (1)$$

که در آن θ زاویه‌ی بین بردارهای نیرو و جابجایی است. بسیاری از کتابهای درسی $\Delta \mathbf{r}$ را به صورت جابجایی شی، یا خیلی ساده جابجایی تعریف می‌کنند بدون اینکه مشخص کنند چه چیز واقعاً جابجا شده است. این ابهام بعدها در مطالعه‌ی مکانیک به صورت مشکلات بنیادی بروز می‌کند، مثلاً زمانی که دانشجویان با نیروهای اصطکاک یا نیروهای وارده به اشیاء چرخان یا تغییرشکل‌پذیر مواجه می‌شوند.

^۱ به عنوان نویسنده‌ی کتاب درسی، دنبال این نیستم که عبارات مشکل‌ساز را در کتابهای درسی دیگران مشخص کنم. نمی‌خواهم مقاله‌ام به صورت کالای بازاری به چشم آید بلکه می‌خواهم تبادل حرفه‌ای باشد که مجموعه‌ای از پیشنهادها را برای بهبود آموزش انرژی به دانشجویان ارائه دهد. من این ایرادها را از چند کتاب درسی به شکل یک ایراد کلی در آورده‌ام، آنها نقل قول مستقیم نیستند.

در برخی از رهیافت‌ها جابجایی در مُعادله‌ی (۱) بنابر اقتضای مسئله تعریف می‌شود و بسته به اینکه کمیّت کارگونه‌ای که در موردش بحث می‌شود چه ویژگی‌هایی داشته باشد، تعاریف مختلفی به خود می‌گیرد. به عنوان مثال جابجایی برای یک کمیّت کارگونه که گاهی از آن به نام شبه‌کار [2] [3] [4] (یا کار مرکز جرم [12]) یاد می‌شود جابجایی مرکز جرم است.

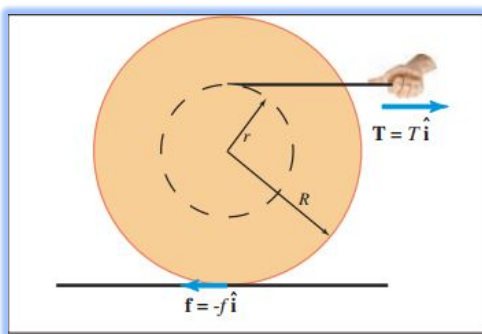
در رهیافت دیگر که چّبی و شرود ارائه دادند [6] وقتی یک اصل انرژی بر سیستمی از ذرات نقطه‌ای اعمال می‌شود طوری این اصل پیاده می‌شود که گویی همه‌ی جرم ذرات، در یک نقطه (مرکز جرم آن) متمرکز شده است. در اینجا هم جابجایی همان جابجایی مرکز جرم است.

در رهیافت من برای حلّ مسائل از رهیافت انرژی استفاده می‌شود که در آن ΔT همیشه جابجایی نقطه‌ای است که نیرو بر آن اثر می‌کند. برای یک سیستم تک-ذره یا تغییرشکل‌ناپذیر (صُلب) یا غیرچرخان، جابجایی نقطه اثر نیرو همان جابجایی مرکز جرم سیستم یا شیء است. برای این سیستم‌ها تعریف ΔT به عنوان جابجایی شیء مشکلاتی به همراه نمی‌آورد. با این وجود برای سیستم‌های تغییرشکل‌پذیر یا چرخان، جابجایی مرکز جرم سیستم متفاوت از جابجایی نقطه اثر نیرو است. در این موارد نویسندگان کتابهای درسی ممکن است شبه‌کار یا کار مرکز جرم را معرفی کنند. من در این مقاله ادّعا می‌کنم که نیازی به تعریف این کمیّت‌های جدید کارگونه نیست و به جای آنها از رهیافت انرژی بحث خواهیم کرد که به این تعاریف نیازی ندارد.

می‌توان علم مکانیک را بدون ارائه‌ی یک تعریف واحد آموزش داد. این کار از دو راه امکان‌پذیر است:

۱- در مکانیک از هر مسئله‌ای که با ذرات سر-و-کار ندارد اجتناب کرده و وقتی ترمودینامیک را یاد می‌دهید جابجایی Δr را از دوباره تعریف کنید. اما چرا باید در درس مکانیک دانشجویان را با یک تعریف آشنا کرد و از نو در ترمودینامیک آنها را وادار کرد که آن تعریف را فراموش کرده و تعریف دیگری را بپذیرند؟ در حقیقت همانطور که چّبی^۱ و شرود^۲ خاطرنشان کردند [6]: اغلب در دوره‌های آموزش سنتی، انرژی‌ای که برای حلّ مسائل مکانیک معرفی می‌شود با انرژی‌ای که در ترمودینامیک گفته می‌شود فرق دارد. (هرکدام برای انرژی نماد متفاوتی به کار می‌برند)

۲- شبه‌کار یا کمیّت‌های کارگونه‌ی دیگری را معرفی کنید که همراه با معادلات انرژی گون مثل صورتهای مختلف



شکل ۱ - نیرویی به بزرگی T قرقره‌ای به شعاع R را می‌کشد. این نیرو به نخی وارد می‌آید که به دور قرقره پیچانده شده است. قرقره در تماس با میز افقی بوده و از طرف آن نیروی اصطکاکی به بزرگی f بر قرقره وارد می‌شود. قرقره بدون لغزش می‌غلتد.

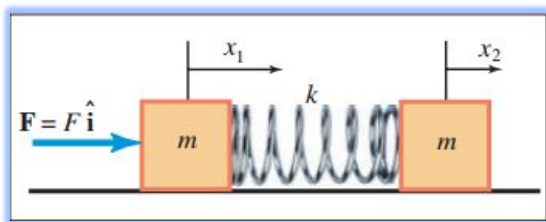
قضیه‌ی کار-انرژی به کار می‌رود. این رهیافت می‌تواند مسائلی را حل کند که درگیر سیستم‌های تغییرشکل‌پذیر یا چرخان هستند و فقط به درک مفهومی دانشجو کمک می‌کند. اما دانشجویان فیزیک مقدماتی به این مشکل برمی‌خورند که کار واقعی چه چیز است و شبه‌کار چه چیز؟ یا مُعادله‌ی درست انرژی چیست؟ و چه چیز شبیه به یک مُعادله‌ی انرژی است و چه چیز نیست؟

در این مقاله از رهیافت دیگری نیز گفتگو می‌شود که به دانشجویان اجازه می‌دهد با تعاریف خوش‌دست، مسائل سیستم‌های چرخان یا

^۱ Chabay
^۲ Sherwood

تغییر شکل پذیر را حل کنند، تعاریفی که با ترمودینامیک هم سازگار است.

اکنون نمونه‌هایی را در نظر می‌گیریم که در آن جابجایی مرکز جرم جسم با جابجایی نقطه اثر نیرو متفاوت است. این دو مورد را **مونگان**^۱ پیشنهاد کرده است^[12]؛ در شکل ۱ دستی نخ‌ری را با نیروی T می‌کشد. نخ به دور محور قرقره پیچانده شده است. قرقره از حال سکون شروع به حرکت کرده و بدون لغزش می‌گردد. شعاع محور r و شعاع قرقره R است. مرکز جرم قرقره به اندازه L در جهت افق جابجا می‌شود. می‌توان به راحتی نشان داد که نقطه اثر نیرو با محور قرقره به اندازه $L \left(1 + \frac{r}{R}\right)$ جابجا می‌شود. از این رو کاری که دست بر روی سیستم قرقره-نخ انجام می‌دهد TL نیست بلکه $TL \left(1 + \frac{r}{R}\right)$ است.



شکل ۲ - دو بلوک به جرم یکسان m با فنری با ثابت نیروی k با هم در تماس‌اند. سیستم و فنر بر روی میز بدون اصطکاکی در حال سکون‌اند. نیروی ثابت F به بلوک سمت چپ وارد شده و آن را به اندازه x_1 جابجا می‌کند. در بازه‌ی زمانی این عمل، فنر باعث می‌شود که بلوک سمت راستی به اندازه x_2 جابجا شود.

دومین وضعیت در شکل ۲ نشان داده شده است. نیروی ثابت F بلوکی به جرم m را هل می‌دهد. این بلوک فاصله‌ی x_1 را تحت اثر این نیرو می‌پیماید. بلوک مذکور با فنری با ثابت فنر k با بلوک مشابه دیگری در تماس است. وقتی بلوک اول فاصله‌ی x_1 را طی می‌کند بلوک دوم نیز فاصله‌ی x_2 را به سمت راست طی خواهد کرد. در این بازه‌ی زمانی مرکز جرم سیستم جابجایی $\frac{1}{2}(x_1 + x_2)$ را خواهد پیمود. کار انجام شده توسط نیروی وارد شده بر روی سیستم برابر با $\frac{1}{2}F(x_1 + x_2)$ نیست بلکه Fx_1 است. زیرا نقطه اثر نیرو جابجایی‌ای به اندازه x_1 را می‌پیماید.

۱-۲ کار برآیند:

اغلب پیش می‌آید که چندین نیرو به یک سیستم وارد می‌شوند. در این حالت می‌توان کار برآیندی را محاسبه کرد که توسط نیروها بر روی سیستم انجام می‌شود. متأسفانه آموزگار یا مؤلف، تعریف محدودی از کار برآیند ارائه می‌دهد که همه جا معتبر نیست:

کار برآیند انجام شده توسط چند نیرو بر روی یک شیء برابر است با حاصل ضرب نیروی برآیند بر روی شیء در جابجایی شیء

در خیلی از این عبارات مثل عبارت بالا، کار مورد بحث کاری است که بر یک شیء انجام می‌گیرد. یکی از نکاتی که این مقاله بر آن تأکید می‌کند این است که بهتر است به جای **اشیاء** به **سیستم‌ها** اندیشید. از سیستم‌ها در فصل دوم با جزئیات بیشتری صحبت خواهیم کرد. تأکید بر روی بررسی سیستم بجای بررسی یک شیء به دانشجو این امکان را می‌دهد که تنوع بیشتری در درک مسائل داشته باشد. عبارت بالا تنها زمانی معتبر است که سیستم کاملاً صلب و تغییر شکل ناپذیر باشد. اگر سیستم تغییر شکل پذیر باشد نیروهای مختلفی که بر سیستم اثر می‌کنند ممکن است سبب جابجایی‌های مختلفی شوند. بنابراین عبارت صحیح برای محاسبه‌ی کار برآیند انجام شده توسط نیروها بر روی سیستم این است:

کار برآیند انجام شده توسط چند نیرو بر روی یک سیستم برابر است با مجموع کارهایی که هر کدام از نیروها جداگانه

کار انجام شده توسط هر نیرو باید بر حسب جابجایی نقطه اثر همان نیرو محاسبه شود. این عبارت به طور عام صحیح بوده و در حالت خاص سیستم‌های تغییر شکل ناپذیر به عبارت قبلی بدل می‌گردد. رهیافت عمومی این است که به جای اینکه نیروها را با هم جمع کرده و بعد کار را محاسبه کنیم، کار هر نیرو را جداگانه حساب کرده و بعد آنها را با همدیگر جمع کنیم.

۱-۳ وضعیت‌هایی که در آنها اصطکاک وجود دارد:

کار نیروهای اصطکاک ناحیه‌ی دیگری در قلمرو مکانیک است که مشکلات خود را دارد. اگر Δr به صورت جابجایی شیء تعریف شود بنا بر آنچه که در درسگفتارها و کتابهای درسی بیان می‌شود کار نیروی اصطکاک یک بلوک که بر روی یک سطح می‌لغزد برابر با $W = -f_k d$ است که در آن نیروی اصطکاک جنبشی بر روی بلوک و d فاصله‌ای است که بلوک نسبت به سطح می‌پیماید. علامت منفی حاکی از آن است که نیروی اصطکاک در خلاف جهت بردار جابجایی است. این عبارت به همین شکل وارد قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی برای بلوک می‌شود.

رهیافت فوق این واقعیت را نادیده می‌گیرد که جابجایی بلوک همان جابجایی نیروی اصطکاک نیست. نیروی اصطکاک جابجایی‌های زیادی را از راه تماس‌های بیشمار بلوک با سطح می‌پیماید. جابجایی مذکور پیچیده بوده و با تغییر شکل سطح زیرین بلوک سر-و-کار دارد. این مورد در متون فیزیک بحث شده است [13] [14].

دانشجویی که در کلاسی حسابان-محور حضور دارد ممکن است مشکل کمی در درک $W = -f_k d$ داشته باشد. او می‌داند که کار انجام شده توسط هر نیرو برابر با انتگرال مسیری است که بر مسیر آن شیء گرفته می‌شود. در مورد بلوکی که بر یک سطح می‌لغزد نیروی اصطکاک همواره در خلاف جهت جابجایی‌های بینهایت کوچک بلوک است. برای نیروی اصطکاک ثابت، مقدار این انتگرال به حاصلضرب نیرو در طول مسیر فرو کاسته می‌شود.

اما دانشجویی که در آن کلاس حضور نداشته چه؟ این دانشجو از فرمول انتگرال مسیر کار خبر ندارد. دانشجوی باذکاوت طبق تعریف کار معادله‌ی $W = -f_k d$ را در نظر می‌گیرد و در شگفت است که چرا اکنون کار بر حسب فاصله و نه بر حسب جابجایی تعریف شده است. این معادله یک سری شکاف مفهومی با مباحث قبلی کار درست می‌کند که در آنجا کار بر حسب جابجایی محاسبه می‌شد. از طرفی دانشجوی ناآشنا با حسابان هیچ ایده‌ای از جابجایی‌های بینهایت کوچک نداشته و ممکن است Δr را طوری در تعریف کار تعمیم دهد که برای جابجایی‌های ماکروسکوپی تبدیل به فاصله شود. برای شیء‌ای که در یک مسیر منحنی شکل حرکت می‌کند d طول مسیر است که کاملاً متفاوت از اندازه‌ی جابجایی شیء است.

به عقیده‌ی من رهیافت عمومی‌تر برای وضعیتی مانند وضعیت بلوک لغزان بر سطح این است که ۱- عبارت «کار انجام شده توسط اصطکاک» را حذف کرده، ۲- قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی را درگیر آن نکنیم و ۳- ترکیب $-f_k d$ را برابر با تغییر انرژی مکانیکی سیستم مکانیکی E در نظر بگیریم که بلوک و سطح درگیر با بلوک با آن سر-و-کار دارند [15] [16]. یعنی:

$$-f_k d = \Delta E_{\text{مکانیکی}} \quad (2)$$

معادله‌ی (۲) تنها قسمتی از تغییرات انرژی مکانیکی را به نمایش می‌گذارد که نیروی اصطکاک ایجاد کرده است. البته اگر

نیروهای دیگری اثر کنند، مثل هل دادن دستی بلوک یا غلتش گرانشی رو به پایین بلوکی که بر روی سطح شیبدار قرار دارد، انرژی مکانیکی سیستم متناظر با کاری که این نیروها بر روی آن انجام می‌دهند تغییر خواهد کرد. در مواردی مثل لغزش بلوک بر روی سطح شیبدار، سیستم می‌تواند گسترش یافته و زمین را نیز دربر بگیرد. بنابراین انرژی مکانیکی سیستم شامل هر دو انرژی یعنی انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل گرانشی خواهد بود.

صرف نظر از اینکه چه نیروهایی در کنار نیروی اصطکاک بر بلوک اثر می‌کنند کاهش در انرژی مکانیکی در معادله‌ی (۲) متناظر با افزایش انرژی درونی سیستم خواهد بود:

$$+f_k d = \Delta E_{\text{درونی}} \quad (۳)$$

که در آن انرژی درونی، بین بلوک و سطح به اشتراک گذاشته می‌شود. رهیافت فوق همان گامهای محاسباتی را در مسائل انرژی درگیر با اصطکاک برمی‌دارد که رهیافت کار $W = -f_k d$ و وقتی این رهیافت را دنبال کنیم می‌بینیم که همه‌ی دُشواریها و ناسازگاریهای مفهومی از بین خواهند رفت.

نکته‌ی دیگری که نباید از قلم انداخت و بیشتر نیز گفته شد این است که در رهیافت انرژی برای حل مسائل، **قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی نقطه‌ی شروع نیست**. ممکن است در برخی از راه‌حل‌ها از این قضیه استفاده شود ولی برای دانشجویان به عنوان یک اصل بنیادین در حل مسائل انرژی به کار گرفته نمی‌شود. این فرق مهم با رهیافتهای سنتی در چهار فصل بعدی بیشتر بررسی می‌شود.

۱-۴ پرسش‌ها:

با بحثی که انجام شد پرسش‌های درست-نادرست زیر را در نظر بگیرید:

- ۱- **درست یا نادرست؟** پسری با وارد کردن نیرویی رو به پایین به زمین، به سمت بالا می‌پرد. قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی، $W = \Delta K$ ، می‌تواند بر روی پسر به کار رفته تا سرعت جدا شدن او را از زمین به دست آورد.
- ۲- **درست یا نادرست؟** بالونی همزمان از همه جهت فشرده شده است. چون مرکز جرم بالون در این فشرده‌سازی جابجا نشده پس کاری هم بر روی بالون انجام نگرفته است.

پاسخ هر دو پرسش نادرست است. پرسش ۱ اشاره به یک تجربه‌ی ساده و روزمره دارد که متاسفانه با آموزش‌های سنتی فیزیک نمی‌تواند تحلیل شود. این آموزش‌ها نیاز به معرفی کمیتهای کارگونه و معادلات انرژی‌گونه دارند. نیروی رو به بالایی که پسر را به سمت بالا می‌راند برابر است با نیرو عمودی‌ای که از طرف زمین بر پای او وارد شده است. مرکز جرم پسر یک جابجایی به سمت بالا خواهد داشت. در چارچوب مرجع متصل به زمین، نیروی عمودی با جابجایی همراه نمی‌شود پس هیچ کاری هم بر روی پسر انجام نمی‌دهد. تغییرات انرژی جنبشی پسر از این کار انجام‌نشده به دست نمی‌آید. این نمونه‌ای از یک سیستم تغییرشکل‌پذیر است. مثال‌های دیگر از این دست شخصی ست که از پله‌ها یا نردبان بالا می‌رود یا دختری که بر یک اسکیت‌بورد سوار است دیواری را هل می‌دهد و یا تگه‌ای بتونه که بر دیوار زده می‌شود. در تمام این موارد، نیروی تماسی هیچ کاری انجام نمی‌دهد زیرا در چارچوب مرجع لخت متصل به سطحی که نیرو بر آن وارد می‌شود

هیچ جابجایی‌ای صورت نمی‌گیرد^۱. اینها وضعیتهایی متداول‌اند. با این همه، آموزش‌های ما درباره‌ی فیزیک بایستی به گونه‌ای باشد که دانشجویان به یاری آن بتوانند این مسائل را به درستی تحلیل کنند. با تعریف درست از کار و قدری رهیافت کُلّی انرژی، دانشجو به جای اینکه درگیر کاربُردهای قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی شود، می‌تواند به درستی این وضعیتهای را صورتی از تبدیل انرژی در داخل سیستم تشخیص دهد.

پرسش ۲ مستقیماً به تعریف کار در ترمودینامیک حمله می‌برد. اگر ΔT به عنوان جابجایی شیء تعریف شود آنگاه هیچ کاری بر روی بالون صورت نمی‌گیرد زیرا هیچ جابجایی‌ای انجام نمی‌شود. اما اگر جابجایی به عنوان جابجایی نقطه اثر نیرو تعریف شود روشن است که نیروهایی که موجب فشردن بالون می‌شوند باعث جابجا شدن سطح به سمت داخل شده و در نتیجه بر روی بالون کار انجام می‌دهند. در این مورد کار سبب افزایش انرژی درونی گاز بالون می‌شود.

پرسش ۲ به مبحث کار کُل نیز اشاره دارد. نیروی کُلّی وارده بر بالون صفر است زیرا بالون ساکن و پایدار است. بنابراین رهیافتی که کار کُل را از نیروی کُل به دست می‌آورد نتیجه‌ی صفر را برای کار نیروهای فشردنده به دست خواهد داد که با توضیحاتی که پیشتر دادیم می‌دانیم که نادرست است.

۱-۵ نتیجه‌گیری:

برای روشن کردن تعریف کار در کتابهای درسی و ارائه‌های کلاسی می‌توان بیش از اینها صحبت کرد. این مباحث برای اجتناب از ناسازگاریهای مفهومی لازم است و مانع از این می‌شود که عبارات و تعاریف قبلی را در شرایط جدید اصلاح کنیم. می‌توان مسائل فیزیک را بدون تعریف چیزهای اضافی مانند کمیتهای کارگونه و معادلات انرژی‌گونه حل کرد. این کار نه تنها رهیافتی ساده هست و به درک مسائل پیچیده کمک می‌کند بلکه موجب می‌شود که بین مکانیک و ترمودینامیک ارتباط مهمی برقرار شود. در فصل بعدی از مشکلاتی صحبت خواهیم کرد که در مطالعه‌ی انرژی، از شناسایی نادرست سیستم ناشی می‌شود.

^۱ این عبارت فرض می‌کند سطحی که نیرو وارد می‌آورد تغییرشکل ناپذیر است. در حقیقت سطح به آهستگی تغییرشکل می‌دهد؛ زمین زیر پای پسر بچه کمی به پایین پَس می‌رود، پله‌های نردبان هنگام بالا رفتن شخص از آن مقدار کمی به پایین تغییرشکل می‌دهد، وقتی دختر دیوار را هل می‌دهد و یا بتونه به دیوار می‌خورد دیوار کمی به داخل گود می‌شود. در این موارد جهت جابجایی نقطه اثر نیرو خلاف جهت نیروی عمودی سطح است، پس کار انجام‌شده توسط سطح روی پسر، شخص، دختر و یا بتونه مقداری ست کوچک و منفی.

۲ - سیستم‌ها

انرژی، مفهومی حیاتی در حل مسائل فیزیک است اما اگر آموزگار یا کتاب درسی آن را دقیق ارائه ندهد منبع اصلی سردرگمی برای دانشجویان خواهد شد. فصل اول از این مقاله از آشفتگی دانشجویانی صحبت می‌کند که گرفتار تعاریف سنتی از کار شده‌اند. هر جا که صحبت از کار می‌شود منظور کاری هست که یک نیرو بر روی سیستم انجام می‌دهد. این عبارت دو مؤلفه مهم دارد: ۱- شناسایی نیرویی که این کار را انجام می‌دهد و ۲- شناسایی سیستم به عنوان دریافت کننده کار. تعداد خیلی کمی از کتابهای درسی یا درسگفتارها برای حل مسائل انرژی از یک رهیافت سیستم-محور پیروی می‌کنند. دو قدم آغازین برای راهیابی به مسائل انرژی عبارتند از:

۱- شناسایی سیستم

۲- طبقه‌بندی کردن سیستم

۱-۲ شناسایی سیستم:

سیستم می‌تواند هر کدام از موارد زیر باشد:

- یک شیء
- دو شیء که با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند.
- مجموعه‌ای از چند اشیاء که با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند.
- یک شیء تغییرشکل‌پذیر مانند توپ لاستیکی یا یک حجم از مولکولهای گاز
- یک شیء چرخان مثل چرخ
- ناحیه‌ای از فضا که ممکن است تغییرشکل‌پذیر هم باشد مثل حجم سیلندر موتور ماشین که در بالای پیستون قرار دارد.

در دوره‌های آموزش فیزیک مقدماتی هر جا که انرژی مطالعه می‌شود، اغلب سیستم مورد بررسی یک شیء است. در رهیافت سیستم-محور آموزش انرژی همه جا بر سیستم تاکید می‌گردد - حتی در مسائل ساده - تا دانشجو برای مسائل پیچیده‌ای آماده شود که در آینده با آنها روبرو می‌شود.

حال سیستم هر چه که می‌خواهد باشد مرزی بسته آن را دربر گرفته و سیستم را از هر چه که بیرون آن قرار دارد جدا می‌کند. چیزهای بیرون سیستم، محیط یا پیرامون نام دارند. مرز سیستم ممکن است در تماس با یک سطح فیزیکی باشد مثل سطح خارجی توپ بیسبال ولی لزومی ندارد که این تماس واقعاً برقرار باشد.

به عنوان یک نمونه، مورد نسبتاً ساده‌ای را در نظر بگیرید که در آن شیء‌ای در امتداد یک سطح اصطکاک‌دار کشیده می‌شود. نیروی F موازی با سطح به شیء وارد آمده و آن را با سرعت کم و ثابت می‌کشاند. فرض کنید از دانشجو خواسته شود تا این وضعیت را از راه انرژی تحلیل کند. در رهیافت سیستم-نامحور سنتی دانشجو تمایل دارد بر روی شیء متمرکز شود.

زیرا شیء تنها چیزی است که کار را دریافت می‌دارد. سپس قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی را، $W = \Delta K$ را روی آن به کار می‌برد. زیرا این قضیه تنها اصل انرژی‌ای است به او گفته‌اند. این رهیافت چهار نقص دارد: نخست همانطور که در فصل اول در موردش صحبت شد، کاری که نیروی اصطکاک بر روی شیء انجام می‌دهد نمی‌تواند محاسبه شود زیرا جابجایی شیء با جابجایی‌های بیشمار نقاط اتصال مؤثر نیروی اصطکاک یکی نیست. دوم، تغییر انرژی جنبشی ΔK صفر است زیرا شیء با سرعت ثابت کشیده می‌شود. سوم، بین شیء و سطح، انتقال انرژی به شکل گرما صورت می‌گیرد که نمی‌توان آن را محاسبه کرد و یا در قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی مشخص نمود. سر آخر، قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی شامل جمله‌ای برای انرژی درونی نیست که در این مسئله مؤلفه‌ای مهم در ذخیره‌سازی انرژی می‌باشد.

در مقایسه با یک دانشجوی سنتی، دانشجوی آشنا با رهیافت سیستم-محور و مسائل و طبیعت عام انرژی، مشکلات این مسئله را درک کرده و می‌داند که خیلی بهتر است سیستم را به عنوان شیء و سطح انتخاب کند و مرز آن را هم محدوده‌ی بیرونی شیء و سطح در نظر بگیرد. این مرز نیروی F را دربر نمی‌گیرد (چون امکان انتقال انرژی به شکل گرما از سطح به جسم وجود دارد، مرز سیستم باید شامل کل جسم باشد نه فقط سطح دو بُعدی با ضخامت صفر). در این صورت تنها انتقال انرژی به درون سیستم از طریق کاری است که نیروی F بر روی سیستم انجام می‌دهد و تنها تغییر در انرژی سیستم، تغییر در انرژی درونی آن است که عامل آن اصطکاک می‌باشد:

$$W_F = \Delta E_{\text{درونی}} \quad (1)$$

در حقیقت یک مبادله‌ی انرژی به شکل گرما بین شیء و سطح صورت می‌گیرد. با این همه این مبادله در درون سیستم رخ می‌دهد. بدون اطلاعات بیشتر هیچ راهی وجود ندارد تا بدانیم تغییرات جداگانه‌ی انرژی درونی شیء و سطح چگونه است. معادله‌ی (۱) تنها چیزی است که می‌توانیم راجع به این وضع بگوییم.

۲-۲ طبقه‌بندی کردن سیستم:

وقتی سیستم شناسایی شد، مهم است که تعیین کنیم آیا سیستم **مُنزوی** است یا **غیر مُنزوی**. سیستمی مُنزوی است که هیچ انتقال انرژی‌ای از طریق مرزهایش صورت نگیرد. در سیستم غیر مُنزوی انتقال انرژی از طریق یک یا چند مکانیسم انجام می‌شود.

در موردی که در بخش قبل صحبت شد - شیء‌ای که در امتداد یک سطح کشیده می‌شود - فرض کنید که ما شیء را به عنوان سیستم در نظر بگیریم. این سیستم به وضوح غیر مُنزوی است زیرا انرژی از طریق کاری که نیروی وارده بر آن انجام می‌دهد و نیز از طریق گرما از مرز عبور می‌کند. اصطکاک باعث گرم شدن شیء می‌شود و انرژی از شیء گرم شده به هوا و بخش‌های سردتر سطح جریان می‌یابد، بخش‌هایی که با حرکت شیء با آن روبرو می‌شوند. امواج مکانیکی (صوت) هم انرژی منتقل می‌کنند، وقتی شیء سطح ناصاف را خراش می‌دهد صوت تولید می‌شود. اگر ما شیء و سطح را به عنوان سیستم شناسایی کنیم این سیستم هنوز سیستمی غیر مُنزوی است زیرا نیروی وارده بر آن کار انجام می‌دهد و انرژی از طریق گرما و صوت به هوا منتقل می‌شود. در این وضعیت برای شناسایی یک سیستم مُنزوی باید هوا و نیروی F را هم در سیستم وارد کنیم تا کار، گرما و صوت به عنوان انتقال انرژی در درون سیستم توصیف شوند و نتوانند از مرزهای سیستم عبور کنند.

وضعیت‌های فیزیکی‌ای که درگیر انتقال انرژی از طریق گرما، صوت و نور هستند به طور کلی پیچیده‌اند زیرا با افزایش

فاصله، انرژی از طریق این فرآیندها پخش و گسترش می‌یابد. در اکثر اوقات با انتخاب اندازه‌ی معقولی از سیستم می‌توان به عنوان یک تقریب از این انتقال انرژی چشم‌پوشی کرد. برای مثال در شیء‌ای که سقوط می‌کند مقاومت هوا معمولاً نادیده گرفته می‌شود زیرا گرم‌شدن شیء توسط نیروی بازدارنده و انتقال انرژی بین شیء و هوا توسط گرما ناچیز است. در این مورد اگر شیء به تنهایی به عنوان سیستم مشخص شود، سیستم مطابق با کاری که نیروی گرانش روی آن انجام می‌دهد غیر مَنزوی است. اگر ما شیء و زمین را به عنوان سیستم در نظر بگیریم آنگاه سیستم مَنزوی خواهد شد و هیچگونه انتقال انرژی در مرز این سیستم وجود نخواهد داشت.

زمانی که سیستم شناسایی و طبقه‌بندی شد، اصل پایستگی انرژی بر آن اعمال می‌گردد. این اصل بر هر دو نوع سیستم مَنزوی و غیر مَنزوی اعمال می‌شود. این فرآیند در فصل چهارم بیشتر بررسی خواهد شد.

۲-۳ کار داخلی و خارجی:

به عنوان مثال دیگری از اهمیت شناسایی سیستم، عبارتی را در نظر بگیرید که یک کتاب درسی یا درسگفتار متداول درباره‌ی انرژی پتانسیل صادر می‌کند:

وقتی یک نیروی پایستار کار W را انجام می‌دهد انرژی پتانسیل متناظر با آن نیرو به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$W = -\Delta U \quad (2)$$

چنین عبارتی هیچ اشاره‌ای به سیستم نمی‌کند. اشاره‌ای نمی‌کند که این نیروی پایستار خارجی است یا داخلی و کار بر روی سیستم انجام می‌گیرد یا در داخل سیستم. دانشجوی باذکاوت در اینجا تناقض می‌بیند: «اگر من کتابی را از قفسه‌ای به قفسه‌ی بالاتر ببرم بر روی سیستم کتاب-زمین کار مثبت انجام می‌دهم و در انرژی پتانسیل گرانشی سیستم افزایش وجود خواهد داشت نه کاهش». معادله‌ی مطلوب برای این وضعیت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$W = \Delta U \quad (3)$$

که در آن U بیانگر انرژی پتانسیل گرانشی سیستم کتاب-زمین است. دانشجو با نگاه به معادلات (۲) و (۳) درباره‌ی علامت منفی در یک معادله و نبودن آن در معادله‌ی دیگر گیج خواهد شد. اینجا حیاتی است به دانشجو بگوییم که **کارها در سمت چپ معادلات با هم یکی نیستند**. در معادله‌ی (۳) کار W کاری است که محیط بر روی سیستم انجام می‌دهد و بیانگر عبور انرژی از مرز سیستم است و ما می‌توانیم آن را کار **خارجی** در نظر بگیریم زیرا بیانگر تاثیر از خارج سیستم است. در معادله‌ی (۲) کار W کار **داخلی** است که در آن عضوی از سیستم بر روی عضو دیگر آن انجام می‌دهد. در مورد کتابی که سقوط می‌کند معادله‌ی (۲) شرح می‌دهد که W کاری است که نیروی گرانشی ناشی از زمین بر روی کتاب انجام می‌دهد که در سیستم کتاب-زمین یک کار داخلی است. در اینجا به شدت آگاهی داده می‌شود که برای کارها در معادلات (۲) و (۳) باید نمادهای متفاوتی را به کار برد تا تأکیدی بر تفاوت آنها باشد [15] [17].

معادله‌ی (۳) در ارائه‌ها کمتر از معادله‌ی (۲) ظاهر و در تعداد کمتری از آنها هم مقایسه‌ای بین این دو انجام می‌شود. با این همه معادله‌ی (۳) مهم است زیرا در قیاس با قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی ($W = \Delta K$) قرار می‌گیرد. در قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی، انرژی با انجام کار به سیستم منتقل شده و در نتیجه موجب افزایش انرژی جنبشی سیستم می‌شود. معادله‌ی (۳) یک قیاس با آن را به نمایش می‌گذارد که در آن کار انجام‌شده باعث انتقال انرژی به آن شده و افزایشی را در انرژی پتانسیل سیستم سبب خواهد شد.

وقتی نیروهای پایستار را به انرژی پتانسیل ربط می‌دهیم مهم است بدانیم نیروی پایستار بین عضوهای سیستم اثر کرده و کار انجام شده در داخل سیستم خواهد بود. عبارت بهتر و کاملتر در ارتباط با معادله‌ی (۲) چنین است:

سیستمی را در نظر بگیرید که نیروی پایستاری بین عضوهای آن اثر می‌کند. اگر عضوی از سیستم حرکت کند بطوریکه نقطه اثر نیروی پایستار دستخوش جابجایی شود آنگاه این نیرو کار W_C ^۱ را در داخل سیستم انجام داده است. انرژی پتانسیل متناظر با سیستم مطابق با معادله‌ی زیر تغییر خواهد کرد:

$$W_C = -\Delta U \quad (۴)$$

بارو^۲ می‌گوید [18]: «واژه‌ی کار می‌تواند به عنوان یک عصبی زیر بغل فهمیده شود که ما را قدم‌زنان تا معرفی انرژی پتانسیل پیش می‌برد ... در تمام مسائل مکانیک که بعدها آموزش می‌دهند کار کنار گذاشته شده و از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل استفاده می‌شود» به نظر می‌رسد این عبارت، کار داخلی و خارجی را با هم قاطی کرده است. کار داخلی در حقیقت به تغییر انرژی پتانسیل مربوط است و کار خارجی به تغییر در هر نوع از انرژی در سیستم: انرژی جنبشی (قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی)، انرژی پتانسیل (بُردن کتاب به یک قفسه بالاتر) یا انرژی درونی (مالیدن دستها به هم). پس در رهیافت سیستم-محور، کار هیچگاه «کنار گذاشته نمی‌شود» در عوض تمایزی مهم بین کار داخلی و کار خارجی بر روی سیستم برقرار می‌شود.

۴-۲ چندین سیستم:

یک مسئله ممکن است در هر قسمت از راه‌حل خود درگیر سیستمی متفاوت از بقیه‌ی قسمت‌ها شود. برای مثال آزمایش تفنگ فتری و آونگ بالیستیک را در نظر بگیرید. این آزمایش در بسیاری از آزمایشگاه‌های مقدماتی انجام می‌شود [15]. تحلیل این دستگاه سه نوع سیستم متفاوت را درگیر خود می‌کند. نخستین سیستم، فنر و پرتابه‌ای است که از تفنگ فتری شلیک می‌شود. این سیستم منزوی از طریق اصل پایستگی انرژی مکانیکی سرعت پرتابه را به فشردگی فنر مربوط می‌سازد. دومین سیستم، پرتابه و بازوی آونگ است. پایستگی تکانه بر این سیستم منزوی اعمال شده تا بین سرعت اولیه‌ی پرتابه و سرعت نهایی پرتابه-بازو ارتباط برقرار کند. در نهایت پایستگی انرژی مکانیکی بر سیستم منزوی پرتابه، بازوی آونگ و زمین اعمال شده تا بین سرعت نهایی پرتابه-بازو و ارتفاع نهایی مرکز جرم آن ارتباط برقرار کند.

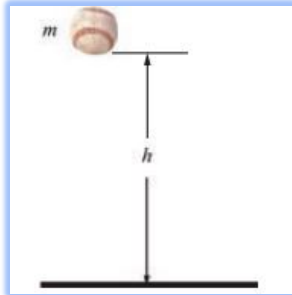
کیپورتس^۳ [19] هنگام بحث در مورد بالون هلیومی، شگفتی دانشجویان‌اش را از فهم این موضوع وصف می‌کند که وقتی بالون به سمت بالا می‌رود انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد. در بحث او واژه‌ی سیستم هرگز به کار نرفت و انرژی پتانسیل همیشه به صورت «انرژی پتانسیل بالون» توصیف شد. در واقع در معادله‌ی (۶) او، $U = (mg - \rho Vg)y$ قرار بود انرژی پتانسیل «از آن بالون» باشد که ترکیبی است از انرژی پتانسیل منسوب به نیروی گرانشی و انرژی پتانسیل منسوب به شناوری. با این حال این معادله دو سیستم را با هم قاطی می‌کند. انرژی پتانسیل منسوب به نیروی گرانشی متعلق به سیستم بالون و زمین است و انرژی پتانسیل منسوب به نیروی شناوری هم متعلق به سیستم بالون و هوا است. اگر بحث او سیستم را به صورت بالون، زمین و هوا تعریف می‌کرد معادله ممکن بود صحّت داشته باشد. برای این سیستم نیروی برآیند

^۱ اندیس C اشاره‌ای است به واژه‌ی conservative به معنی پایستار. م

^۲ Barrow

^۳ Keepports

بین بالون و ترکیب هوا-زمین نیرویی دافعه است. این سیستم را می‌توان به صورت سیستمی منزوی مدل‌سازی کرد که در آن، دو عضو یکدیگر را دفع می‌کنند. بنابراین کاهش در انرژی پتانسیل سیستم هنگام بالارفتن بالون شگفت‌انگیزتر از سیستم دو پروتون نیست که به دلیل نیروی دافعه‌ی بین‌شان همدیگر را می‌رانند. به جای ارائه‌ی این مثال به عنوان یک چیز شگفت‌انگیز، می‌ارزید این مبحث را طوری مدل‌سازی می‌کرد و ارائه می‌داد که معادل بودن دو سیستم متفاوت را نشان دهد (پروتون و پروتون، هوا-زمین و بالون) در این صورت هر دو سیستم مانند دو شیء دفع‌کننده‌ی یکدیگر تحلیل می‌شدند.^۱



شکل ۱- تویی به جرم m از ارتفاع h رها می‌شود. هنگام اصابت به زمین سرعتش چقدر است؟

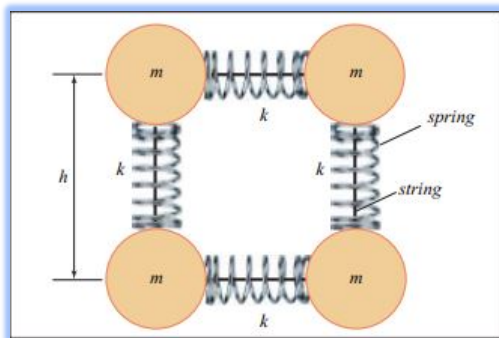
۲-۵ مسائل:

دو مسئله‌ی زیر را در نظر بگیرید:

۱- تویی به جرم m از ارتفاع h در بالای سطح زمین رها می‌شود (شکل ۱). از مقاومت هوا چشم‌پوشی می‌شود. این توپ با چه سرعتی به زمین برخورد خواهد کرد؟

۲- چهار گره‌ی کوچک جرم یکسان m را دارند. بین هر دو گره یک فنر فشرده شده قرار دارد که این چهار گره را به صورت مربعی به ضلع h درآورده است (شکل ۲). فنرها بی‌جرم و یکسان‌اند و ثابت نیروی k را دارند. آنها به گره‌ها

بسته نشده‌اند. طول آزاد هر فنر L است. گره‌ها با نخ سبکی که از بین محور فنرها می‌گذرد به یکدیگر بسته شده‌اند. کل این دستگاه در ناحیه‌ای بدون میدان گرانشی قرار دارد. هر چهار نخ همزمان بُریده شده و فنرها گره‌ها را به اطراف پراکنده می‌کنند. آنها با چه سرعتی از فنرها جدا می‌شوند؟



شکل ۲- چهار گره به جرم m با نخهایی به هم بسته شده و به شکل مربعی به ضلع h درآمده‌اند. بین هر جفت گره فنرهای فشرده شده‌ی یکسانی قرار دارند. وقتی نخ‌ها بُریده می‌شوند گره‌ها پراکنده می‌شوند. آنها با چه سرعتی از فنرها جدا می‌شوند؟

آیا این مسئله‌ها از بُنیاد متفاوت‌اند؟ دانشجویی که با رهیافت سیستم-محور آشنا نیست مُمكن است خودش را با تکنیک متداول ولی نامناسب « mgh را برابر با $\frac{1}{2}mv^2$ قرار دهد» خلاص کند. او با این کار مسئله‌ی نخست را حل می‌کند. اما سوال دوم با چندین

^۱ البته منظور از زمین در سیستم زمین و شیء، میدان نیروی ثابتی است که پایستار است و می‌توان به سیستم انرژی پتانسیل این نیرو را نسبت داد. در این شکل از نیرو، جرم زمین در سیستم حضور ندارد و تنها میدان گرانشی ثابت آن در سیستم حضور دارد که بر اعضای سیستم اثر می‌کند. این یک تقریب از میدان گرانشی زمین است که تنها در نزدیکی سطح زمین برقرار است. اگر اشیاء سیستم در مرتبه‌ی بزرگی جرم زمین باشند بایستی جرم زمین را هم در سیستم وارد نمود و شکل درست انرژی پتانسیل گرانشی سیستم چنین می‌شود:

$$U = - \sum_{i \neq j} \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}}$$

که در آن m ها جرم عضوهای سیستم و r فاصله‌ی بین آنهاست. در سیستم هوا و بالون هم چون هوا نیروی شناوری ثابتی بر بالون وارد می‌کند می‌تواند به عنوان نیروی پایستار مدل‌سازی شود و به این سیستم انرژی پتانسیل شناوری نسبت داد. در مورد نیروهای ناپایستار که بین اعضای سیستم اثر می‌کنند کار این نیروها به عنوان افزایش در انرژی درونی سیستم در نظر گرفته می‌شود همانطور که نویسنده در بخش ۱-۳ برای نیروی اصطکاک انجام داد (مُعادله‌ی (۳)). م

انرژی جنبشی و چندین انرژی پتانسیل درگیر است. راه حل آن نیازمند آشنایی با انرژی یک سیستم است نه به سادگی انرژی یک شیء.

دانشجویی که رهیافت سیستم-محور را آموخته است همان گام‌های اولیه را برای هر دو سیستم خواهد برداشت. برای مسئله ۱ زمین و توپ را به عنوان سیستم شناسایی می‌کنیم. این یک سیستم منزوی است که هیچ نیروی ناپایستاری بر آن اثر نمی‌کند. پس ما می‌توانیم معادله پایستگی انرژی مکانیکی را برای آن بنویسیم:

$$\Delta K + \Delta U_g = 0 \quad (5)$$

که در آن U_g به انرژی پتانسیل گرانشی اشاره دارد.

در مسئله ۲ سیستم را چهار گره و چهار فنر شناسایی می‌کنیم. این هم یک سیستم منزوی است که بر آن نیروهای ناپایستار اثر نمی‌کنند. پس ما می‌توانیم معادله پایستگی انرژی مکانیکی را برای آن بنویسیم:

$$\Delta K + \Delta U_s = 0 \quad (6)$$

که در آن U_s به انرژی پتانسیل فنر (کشسانی) اشاره دارد.

این رهیافت برای هر دو مسئله یکسان است فقط برآورد انرژی‌ها فرق می‌کند. این مسائل به طور کامل در فصل چهارم حل خواهند شد.

با توجه به بحثی که کردیم پرسش درست-نادرست زیر را در نظر بگیرید. این پرسش در ارتباط با بحث قبلی، حرکت بلوک بر روی سطح است:

درست یا نادرست؟ جسمی در امتداد سطح میز با سرعت ثابت کشیده می‌شود. نیروی وارد بر آن موازی با سطح میز است. چون جسم در تعادل است پس بزرگی نیروی اصطکاک با بزرگی نیروی وارده برابر است. پس کار انجام شده توسط نیروی اصطکاک با بزرگی کار انجام شده توسط نیروی وارده برابر خواهد بود و در نتیجه کار کل انجام شده توسط همه‌ی نیروها صفر است.

این استدلال خیلی از دانشجویان را می‌فریبد ولی همانگونه که **شروود و برنارد^۱** و **چی** هم گفته‌اند [13] [17]، نادرست است. می‌توان از دو دیدگاه برای اش دلیل آورد. نخستین دیدگاه به تعریف کار برمی‌گردد که در فصل اول در موردش صحبت شد. گرچه نیروی وارده و نیروی اصطکاک هر دو بزرگی یکسانی دارند ولی جابجایی نیروی وارده با جابجایی‌های بسیار نقاط اتصال نیروی اصطکاک یکی نیست. از این رو کار انجام شده توسط دو نیرو با هم برابر نیست و همدیگر را حذف نمی‌کنند.

دومین دیدگاه به سیستم دقیقی بر می‌گردد که بتواند انرژی را تحلیل کند. بگذارید شیء را به عنوان سیستم شناسایی کنیم. اگر ادعا کنیم که کار نیروی کل بر روی شیء صفر است آنگاه هیچ انتقال انرژی‌ای به سیستم صورت نمی‌گیرد و انرژی سیستم باید ثابت باقی بماند. انرژی جنبشی هم مطابق با صورت سوال ثابت باقی می‌ماند زیرا سرعت شیء ثابت است. ولی از تجربیات متداول می‌دانیم که کشیدن شیء بر روی سطح آن را گرم‌تر می‌کند. در حقیقت انرژی درونی‌اش افزایش می‌یابد. اگر کار انجام شده بر روی سیستم صفر باشد آنگاه هیچ منبعی برای افزایش انرژی درونی‌اش وجود نخواهد داشت.

^۱ Bernard

۲-۶ نتیجه گیری:

ما چندین مورد را ارائه دادیم که در آن برای حل مسائل انرژی، شناسایی سیستم مهم بود. شکست در انجام این کار می تواند موجب خطا و بدفهمی گردد. به عنوان معلم فیزیک وظیفه داریم دانشجویانمان را متقاعد کنیم که هنگام استفاده از رهیافت انرژی برای حل مسائل، شناسایی و طبقه بندی کردن سیستم ها مهم است. در فصل بعدی ما از سردرگمی ای صحبت خواهیم کرد که از کاربرد بی دقت از زبان در مباحث انرژی ایجاد می شود.

۳- زبان

انرژی مفهومی حیاتی در حل مسائل فیزیک است اما اگر آموزگار یا کتاب درسی آن را دقیق ارائه ندهد منبع اصلی سردرگمی برای دانشجویان خواهد شد. این سردرگمی می‌تواند ناشی از کاربرد بی‌دقت از زبان در مباحث انرژی باشد. دانشجویان هشیارانه یا ناهشیارانه از بیان آموزگاران‌شان تقلید می‌کنند. پس می‌توانند خودشان یا دیگران را با بکارگیری نادرست این کلمات گیج کنند. ما در این فصل نگاهی به برخی از نمونه‌های متداول می‌اندازیم.

۳-۱ کار انجام شده بر روی ... توسط ... :

ما باید از عبارات ناکاملی چون «کار در طول این فرآیند انجام شده است» پرهیز کنیم یا حتا عبارت معتبرتر آن «کار در طول این فرآیند توسط نیروی گرانش انجام شده است» هنوز ناکامل است زیرا دریافت‌کننده‌ی کار مشخص نشده است. بهتر است نیروی انجام‌دهنده‌ی کار و سیستم دریافت‌کننده‌ی کار را مشخص کنیم. برای مثال این عبارات را در نظر بگیرید: «کار توسط نیروی گرانش بر روی توپ انجام شده است» یا «کار توسط نیروی الکتریکی بر روی الکترون انجام شده است» و «کار توسط نیروی وارده از پیستون بر روی گاز انجام شده است». این عبارات به روشنی هم معنای کار انجام شده توسط یک نیرو بر روی یک سیستم را می‌رسانند و هم این مفهوم را زمینه‌سازی می‌کنند که کار بیانگر انرژی منتقل شده بین سیستم و محیط‌اش می‌باشد.

مشابه این عبارت‌پردازی برای نیروها هم هست و به همان اندازه هم مشخص کردن‌اش مهم می‌باشد. جمله‌ی «چکش نیرو وارد آورد» ناکامل است. مهم است مشخص کنیم چه چیزی نیرو وارد می‌آورد و نیرو بر چه چیزی وارد می‌آید: «نیروی چکش بر روی میخ»، «نیروی که سطح به پا وارد می‌کند» و مانند آن.

برای به‌کارگیری کامل‌ترین زبان ممکن در بحث فوق، باید موجود دیگری هم به جمله‌سازی انرژی افزود: منبع انرژی. وقتی محیط بر روی سیستم کار انجام می‌دهد سیستم همان قدر انرژی به دست می‌آورد که محیط از دست می‌دهد. بنابراین عبارت «کار توسط فنر بر روی بلوک انجام شده است» همان قدر کامل است که عبارت «انرژی توسط کاری که فنر بر روی بلوک انجام داده، از فنر به سیستم بلوک انتقال یافته است». در اکثر موارد منبع انرژی نزد دانشجو حاضر و آماده است مثل مورد فنر و بلوک. مثال دیگر وقتی که دانشجویی کاری سبزی‌فروشی را هل می‌دهد انرژی جنبشی کاری از انرژی پتانسیل‌ای تامین می‌شود که دانشجو با خوردن غذا در بدن‌اش ذخیره کرده است. در برخی موارد منبع انرژی برای دانشجو واضح نیست. برای مثال اگر توپی را که در نزدیکی سطح زمین سقوط می‌کند به عنوان سیستم در نظر بگیریم محیط آن که سبب افزایش انرژی جنبشی توپ می‌شود چه می‌باشد؟ زمین نمی‌تواند پاسخ این پرسش باشد. در حقیقت انرژی جنبشی زمین هم افزایش می‌یابد گرچه مقدارش ناچیز است. ما به محیطی نیازمندیم که انرژی‌اش **کاهش** بیابد. در چنین موردی پاسخ، انرژی میدان گرانشی است که کاهش می‌یابد. با اینکه از انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در الکترومغناطیس بحث می‌شود اما اغلب از انرژی میدان‌های گرانشی بحث نمی‌شود.

۳-۲ انرژی پتانسیل:

در مبحث انرژی پتانسیل یک کار گمراه‌کننده‌ی متداول استفاده از عباراتی چون «انرژی پتانسیل توپ» است که در آن

انرژی پتانسیل به یک شیء نسبت داده می‌شود، به جای اینکه به سیستمی از دو یا چند شیء نسبت داده شود که با همدیگر برهم‌کنش دارند. این از نظر مفهومی گمراه‌کننده است و اهمیت سیستم را نادیده می‌گیرد که پیش‌تر در فصل دوم در موردش بحث شد. خیلی مهم است که تاکید شود انرژی پتانسیل خاصیتی از سیستم است نه شیء و با نیرویی ارتباط دارد که بین اعضای سیستم اثر می‌کند. پس نمی‌تواند به یک عضو تنها نسبت داده شود. یک شیء به تنهایی نمی‌تواند دارای انرژی پتانسیل باشد.^۱ بنابراین عبارت بهتر برای انرژی پتانسیل گرانشی «انرژی پتانسیل سیستم توپ-زمین» است.

عبارت گمراه‌کننده‌ی متداول بعدی گفتن این است که انرژی پتانسیل به مکان اشیایی وابسته است که در داخل سیستم برهم‌کنش می‌کنند. این ادعایی است که در مسائل ساده‌ی مکانیک مشکل‌حادثی تولید نمی‌کند ولی زمانی که دانشجو نظریه‌ی الکترومغناطیس را مطالعه کند نیاز به بازبینی دارد. تصور کنید که یک دوقطبی الکتریکی در یک میدان الکتریکی و یا یک دوقطبی مغناطیسی در یک میدان مغناطیسی قرار گرفته است. هر کدام از آنها بدون اینکه تغییر مکان دهند می‌توانند بچرخند. با اینکه مرکز مکان دوقطبی چرخان بی‌تغییر مانده، انرژی پتانسیل سیستم دوقطبی-میدان تغییر می‌کند. این تغییر به دلیل تغییر در جهت دوقطبی است نه تغییر در مکان آن. در نتیجه اگر بگوییم انرژی پتانسیل به پیکربندی اشیایی منسوب است که در یک سیستم در حال برهم‌کنش‌اند جای پایمان را در برنامه‌های آتی مکانیک محکم کرده‌ایم. این گزاره تغییرات را در هر دو شکل مکان و جهت مجاز می‌دارد.

در ارتباط با این مشکل عبارت متداول دیگر در مکانیک این است که «انرژی پتانسیل در پایین پیچ جاده صفر است». این گزاره پیشنهاد می‌دهد که به انرژی پتانسیل به چشم یک میدان نگاه کنیم که در هر نقطه از فضا مقداری یکتا دارد. مناسب‌تر این است که بگوییم «انرژی پتانسیل برای پیکربندی‌ای از سیستم صفر می‌شود که در آن ماشین در پایین پیچ جاده قرار دارد».

۳-۳ گرما:

وقتی سری به ترمودینامیک می‌زنیم درمی‌یابیم که در فیزیک بیشترین کاربرد نادرست از زبان متعلق به واژه‌ی گرما است. مهم است تاکید شود فیزیکدانان زمانی این واژه را به کار می‌گیرند که: ۱- منظورشان فرآیندی باشد که در آن انرژی منتقل می‌شود و ۲- مقدار انرژی منتقل شده توسط این فرآیند باشد که معمولاً با Q نمایش داده می‌شود. گرما موجودی نیست که منتقل شود (گرما انتقال نمی‌یابد، انرژی است که انتقال می‌یابد) و حتی بدتر گرما محتوای یک سیستم با یک دمای معین نیست (این محتوا به درستی با انرژی درونی توصیف می‌شود). رومر^۲ ادعا می‌کند [20] که واژه‌ی گرما نباید به صورت اسم به کار رود. ولی من با اینکه کاملاً با روح واژه‌ی گرما موافق‌ام با این فکر مخالف‌ام که گرما اسم نباشد. گرما در حقیقت یک اسم است ولی اسم یک فرآیند است نه اسم چیزی که انتقال می‌یابد. باومن^۳ هم از کاربرد واژه‌ی گرما سخن گفته و آن را به شکل دما و انرژی درونی تفسیر می‌کند [21].

برخی عبارات را در زبان عامیانه در نظر بگیرید: «انتقال گرما»، «جریان یافتن گرما» و «گرما به بیرون تابش می‌کند». این

^۱ این عبارت با فرض نادیده گرفتن ساختار درونی شیء ساخته شد. اشیاءای که ساختار درونی دارند می‌توانند دارای انرژی پتانسیل باشند. برای مثال یک فنر می‌تواند دارای انرژی پتانسیل کشسانی و یا یک قوطی بنزین می‌تواند دارای انرژی پتانسیل شیمیایی باشد. این انواع انرژی به نیروهای منسوب‌اند که بین اجزای ساختار شیء وجود دارند ولی به نیروهای بین این شیء و اشیاء دیگر منسوب نیستند.

^۲ Romer

^۳ Bauman

عبارات به انتقال انرژی اشاره می‌کنند ولی در همان زمان کاربردِ نادرستِ واژه‌ی **گرما** را به نمایش می‌گذارند. عبارات را می‌توان با جایگزین کردن «انتقال انرژی» به جای «گرما» آزمود. هر کدام از آنها پس از این جایگذاری معنایی مسخره و زشت خواهند یافت. به عنوان مثال «انتقال گرما» تبدیل به «انتقال انتقال انرژی» می‌شود. در عبارات متداول دیگر شامل «گرمای روز» و «گرمای خیلی زیاد هوا» در حقیقت گرما به جای دما به کار می‌رود. جمله‌ی متداول دیگر این است: «گرما برمی‌خیزد». در این مورد گرما به معنای هوای گرم به کار رفته است!

بارو، فکری افراطی را پیشنهاد می‌دهد [18]: کلمات **کار** و **گرما** باید «از صحنه‌ی ترمودینامیک حذف شوند». او تأکید می‌کند که ترمودینامیک باید بر انرژی متمرکز شود نه بر کار و گرما. من نیز از صمیم قلب موافق‌ام که ترمودینامیک باید بر انرژی متمرکز شود. در حقیقت **تمام** شاخه‌های فیزیک باید بر انرژی، همچون موجودی که منتقل می‌شود متمرکز شود. از طرفی با این ایده مخالف‌ام که باید از شرّ واژگانی چون **کار** و **گرما** خلاص شد. من فکر می‌کنم که دانشجویان به وضوح تفاوتی می‌بینند بین: ۱- وارد شدن یک نیرو بر روی یک سیستم و ۲- قرار گرفتن یک سیستم سرد در یک محیط گرم؛ و ما به واژگانی نیاز داریم که بین این دو وضعیت متفاوت فرق بگذارند.

ممکن نیست کُلّ جامعه را واداریم که واژه‌ی **گرما** را درست به کار ببرند ولی می‌توانیم کاری کنیم که بخشی از آن، یعنی دانشجویان مان این واژه را درست به کار ببرند. برای حالتی که در آن انرژی بین یک سیستم با یک دما؛ و محیط‌اش با دمای دیگر منتقل می‌شود فرآیندی که رخ می‌دهد «انتقال انرژی توسط گرما» است. من با عبارات دیگری مانند «انتقال انرژی به شکل گرما» مخالف‌ام زیرا به این معنی است که گرما شکلی از ذخیره کردن انرژی است نه شیوه‌ای از انتقال انرژی.

۳-۴ تبدیل و انتقال انرژی:

با پیروی از اهمیت وجود سیستم در فصل دوم اکنون به اهمیت تمایز بین انتقال انرژی و تبدیل انرژی می‌پردازیم. یک کتاب درسی محبوب گفته است: ۱- انرژی از انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل **انتقال** یافته است. این عبارت نمونه‌ای است که دانشجویان را گیج می‌کند، مخصوصاً وقتی که آن را با عبارت قبلی آن کتاب مقایسه می‌کنند که: ۲- انرژی می‌تواند از نوعی به نوع دیگر **تبدیل** و از شیء‌ای به شیء دیگر **منتقل** شود. عبارت ۲ صحیح ولی ناکامل است (چون به جای سیستم بر شیء تأکید شده است). اما عبارت ۱ نادرست است.

باید برای دانشجویان روشن کرد که **تبدیل انرژی در درون سیستم رخ می‌دهد** و نتیجه‌اش تغییر شکلی از انرژی به شکل دیگر است. به عنوان مثال در سیستم توپ-زمین وقتی توپ به بالا پرتاب می‌شود، انرژی جنبشی سیستم به انرژی پتانسیل گرانشی سیستم تبدیل می‌شود. در این وضعیت معمول، انرژی جنبشی سیستم تنها به یک شیء متحرک منسوب است (در چارچوب مرجع متصل به زمین). ولی در مجموع انرژی کُلّ سیستم است که تبدیل می‌شود. انرژی پتانسیل شیمیایی دینامیت هنگام انفجار به انرژی داخلی و انرژی جنبشی تکه‌های خردشده تبدیل می‌شود. وقتی بلوکی در امتداد کف اتاق می‌لغزد و می‌ایستد، انرژی جنبشی سیستم بلوک-کف اتاق به انرژی درونی بلوک و کف اتاق تبدیل می‌گردد. اگر سیستم منزوی باشد فقط تبدیل انرژی می‌تواند رخ دهد و انرژی کُلّ سیستم ثابت باقی می‌ماند.

در عوض، **انتقال** انرژی تنها **از میان** مرز سیستم صورت می‌گیرد و نتیجه‌اش تغییر در انرژی کُلّ سیستم است. مکانیزم

انتقال انرژی به شکل کار، گرما، تابش الکترومغناطیسی و چیزهای دیگر است که در فصل چهارم از آنها گفتگو خواهد شد. استفاده بی‌دقت از زبان به شکل‌های دیگری نیز ظاهر می‌شود مانند عباراتی چون «انرژی به صورت الکتریسیته وارد لامپ برق شده و به نور و گرما تبدیل می‌شود». این عبارت سه ضعف در وضوح زبانی دارد. نخست، انرژی به صورت الکتریسیته وارد وسیله الکتریکی نمی‌شود. عبارت فوق الکتریسیته را شکلی از انرژی پیشنهاد می‌دهد. همینطور دومین و سومین ضعف عبارت این است که انرژی به نور و گرما «تبدیل می‌شود». اینها نیز نور و گرما را شکلی از انرژی پیشنهاد می‌دهند که «تبدیل می‌شوند» درحالی که آنها مکانیزمی برای انتقال انرژی‌اند. عبارت درست‌تر و پُرتران‌تر این است: «انرژی توسط انتقال برق به سیستم لامپ برق وارد شده و توسط تابش و گرما از سیستم به بیرون انتقال می‌یابد». توجه کنید تغییر واژگان از «مثل، به صورت» به «توسط» گام مهمی در شناسایی الکتریسیته، نور و گرما به عنوان مکانیزم انتقال است تا اینکه آنها را شکلی از ذخیره‌سازی انرژی معرفی کنیم.

۳-۵ اتلاف و از دست دادن انرژی:

مطالعه مدارهای الکتریکی مثالی از انتخاب یک واژه‌ی محبوب اما بدشگون است: «انرژی در مقاومت تلف شده است». معلم فیزیک از این واژه چنین می‌فهمد که مقاومت گرم شده و انرژی توسط گرما و تابش به محیط انتقال می‌یابد ولی دانشجویان ممکن است این واژه را جور دیگری تفسیر کنند: انرژی ناپدید می‌شود. در لغتنامه یکی از تعاریف واژه‌ی **تلف کردن** این است: «پخش کردن تا جایی که محو شود». دانشجو این تصور را به کار برده و با این ایده بار می‌آید که انرژی به طریقی محو و نابود می‌شود.

بهتر است بگوییم انرژی به مقاومت **تحویل داده می‌شود**. این بیان این تصور را تقویت می‌کند که انرژی به یک سیستم انتقال می‌یابد. این انتقال، انرژی داخلی مقاومت را افزایش می‌دهد بعد نوبت به انتقال انرژی توسط گرما و تابش الکترومغناطیسی می‌رسد که از مقاومت گرم به محیط خنک‌تر صورت می‌گیرد.

واژه‌ی مشابه‌ای که در کتابهای درسی ظاهر می‌شود «از دست دادن» انرژی است که قلمرو خطرناکی برای گیج کردن دانشجو است به ویژه آنکه انرژی، پیشتر در همین کتابهای درسی به شکل درستی معرفی شده بود با بیان اینکه انرژی نه خلق شده و نه از بین می‌رود. اگر انرژی نتواند خلق شود یا نابود گردد چگونه می‌تواند «از دست برود؟». خیلی بهتر است که با تعاریفمان سازگار شده و از انتقال انرژی صحبت کنیم و از واژه‌های چون «از دست دادن» پرهیز کنیم.

۳-۶ شرطهای اعتبار:

مورد مهم دیگری که به زبان مربوط است و مثل خیلی از عناوین دیگر فیزیک در بحث انرژی هم پیش می‌آید شرطهایی هست که برای درستی اصول فیزیک **همراه آنها** داده می‌شود. برای مثال در مکانیک گفتن این جمله بی‌معنی است: «شیء‌ای که حرکت می‌کند در حالت حرکت خود باقی می‌ماند» بدون اینکه این شرط را اضافه کنیم که: «برای موردی که در آن هیچ نیرویی به شیء وارد نیاید». جمله‌ی مبهم دیگری که در برخی از کتابهای درسی هنگام حل یک مسئله گفته می‌شود این است: «انرژی پایسته است» بدون اینکه به سیستمی اشاره شود که راجع به آن بحث می‌شود. این درست است که انرژی در مقیاس جهانی پایسته است اما این بیان به ازای هر شرطی معتبر است و در حل مسئله به کار نمی‌آید. در یک مسئله‌ی خاص خیلی مهم است که شرطهای خاص سیستم را در آن مسئله شناسایی کنیم. آیا سیستم منزوی است یا غیر منزوی؟ از این رو به جای گفتن «انرژی پایسته است» خیلی ارزشمندتر است که بگوییم «انرژی سیستم منزوی

ثابت باقی می ماند» یا «سیستم، غیر منزوی است پس ما می توانیم یک یا چند انتقال انرژی را شناسایی کنیم، پس انرژی سیستم ثابت باقی نمی ماند».

واژه‌ی **کلی** هم اغلب به طرز نامناسبی در کتابهای درسی به کار می رود. برای مثال یک کتاب درسی ادعا می کند که شکل کلی قانون پایستگی انرژی برای یک سیستم عبارت است از:

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{int} = 0 \quad (1)$$

این عبارت شکل کلی پایستگی انرژی نیست بلکه حالتی خاص است که فقط برای سیستمی منزوی درست می باشد. معادله‌ی واقعاً کلی از پایستگی انرژی در فصل چهارم گفته می شود که نه تنها شامل ذخیره سازی انرژی در داخل سیستم است بلکه شامل مکانیزم انتقال انرژی از مرزهای سیستم هم می شود.

به عنوان حرف آخر بر شرطهای اعتبار، معادله‌ی $W = \Delta K$ را در نظر بگیرید. این معادله اغلب به عنوان **قضیه‌ی کار-انرژی** نام برده می شود و خیلی از دانشجویانی که درس مکانیک را می گذرانند فکر می کنند که این معادله‌ای بنیادی است. مهم است برای دانشجویان تاکید شود که این معادله برای حالتی خاص است و همانطور که در فصل چهارم خواهیم گفت فقط می تواند تحت شرایط محدودی دنبال شود: ۱- کار تنها مکانیزم انتقال باشد که از راه آن انرژی وارد سیستم می شود و ۲- انرژی جنبشی سیستم تنها شکلی از انرژی در سیستم باشد که تغییر می کند. من از عبارت **قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی** برای تاکید بر ارتباط بین کار و انرژی جنبشی - نه انرژی به طور کل - بهره خواهیم گرفت.

۳-۷ جرم به انرژی تبدیل می شود:

در نسبت عبارت رایجی در کتابهای درسی و درسگفتارها دیده می شود که چیزی شبیه به این است: «در این فرآیند جرم به انرژی تبدیل می شود». این شکل از عبارت برای دانشجویان گمراه کننده است زیرا می گوید یک شکل از ماهیت می تواند به چیزی کاملاً متفاوت تبدیل شود. ماهیتی که به کیلوگرم اندازه گیری می شود نمی تواند به سادگی به چیزی تبدیل شود که به ژول اندازه گیری می شود.

رهیافت بهتر برای بحث در این مورد این است که دقیقاً بگوییم **انرژی سکون** به شکل‌های دیگر انرژی تبدیل می شود. برای مثال در واپاشی هسته‌ای، انرژی سکون سیستم کاهش می یابد زیرا قسمتی از آن به انرژی جنبشی ذرات خارج شده تبدیل می گردد. این درست است که جرم سیستم هم کاهش می یابد اما کاهش جرم با کاهش انرژی متناسب است ولی با آن مساوی نیست. **بایرلین**^۱ به طور مفصل به مشکل تبدیل جرم به انرژی می پردازد [22].

۳-۸ پرسش‌ها:

در پرتو مباحث گفته شده پرسش‌های درست-نادرست زیر را در نظر بگیرید:

- ۱- **درست یا نادرست؟** یک شیء ۱۰ کیلوگرمی تا ارتفاع یک متر از سطح یک میز بالا برده می شود. نسبت به سطح میز، انرژی پتانسیل شیء برابر با ۹۸ ژول است.
- ۲- **درست یا نادرست؟** کار انجام شده بر روی یک شیء برابر است با تغییر انرژی جنبشی آن.

گزاره‌ی ۱ نادرست است زیرا انرژی پتانسیل نادرست شناسایی شده است. انرژی پتانسیل باید در سیستمی شناسایی شود که اشیاء در آن با همدیگر برهم‌کنش می‌کنند. در این پرسش، سیستم شیء و زمین است. پس بهتر است گفته شود «نسبت به پیکربندی انرژی صفر که در آن شیء بر روی میز است وقتی شیء در ارتفاع بالاتری از سطح میز قرار بگیرد انرژی پتانسیل گرانشی سیستم برابر با ۹۸ ژول می‌شود». با اینکه این عبارت کلمات بیشتری نسبت به صورت پرسش ۱ دارد ولی با این شیوه فیزیک را مناسبتر و درست‌تر به دانشجویانمان ارائه می‌دهیم.

عبارت گفته‌شده در پرسش ۲ (قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی) ممکن است در حالت خاصی درست باشد ولی به طور کلی درست نیست. این نوع عبارات مطلق که هیچ شرطی به دنبال‌شان نمی‌آید باید از گفتارها حذف شوند زیرا به دانشجویان این را می‌باوراند که در این مورد قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی یک اصل بنیادی است. این عبارت زمانی درست است که نیرویی افقی به شیء‌ای وارد شود که بر سطحی بدون اصطکاک قرار دارد. اما وقتی سطح دارای اصطکاک باشد این عبارت نادرست است و یا حتا در هر حالتی که در آن کاری بر روی سیستم انجام می‌گیرد نتیجه‌اش تغییر سرعت نباشد، مثل بلند کردن کتاب از قفسه‌ی پایینتر و گذاشتن آن در قفسه‌ی بالاتر.

۳-۹ نتیجه‌گیری:

موارد زیادی هست که ما می‌توانیم با کاربرد نادرست از زبان موجب بدفهمی دانشجویانمان شویم. کاربرد دقیق و درست از جمله‌ها، واژه‌ها و تعریفها می‌تواند درک مفهومی و توانایی حل مسئله را در دانشجویانمان افزایش دهد. در فصل بعدی ما از رهیافت کلی انرژی صحبت خواهیم نمود که می‌توان در حل همه‌ی مسائل انرژی به آن استناد کرد.

۴- رهیافتِ کُلیِ انرژی

در سه فصلِ نخست، ما راجع به چند مشکل صحبت کردیم که مربوط به آموزشِ مفهومِ انرژی می‌شد و برای این فصل تنها یک مشکل را کنار گذاشته‌ایم: ارائه‌ی انرژی با یک رهیافتِ کُلی. انرژی، انتقالِ انرژی و تبدیلاتِ انرژی همگی در قلبِ هر فرآیندی هستند که در فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی، نجوم و زمین‌شناسی رخ می‌دهد. در نتیجه مفید و آموزنده خواهد بود که از آغازِ کار از طبیعتِ عامِ انرژی سخن برانیم، یعنی زمانی که نخستین بار در مکانیک معرفی می‌گردد.

۴-۱ رهیافتِ سنتیِ نوعی:

متأسفانه اغلبِ کلاسها و کتابهایِ درسی انرژی را با شیوه‌های نامربوط به هم ارائه می‌دهند به گونه‌ای که دانشجویان ممکن است باور کنند چندین مُعادله‌ی بُنیادیِ انرژی وجود دارد. با اینکه چند مُعادله‌ی انرژی وجود دارد باز هم دانشجویان فکر می‌کنند که نمی‌توانند یک مُعادله‌ی ساده‌ی انرژی را بنویسند، مُعادله‌ای که سیستم‌هایی را بتواند توصیف کند که هر روز با آنها درگیرند مثل سیستمِ پخشِ صوت، ماشینِ چمن‌زنی یا یک لامپِ برق. با رهیافتی که در این فصل صحبت می‌شود دانشجویان **یک** مُعادله‌ی بُنیادیِ انرژی خواهند داشت و می‌توانند مُعادلاتِ انرژی مناسب را برای این سیستم‌های ساده مثل خیلی از مواردِ دیگر بنویسند.

رهیافتِ سنتیِ نوعی وقتی از حرکتِ اشیاء بحث می‌کند قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی را معرفی می‌کند. اما وقتی صحبت از اصطکاک می‌شود همه چیز به سرعت پیچیده می‌شود. همانطور که در فصلِ اول بحث کردیم ما نمی‌توانیم کارِ انجام‌شده توسطِ اصطکاک را حساب کنیم زیرا جابجاییِ شیء همان جابجاییِ نقاطِ موثرِ بی‌شمارِ اصطکاک نیست. پس قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی به دردمان نمی‌خورد. اشیاء چرخان و تغییرِ شکل‌پذیر اغلب در کلاسها و کتابهایِ درسی گفته نمی‌شوند زیرا با رهیافتِ سنتی از کار و قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی نمی‌توان پیچیدگیهای آنها را راهبری کرد.

وقتی از انرژی پتانسیل صحبت می‌شود مُعادله‌ی پایستگیِ انرژیِ مکانیکی نیز معرفی می‌شود. زیرا همانگونه که در فصلِ دوم گفته شد در رهیافتِ سنتی اغلب بر وجودِ سیستمها تاکید نمی‌گردد. دانشجویان بر این باورند که مُعادله‌ی پایستگیِ انرژیِ مکانیکی چیزی جدا از قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی است، مُعادله‌ای دیگر که درگیرِ انرژی بوده ولی به نظر می‌رسد که ایده‌ای جداگانه است.

سرانجام وقتی از ترمودینامیک صحبت می‌شود انرژیِ درونی و گرما معرفی می‌شوند. در این هنگام سومین مُعادله‌ی انرژی نیز معرفی می‌شود که ظاهراً با قبلی‌ها فرق می‌کند: قانونِ اولِ ترمودینامیک. این مُعادله‌ی جداافتده، از بقایایِ رُشدِ تاریخیِ ترمودینامیک است که زمانی جدا از مکانیک مطالعه می‌شد. اما دیری ست که قلمروهایِ فیزیک با هم یگانه گشته‌اند. اکنون وقتِ آن رسیده که ما یک رهیافتِ کُلی و یگانه را در کلاسِ درس آموزش دهیم!

۴-۲ رهیافتِ کُلی:

حرف من در این مقاله این است که تنها **یک** مُعادله‌ی بُنیادیِ انرژی وجود دارد و بقیه حالتِ خاصی از آن هستند. مُعادله‌ی

بُنیادی، مُعادله‌ی پایستگی انرژی^۱ یا مُعادله‌ی پیوستگی انرژی^۲ نام دارد که می‌توان آن را به اختصار (CEE) نوشت [15]:

$$\Delta E_{system} = \sum T \quad (1)$$

که در آن T ^۳ مقدار انرژی‌ای است که از مرز سیستم با مکانیزم خاصی منتقل می‌شود. پایه‌ی مفهومی این مُعادله چنین است: تنها راهی که بتوان انرژی کُلّ یک سیستم را تغییر داد این است که با یک یا چند مکانیزم - که T و صفشان می‌کند - انرژی را از مرز سیستم عبور داد. پایه‌ی ریاضیاتی آن نیز چنین است: تغییر کُلّی در انرژی سیستم در طول چند بازه‌ی زمانی دقیقاً برابر است با مقدار کُلّ انرژی‌ای که در آن بازه‌ها از مرز سیستم عبور کرده است. علامت جمع‌زنی دلالت بر آن دارد که انرژی مُمكن است با چندین روش از مرز عبور کند. آموخته‌ها این موضوع را با حساب بانکی دانشجویان مقایسه کنیم - اگر هیچگونه انتقال پولی به داخل سیستم بانکی یا به خارج از آن صورت نگیرد آنگاه موجودی حساب تغییر نخواهد کرد. وقتی انتقال پول به شکل واریز، برداشت، پاداش، بهره و یا چک انجام می‌گیرد موجودی دقیقاً به اندازه‌ی پول انتقال یافته در این فرآیندها تغییر می‌یابد.

وقتی می‌خواهم فیزیک کلاسیک را درس بدهم از شکل بسط یافته‌ی مُعادله‌ی (۱) به صورت زیر استفاده می‌کنم^۴:

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{int} = W + Q + T_{MT} + T_{MW} + T_{ER} + T_{ET} \quad (2)$$

سمت چپ مُعادله، سه راه ذخیره‌سازی انرژی را در سیستم نشان می‌دهد: انرژی جنبشی K ، انرژی پتانسیل U و انرژی درونی^۵ E_{int} . تغییر در انرژی کُلّ ذخیره‌شده در سیستم به صورت مجموع تغییرات جداگانه‌ی این سه نوع انرژی دریافت می‌شود.

انرژی جنبشی K در سمت چپ CEE - مُعادله‌ی (۲) - مجموع انرژی جنبشی انتقالی مرکز جرم سیستم و انرژی جنبشی دَوَرانی حول مرکز جرم سیستم و هرگونه انرژی جنبشی مربوط با حرکت شُعاعی اعضای سیستم نسبت به مرکز جرم است^۶. انرژی پتانسیل U همه‌ی انواع را دربر می‌گیرد مثل گرانشی، الکتریکی و کشسانی. علاوه بر آن من در اینجا دو نوع دیگر را هم وارد کرده‌ام: انرژی پتانسیل شیمیایی سوخت یا مواد منفجره و انرژی پتانسیل زیستی که از خوردن غذا به دست می‌آید. انرژی درونی E_{int} شامل انرژی مربوط به حرکت تصادفی مولکول‌ها - که با دما اندازه‌گیری می‌شود - و انرژی

^۱ Conservation of Energy Equation

^۲ Continuity Equation for Energy

^۳ T کوتاه‌نوشت Transfer است به معنی انتقال

^۴ در برخی از طرح‌های آموزشی مکانیک، نسبت را به همراه مکانیک کلاسیک عرضه می‌کنند که شامل مبحث جرم سکون هم می‌شود. در این حالت جمله‌ی تغییر جرم سکون را باید به سمت چپ مُعادله‌ی (۲) افزود.

^۵ یک عامل پیچیده در رهیافت کُلّی انرژی این است که در برخی ارائه‌های سنتی نماد U هم بیانگر انرژی پتانسیل در مکانیک است و هم بیانگر انرژی درونی در مباحث اخیر ترمودینامیک. چون در رهیافت کُلّی این دو نوع انرژی ذخیره‌شده با هم مطالعه می‌شوند پس نمادشان باید از همدیگر متمایز باشد. از این رو نماد U برای انرژی پتانسیل است و E_{int} برای انرژی درونی.

^۶ همانطور که در مکانیک اثبات می‌کنند انرژی جنبشی سیستم برابر است با مجموع انرژی جنبشی انتقالی مرکز جرم سیستم و انرژی جنبشی اعضای سیستم نسبت به مرکز جرم آن. اگر سیستم جسم صلب باشد آنگاه مقدار اخیر برابر با انرژی جنبشی دَوَرانی جسم صلب نسبت به مرکز جرم جسم خواهد شد. م

پیوندی بین مولکول‌ها که مربوط به فاز سیستم (جامد، مایع، گاز) است می‌شود.

سمت راست GEE مقدار کل انرژی‌ای است که از مرز سیستم عبور می‌کند که به صورت شش فرآیند متداول ذکر می‌شود:

W: کار انجام شده بر روی سیستم توسط نیروهای خارجی که در آن نقطه اثر نیرو با جابجایی حرکت می‌کند.

Q: انرژی انتقال یافته از مرز سیستم توسط گرما که علتش تفاوت دما بین سیستم و محیط‌اش می‌باشد.

T_{MT}: انرژی انتقال یافته از مرز سیستم توسط انتقال جرم مثل انتقال سوخت به یک تانکر.

T_{MW}: انرژی انتقال یافته از مرز سیستم توسط امواج مکانیکی مانند امواج صوتی یا زلزله‌ای.

T_{ER}: انرژی انتقال یافته از مرز سیستم توسط تابش الکترومغناطیسی مثل نور یا مایکروویو.

T_{ET}: انرژی انتقال یافته از مرز سیستم توسط انتقال برق از یک باتری یا دیگر منابع الکتریکی.

آموزنده است هنگام معرفی انرژی در بار نخست، وقت را صرف بحث در این معادله و جملات جداگانه‌اش کنیم. دانشجویان به قدر کافی با این شش نوع انتقال انرژی آشنا هستند و می‌توانند به سرعت طبیعت انتقال انرژی و معنای معادله را درک کنند. به تجربه می‌دانم که در ابتدای ترم، بسیاری از دانشجویان از شکل کامل معادله‌ی (۲) شروع کرده و برای مسئله‌ای که به آنها داده می‌شود جمله‌هایی از معادله‌ی (۲) را حذف می‌کنند که به درد حل آن نمی‌خورد. اما پس از تجربه و آشنایی بیشتر با این رهیافت، اغلب از معادله‌ی (۱) شروع کرده و معادله‌ای مناسب از آن می‌سازند که شامل فهرستی از جمله‌های مورد نیاز است که برای حل مسئله لازم است.

برای استفاده از GEE مهم است که هم سیستم مورد بررسی‌مان را شناسایی کنیم و هم بازه‌ی زمانی آن را. برای برخی از سیستم‌ها انتخاب بازه‌ی زمانی متفاوت ممکن است CEE ی متفاوتی را نتیجه دهد. برای مثال اگر سیستم، حلقه‌های سیم‌پیچ در تستر باشد در بازه‌ی زمانی بعد از روشن شدن تستر انرژی درونی E_{int} تغییر می‌کند. اما در بازه‌ی زمانی بعدی که در آن دما تثبیت شده است دیگر چنین تغییری را در انرژی درونی نخواهیم داشت.

بحث در معانی مختلف انتقال انرژی در ارتباط با معادله‌ی پایستگی انرژی ضعف دیگری را در کلاس‌ها و کتابهای درسی بروز می‌دهد که مربوط به توان است. چون غالباً کار تنها وسیله‌ی انتقال انرژی در تدریس سنتی مکانیک هست گاهی اوقات می‌گویند که «توان، نرخ کار انجام شده است». این عبارت ناکامل بوده و دانشجویان را در برآورد توان لامپ برق و سیستم‌های صوتی‌شان درمانده می‌کند. هر وقت از همه‌ی شکل‌های انتقال انرژی در رهیافت کلی صحبت شد آن وقت بیان درستی هم از توان ساخته می‌شود^۱: «توان، نرخ انرژی‌ای است که از مرز سیستم عبور می‌کند». دانشجویانی که این رهیافت را آموختند می‌فهمند که یک لامپ ۶۰ وات چه معنایی دارد - همان معنایی که نرخ تابش نوشته شده بر روی جعبه‌ی لامپ دارد. آنها توان صوتی بلندگوهای استریو‌ی‌شان و توان نوری که از خورشید می‌آید را نیز درک خواهند کرد.

آرونز^۲ از این دیدگاه طرفداری می‌کند [23] که یک رهیافت کلی و معقول از انرژی برای تمام فرآیندها هست - که CEE

^۱ برخی فیزیکدانان در تعریف توان، نرخ تبدیل انرژی در داخل سیستم را هم وارد می‌کنند. برای مثال شخصی را در نظر بگیرید که از نردبان بالا می‌رود. سیستم را به عنوان شخص، نردبان و زمین شناسایی کنید. در این وضعیت همچنان که شخص بالا می‌رود، مفهوم توان می‌تواند به صورت نرخ تبدیل انرژی پتانسیل غذاهای خورده شده در بدن شخص به انرژی پتانسیل گرانشی به کار رود.

^۲ Arons

بیان‌اش کرده: «شرم‌آور است به دانشجویان مفهومی محدود و سطحی از انرژی و پایستگی‌اش بدهیم ... به علاوه تشخیص اینکه در فعالیت‌های روزمره از نظر پدیدارشناختی چه اتفاقی می‌افتد - مثل دویدن، پریدن، شتاب دادن ماشین و مواجهه با اثرات اصطکاکی - به مفاهیم فیزیک چنان غنا، ارتباط شخصی و معنای بزرگی می‌بخشد که در توسعه‌ی محدود آن دستیافتنی نیست.»

همانطور که در فصل سوم گفته شد مهم است که بین انتقال انرژی از مرز سیستم و تبدیل آن در داخل سیستم تمایز قائل شویم. من سه نوع مکانیزم تبدیل را شناسایی می‌کنم: ۱- کار، ۲- واکنش‌های شیمیایی و ۳- واکنش‌های هسته‌ای. کار در این مفهوم به معنای W در سمت راست - معادله‌ی (۲) - نیست. کار در آن معادله به معنای انتقال انرژی از مرز سیستم بود. همانطور که در فصل اول گفته شد کار همچون مکانیزم تبدیل، یک کار داخلی است. این کاری است که یک جزء سیستم بر جزء دیگر آن انجام می‌دهد و سبب تبدیل انرژی می‌گردد. برای مثال در داخل سیستم توپ-زمین کار انجام شده توسط نیروی گرانش بین توپ و زمین سبب تبدیل انرژی پتانسیل گرانشی به انرژی جنبشی می‌شود.

واکنش‌های شیمیایی در سیستمی از مواد شیمیایی سبب تبدیل انرژی پتانسیل به شکل‌های دیگر می‌شود مثل انرژی درونی و احتمالاً انرژی جنبشی قطعات پراکنده شده در یک انفجار. واکنش‌های هسته‌ای انرژی ذخیره شده در هسته‌ی اتم را به انرژی جنبشی ذرات خارج شده از آن و انرژی درونی ماده‌ای تبدیل می‌کنند که واکنش را محصور کرده است. به طور کلی **تبدیل انرژی سبب تغییر شکل یک نوع انرژی ذخیره شده به نوع دیگر در داخل سیستم می‌شود.**

انتقال انرژی در داخل سیستم هم امکان‌پذیر است و باعث می‌شود توزیع انرژی عوض شود ولی در انرژی کل سیستم تغییری ایجاد نمی‌کند. برای مثال سیستمی ممکن است شامل یک شیء گرم و یک شیء سرد باشد. در این حالت انتقال انرژی از شیء گرم به شیء سرد به شکل گرما و تابش الکترومغناطیسی خواهد بود. مادامی که انرژی فقط بین اعضای سیستم منتقل شود سیستم منزوی بوده و سمت راست CEE صفر خواهد بود. انتقال‌های داخلی توزیع انرژی را برهم می‌زنند زیرا شیء سرد انرژی درونی به دست آورده و شیء گرم انرژی درونی از دست می‌دهد اما انرژی کل سیستم ثابت باقی می‌ماند. فرآیندهای این چنینی در معادله‌ی پایستگی انرژی وارد نخواهند شد و ممکن است با اصول دیگری توصیف شوند مثل لزوم تعادل گرمایی بین اجزاء سیستم. **انتقال انرژی در داخل سیستم اغلب سبب تبدیل یک نوع انرژی ذخیره شده به نوع دیگر نمی‌شود - انرژی بین اجزاء سیستم بازتوزیع شده اما به یک شکل باقی می‌ماند.**

۴-۳ طبقه‌بندی کردن سیستم:

از فرآیند طبقه‌بندی کردن سیستم در فصل دوم صحبت شد. در آنجا ما **سیستم غیر منزوی** را سیستمی معرفی کردیم که انرژی دست‌کم با یک مکانیزم از مرز آن عبور می‌کند. در این حالت CEE برای سیستم مذکور با معادله‌ی (۱) توصیف می‌شود. **سیستم منزوی** سیستمی است که در آن انرژی با هیچ مکانیزمی از مرز سیستم عبور نمی‌کند. در این حالت CEE برای این سیستم به شکل خاصی فروکاسته می‌شود:

$$\Delta E_{system} = 0 \quad (3)$$

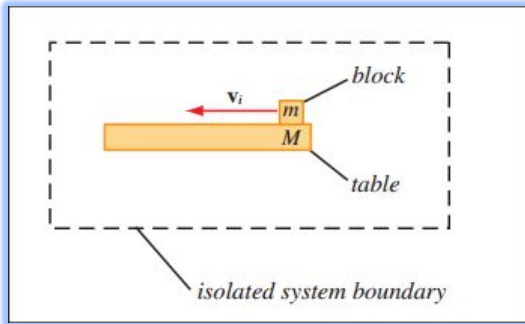
در فرآیندهایی که درگیر یک سیستم منزوی می‌شوند فقط تبدیل انرژی رخ می‌دهد و انرژی چنین سیستمی ثابت باقی می‌ماند (ممکن است در داخل سیستم انتقال انرژی هم صورت بگیرد ولی در کل تاثیری در CEE نخواهد داشت).

طبقه‌بندی دیگری که امکان‌پذیر است و پیشتر نیز از آن صحبتی نشد در **سیستم غیر منزوی** رخ می‌دهد که در **حالت**

مانا^۱ است. این سیستم با CEE ی زیر توصیف می‌شود:

$$0 = \sum T \quad (۴)$$

در این سیستم انرژی از مرز سیستم عبور می‌کند ولی نرخ ورود انرژی به سیستم با نرخ خروج انرژی از آن برابر است پس انرژی کل سیستم ثابت باقی می‌ماند. زمین مثالی از سیستم غیر مَنزوی‌ای است که تقریباً در حالت مانا است. نرخ ورود انرژی به سیستم توسط نور مرئی خورشید با نرخ خروج آن از سیستم توسط تابش مادون قرمز برابر است. مُشکل گرمایش جهانی مربوط به این واقعیت است که زمین به طور کامل در حالت مانا نیست. چون گازهای گلخانه‌ای با جذب تابش مادون قرمز دمای سطح زمین را به آرامی افزایش می‌دهند.



شکل ۱- بلوکی به جرم m بر روی میزی به جرم M لغزنده می‌شود. میز آزادانه بر سطح بدون اصطکاک قرار دارد و سیستم بلوک و میز مَنزوی است.

مونگان مسئله‌ای را مطرح می‌کند [24] که در آن بلوکی بر روی یک میز می‌لغزد و میز آزادانه در یک اتاق بدون اصطکاک قرار دارد. در اینجا هیچ انرژی‌ای به سیستم وارد و یا از آن خارج نمی‌شود. این وضعیت در شکل ۱ نشان داده شده است. در زمان $t=0$ میز ساکن است و بلوک با سرعت v_i روی میز می‌لغزد. سرانجام بلوک و میز با سرعت مشترک v_f حرکت می‌کنند.

مسئله **مونگان** می‌خواهد این را نشان بدهد که بدون معرفی مفاهیم کار و گرما هم می‌شود این مسئله را حل کرد. با استفاده

از رهیافت کلی انرژی، دانشجو به فکر معرفی کار یا گرما به عنوان انتقال انرژی از مرز سیستم نخواهد بود زیرا سیستم بلوک و میز مَنزوی است. در عوض کار داخلی در سیستم انجام می‌شود که موجب تغییر سرعت میز و بلوک خواهد شد. به علاوه سیستم از نیروی اصطکاک بین بلوک و میز انرژی درونی کسب می‌کند که توسط گرما بین بلوک و میز توزیع می‌شود. بنابراین کار و گرما در داخل سیستم رخ می‌دهند ولی جای آنها در سمت راست CEE نیست. عبارات Q و W که در CEE ظاهر می‌شوند انتقال انرژی از مرزهای سیستم را نشان می‌دهند و برای این مسئله صفر هستند. کار انجام شده در داخل سیستم فرآیند تبدیل انرژی است که در آن انرژی جنبشی به انرژی درونی تبدیل می‌شود و وجود گرما به سادگی نشان می‌دهد که انرژی درونی بین اجزای سیستم توزیع شده است.

مونگان همچنین این نکته را اضافه کرده که [برای دانشجویان] اغواکننده است که W را بجای ΔK و Q را بجای ΔU بگیرند. با رهیافت کلی انرژی دانشجو اغوا نخواهد شد که این کار را انجام دهد زیرا او آموخته است (و امیدواریم آموخته باشد) که هر نوع انتقال انرژی می‌تواند سبب تغییر در همهی انواع انرژی ذخیره شده بشود.

۴-۴ فرو کاستن از جمله‌های معادله‌ی پایستگی انرژی:

اجازه دهید سه حالت خاص را در نظر بگیریم تا ببینیم چگونه در عمل از معادله‌ی پایستگی انرژی استفاده می‌شود. نخست فرض کنید سیستم یک شیء تنها است که می‌تواند همچون ذره مدل‌سازی شود و بازه‌ی زمانی هم مدتی باشد که یک تک نیرو در فضای تهی بر روی شیء اثر می‌کند. چون نیروی خارجی بر شیء اثر می‌کند این سیستم غیر مَنزوی است.

تنها شکلی از انرژی که می‌تواند تغییر کند انرژی جنبشی است و تنها راهی که می‌توان به سیستم انرژی منتقل کرد از طریق کار است. معادله‌ی (۲) به شکل زیر فروکاسته می‌شود:

$$\Delta K = W \quad (5)$$

که همان قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی است. بنابراین این معادله تنها حالت خاصی از معادله‌ی پایستگی انرژی است که اغلب، دانشجویان از آن همچون معادله‌ای بنیادی تعبیر می‌کنند.

در مورد بعدی سیستم دلخواهی را در نظر بگیرید که منزوی است یعنی هیچ انتقال انرژی به داخل یا خارج از سیستم صورت نمی‌گیرد. فرض کنید که هیچ نیروی ناپایستاری هم در داخل سیستم اثر نمی‌کند پس انرژی مکانیکی به انرژی درونی تبدیل نمی‌شود و معادله‌ی (۲) به شکل زیر درمی‌آید:

$$\Delta K + \Delta U = 0 \quad \rightarrow \quad K_f + U_f = K_i + U_i \quad (6)$$

که عبارتی آشنا از پایستگی انرژی مکانیکی برای یک سیستم منزوی است. برای مثال در تویی که سقوط می‌کند، سیستم به عنوان توپ و زمین انتخاب می‌شود و انرژی پتانسیل، گرانشی است.

در نهایت سیستمی از گاز ایده‌آل را در نظر بگیرید که در یک استوانه‌ی ساکن قرار دارد. پیستون می‌تواند در داخل استوانه حرکت کرده و در نتیجه بر روی گاز کار انجام دهد. دیواره‌های استوانه رسانای گرما است. پس انرژی می‌تواند توسط گرما به سیستم وارد و یا از آن خارج شود. در این حالت معادله‌ی (۲) به شکل زیر درمی‌آید:

$$\Delta E_{\text{int}} = W + Q \quad (7)$$

که قانون اول ترمودینامیک می‌باشد^۱. بنابراین هر سه نوع معادله‌ی «بنیادی» انرژی که پیشتر ذکرشان رفت می‌توانند از CEE، معادله‌ی درست بنیادی انرژی تولید شوند.

به عنوان شاهده‌ی بر کلیت معادله‌ی پایستگی انرژی، اثر فوتوالکتریک را در نظر بگیرید. در این فرآیند فوتونی به سطح تمیز یک فلز برخورد کرده و از آن الکترون جدا می‌کند. سیستم را فلز و الکترون جداشده شناسایی کنید. این سیستم غیر منزوی است زیرا انرژی توسط تابش الکترومغناطیسی به شکل فوتون از مرز سیستم عبور می‌کند. در این حالت معادله‌ی (۲) به شکل زیر فروکاسته می‌شود:

$$\Delta K + \Delta U = T_{\text{ER}} \quad (8)$$

که در آن T_{ER} انتقال انرژی توسط فوتون به سیستم است. انرژی پتانسیل U به سیستم فلز-الکترون تعلق دارد. ما پیکربندی الکترون در بیرون از فلز را به عنوان صفر انرژی پتانسیل شناسایی می‌کنیم. وقتی الکترون در داخل فلز قرار دارد به فلز مقید است پس می‌توانیم انرژی پتانسیل سیستم را به عنوان $-U_0$ شناسایی کنیم. بنابراین تغییر در انرژی پتانسیل برابر می‌شود با: $\Delta U = 0 - (-U_0) = U_0$.

^۱ در فروکاستن معادله‌ی (۲) فرض شد که انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل هر دو صفر-اند. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل برای اشیاء ماکروسکوپیکی تعریف می‌شوند. در شکل میکروسکوپیکی، انرژی جنبشی مولکولهای گاز به دمای گاز و انرژی پتانسیل آنها به انرژی پتانسیل شیمیایی گاز تبدیل می‌شود و هر دو جمله در یکدیگر ادغام شده و انرژی درونی گاز را می‌سازند. در حقیقت انرژی درونی سیستم محل تجمع انرژی نیروهای ناپایستار، انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل مولکولها و انرژی‌های دیگری است که اثرات کوانتومی یا آماری دارند. م

انرژی جنبشی K ی سیستم به الکترون جدا شده تعلق دارد. ما می‌توانیم انرژی جنبشی آن را وقتی که در داخل فلز است صفر در نظر بگیریم (انرژی جنبشی یک تک الکترون وقتی در داخل فلز است در مقایسه با انرژی درونی فلز چشم‌پوشیدنی است. ما از این تصحیح ناچیز چشم‌پوشی می‌کنیم). با نامیدن انرژی جنبشی الکترون جدا شده به K تغییرات انرژی جنبشی برابر می‌شود با: $\Delta K = K - 0 = K$. بنابراین معادله‌ی (۸) برای این فرآیند به شکل زیر درمی‌آید:

$$K + U_0 = T_{ER} \quad (9)$$

اگر ما انرژی منتقل شده توسط فوتون به سیستم را به صورت $T_{ER} = hf$ مشخص کنیم - که در آن h ثابت پلانک و f فرکانس است - آنگاه خواهیم داشت:

$$K + U_0 = hf \quad (10)$$

که معادله‌ی اینشتین برای اثر فوتوالکتریک است. U_0 در معادله‌ی او به عنوان تابع کار فلز و K بیشینه‌ی انرژی جنبشی الکترون جدا شده شناسایی شده بود.

اکنون بگذارید به وضعیتی رجوع کنیم که پیشتر ذکر آن رفت که در آن دانشجو نمی‌توانست با آموزش سنتی انرژی آن را تحلیل کند. فرض کنید سیستم مورد نظر ما یک سیستم استریو باشد و بازه‌ی زمانی را دقیقاً از قبل تا چند دقیقه بعد از روشن کردن آن بگیریم. این سیستم غیر منزوی است. در این مورد فروکاست مناسب از معادله‌ی (۲) چنین است:

$$\Delta E_{int} = Q + T_{MW} + T_{ER} + T_{ET} \quad (11)$$

از زمانی که دکمه‌ی روشن کردن دستگاه را می‌زنیم انرژی درونی E_{int} با افزایش دما تغییر می‌کند. انرژی، استریوی گرم را با گرمای Q به سمت هوای خنک و سیستم را با امواج صوتی T_{MW} از طریق بلندگوها ترک می‌کند. انرژی T_{ER} توسط تابش الکترومغناطیسی از طریق ورودی سیگنال رادیو به سیستم وارد شده و آن را از طریق لامپ‌هایی با نور متغیر ترک می‌کند. بیشترین قسمت انرژی ورودی به سیستم از آن انتقال برق T_{ET} و از طریق سیم پاور می‌باشد.

اکنون ماشین چمن‌زنی را به عنوان یک سیستم در نظر بگیرید و بازه‌ی زمانی را از وقتی بگیرید که باک آن از بنزین پر بوده است و تا چند دقیقه بعد از روشن شدن کار کند. این سیستم نیز غیر منزوی است. فروکاست مناسب از معادله‌ی (۲) چنین است:

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{int} = W + Q + T_{MT} + T_{MW} \quad (12)$$

انرژی جنبشی K متناظر با تیغه‌های چرخان و اجزای موتور است که افزایش می‌یابد زیرا دستگاه در ابتدای بازه‌ی زمانی خاموش بوده است. انرژی پتانسیل سیستم U به بنزین داخل باک دستگاه مربوط است که با پر بودن اش افزایش می‌یابد. چون ماشین چمن‌زنی گرم می‌شود تغییری هم در انرژی داخلی E_{int} هست. W کاری است که کاربر با کشیدن سیم دستگاه روی آن انجام می‌دهد. انرژی Q نیز توسط گرما به هوای سرد منتقل می‌شود و همینطور انرژی T_{MW} که با امواج صوتی دستگاه را ترک می‌کند. جمله‌ی T_{MT} متناظر با فرآیند پر کردن باک دستگاه با بنزین است.

سرانجام بگذارید از یک لامپ برق که با گاز پر شده سخن بگوییم. ما رشته‌ی لامپ را به عنوان سیستم شناسایی کرده و بازه‌ی زمانی را یک دقیقه پس از روشن شدن لامپ در نظر می‌گیریم. فروکاست مناسب از معادله‌ی (۲) چنین است:

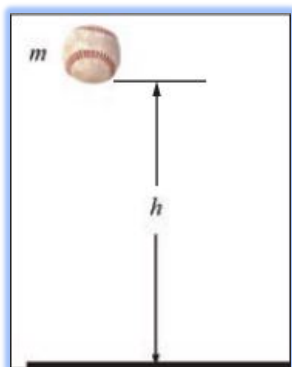
$$0 = Q + T_{ER} + T_{ET} \quad (13)$$

رشته‌ی لامپ در حالت مانا یک سیستم غیر منزوی ست. در عبارت بالا انرژی T_{ET} از طریق انتقال برق به رشته‌ی لامپ وارد می‌شود. انرژی Q توسط گرما وارد گاز داخل لامپ شده و از طریق نور مرئی و مادون قرمز (T_{ER}) سیستم را ترک می‌کند. اگر گاز داخل لامپ را تخلیه کنند جمله‌ی Q حذف می‌شود.

۴-۵ مسائل:

اجازه دهید از دو مسئله‌ای که در فصل دوم مطرح شد یاد کنیم:

مسئله ۱:



شکل ۲- توپی به جرم m از ارتفاع h رها می‌شود. این توپ با چه سرعتی به زمین برخورد خواهد کرد؟

توپی به جرم m از ارتفاع h در بالای سطح زمین رها می‌شود (شکل ۲). از مقاومت هوا چشم‌پوشی می‌شود. این توپ با چه سرعتی به زمین برخورد خواهد کرد؟

با انتخاب توپ و زمین به عنوان سیستم و بازه‌ی زمانی از لحظه‌ی رها شدن توپ تا درست قبل از برخورد آن به زمین، معادله‌ی (۲) چنین می‌شود:

$$\Delta K + \Delta U_g = 0 \quad (14)$$

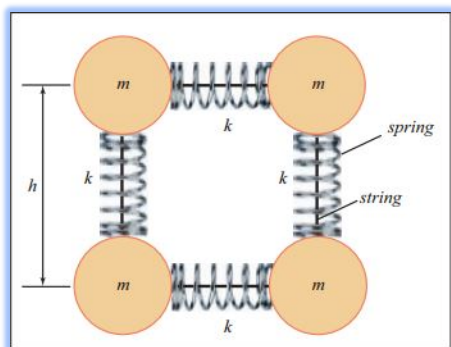
ما پیکربندی سیستم را وقتی توپ بر زمین است صفر انرژی پتانسیل گرانشی تعریف می‌کنیم. بنابراین:

$$\left(\frac{1}{2}mv^2 - 0\right) + (0 - mgh) = 0 \quad (15)$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{2gh}$$

این مسئله آشکارا ساده است و از قصد برای مقایسه با مسئله‌ی ۲ ارائه شده است.

مسئله ۲:



شکل ۳- چهار گره به جرم m با نخ‌هایی به هم بسته شده و به شکل مربعی به ضلع h درآمده‌اند. بین هر جفت گره فنرهای فشرده‌شده‌ی یکسانی قرار دارند. وقتی نخ‌ها بُریده می‌شوند گره‌ها پراکنده می‌شوند. آنها با چه سرعتی از فنرها جدا می‌شوند؟

چهار گره‌ی کوچک جرم یکسان m را دارند. بین هر دو گره یک فنر فشرده‌شده قرار دارد که این چهار گره را به صورت مربعی به ضلع h درآورده است (شکل ۳). فنرها بی‌جرم و یکسان‌اند و ثابت نیروی k را دارند. آنها به گره‌ها بسته نشده‌اند. طول آزاد هر فنر L است. گره‌ها با نخ سبکی که از بین محور فنرها می‌گذرد به یکدیگر بسته شده‌اند. کل این دستگاه در ناحیه‌ای بدون میدان گرانشی قرار دارد. هر چهار نخ همزمان بُریده شده و فنرها گره‌ها را به اطراف پراکنده می‌کنند. آنها با چه سرعتی از فنرها جدا می‌شوند؟

ما سیستم را چهار گره و چهار فنر انتخاب می‌کنیم. بازه‌ی زمانی از زمان بُریدن نخ تا قطع شدن تماس گره‌ها از فنرهاشان است. معادله‌ی (۲) چنین می‌شود:

$$\Delta K + \Delta U_s = 0 \quad (16)$$

تنها تفاوت این مسئله با مسئله ۱ این است که ما باید انرژی جنبشی چهار شیء و انرژی پتانسیل چهار فنر را در نظر بگیریم. به دلیل تبارن مسئله می‌دانیم که پس از بُردن نخ‌ها هر چهار کُره سرعت یکسانی دارند و چون فنرها مشابه هم هستند قبل از بُردن نخ‌ها هر کدام انرژی پتانسیل یکسانی را ذخیره می‌کنند. ما پیکربندی سیستم را طوری تعریف می‌کنیم که وقتی فنرها دیگر فشرده نباشند انرژی پتانسیل کشسانی سیستم صفر شود. بنابراین:

$$\left[4 \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) - 0 \right] + \left\{ 0 - 4 \left[\frac{1}{2} k (L - h)^2 \right] \right\} = 0 \quad (17)$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{k}{m}} (L - h)$$

توجه کنید که رهیافت کلی حل مسئله برای هر دو سوال یکی است. دانشجویی که رهیافت کلی را آموخته از دیدن پیچیدگی مسئله دوم ترسی به دل راه نمی‌دهد. علاوه بر آن دانشجوی مذکور پس از دیدن مسئله‌ی زیر هم آرامش خود را از دست نخواهد داد.

مسئله ۳:

چهار کُره جرم m و بار الکتریکی q ی یکسانی دارند. کُره‌ها به یکدیگر با نخ عایقی در فضای بدون گرانش به شکل یک مربع بسته شده‌اند. هر چهار نخ همزمان بُریده شده و کُره‌ها به اطراف می‌جهند. وقتی کُره‌ها از یکدیگر خیلی دور شوند سرعتشان چقدر خواهد بود؟

دانشجویی که رهیافت کلی را آموخته است تشخیص می‌دهد که مسئله همان شکل مسائل ۱ و ۲ را داشته و دقیقاً به همان شکل هم حل می‌شود. او تفاوت مهمی بین این مسئله و آن مسائل تشخیص می‌دهد زیرا نیروی الکتریکی بین چهار شیء در مقایسه با نیروی فنر از طبیعتی متفاوت برخوردار است. ما باید انرژی پتانسیل الکتریکی همه‌ی جفت ذرات برهم‌کنش - کننده در سیستم را دو به دو با هم جمع بزنیم:

$$\Delta K + \Delta U_e = 0 \quad (18)$$

$$\left[4 \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) - 0 \right] + \left\{ 0 - \left[4 k_e \left[\frac{q^2}{h} \right] + 2 k_e \left[\frac{q^2}{\sqrt{2} h} \right] \right] \right\} = 0 \quad (19)$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{k_e q^2}{m h} \left(2 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right)} \quad (20)$$

۴-۶ نتیجه‌گیری:

ما به اهمیت انرژی در آموختن فرآیندهای فیزیک و حل مسائل فیزیک تاکید کردیم. به دلیل اهمیت این موضوع ما باید از ابتدای ترم برای دانشجویان وقت گذاشته، برای آنها از طبیعت کلی انرژی و معادله‌ی بنیادی درست انرژی صحبت کنیم، معادله‌ای که بتواند در همه‌ی موقعیت‌ها به کار رود. به علاوه باید کار را به دقت تعریف کرده و بر اهمیت شناسایی سیستم تاکید کنیم و مطمئن شویم که زبان را دقیق به کار می‌بریم. با کوشش در انجام این وظایف بایستی در انتهای ترم دانشجویانی داشته باشیم که واقعاً انرژی را درک کرده و می‌توانند به آسانی مسائلی را تحلیل کنند که درگیر انرژی و انتقال

آن می‌باشند. در فصل پایانی نشان می‌دهیم که چگونه می‌توان از رهیافت کلی انرژی برای حل چند مسئله استفاده کرد. اینها شامل دو مسئله از **مونگان**^[12] هم می‌شود که در فصل دوم از آنها سخن گفته شد.

۵- رهیافتِ تکانه-انرژی برای مسائلی که درگیر سیستم‌های چرخان و تغییر شکل- پذیر هستند

در متون فیزیک رهیافتِ متداول برای حلّ مسائل درگیر با سیستم‌های چرخان یا تغییرشکل‌پذیر استفاده از قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی همراه با «قضیه‌ی شبه‌کار-انرژی جنبشی» یا «مُعادله‌ی مرکز جرم» است. در این فصل از رهیافتِ دیگری صحبت می‌شود که هیچ یک از این دو مُعادله را به کار نمی‌گیرد و برای حلّ مسائل این چنینی به دانشجویان دیدِ کلی‌تر و سردرگمی کمتری می‌دهد. این رهیافت برای سه نمونه که در متون فیزیک آمده است به تصویر می‌آید.

۵-۱ اشیاء چرخان و تغییرشکل‌پذیر:

بحثِ مهمی در متون فیزیک در گرفته که موضوع اش مشکلاتِ کاربردِ رهیافتِ کار-انرژی در حلّ مسائل است [1] [2] [3] [13] [4] [5] [12]. برای مسائلی که در آن نیروها در یک محیط بدون اصطکاک به یک ذره یا یک شیء صلب غیرچرخان اثر می‌کنند استفاده از قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی:

$$W = \Delta K \quad (1)$$

سراسر است. K نمایانگر انرژی جنبشی ذره یا شیء است. همانطور که در فصل اول گفته شد، در تعریف کار جابجایی برابر با جابجایی نقطه اثر نیرو است. از این به بعد یک شیء صلب و غیرچرخان را ذره می‌گیریم زیرا می‌تواند چنین مُدل‌سازی شود. برای این شیء جابجایی همان جابجایی ذره است.

اکنون نیرویی را در نظر بگیرید که بر یک سیستم چرخان یا تغییرشکل‌پذیر وارد می‌آید. در این نوع مسائل جابجایی نقطه اثر نیرو ممکن است با جابجایی مرکز جرم سیستم فرق داشته باشد. تعدادی رهیافت برای این گونه مسائل پیشنهاد شده است. برخی شکلی از قانون دوم نیوتن را درگیر این کار می‌کنند که از راه انتگرال‌گیری به دست آمده است:

$$\int \sum \mathbf{F}_{ext} \cdot d\mathbf{r}_{CM} = \Delta \left(\frac{1}{2} m v_{CM}^2 \right) \quad (2)$$

در این عبارت انتگرال نیروی خارجی برآیند بر روی سیستم در کلّ جابجایی مرکز جرم برابر است با تغییر انرژی جنبشی

مرکز جرم سیستم. پن شیمای^[2]، شرود^[3]، مالینکرات^۲ و لِف^۳ [4] انتگرال سمت چپ معادله‌ی (۲) را «شبه‌کار» و مونگان^[12] «کار مرکز جرم» نامیدند.

شرود^[3] و پن شیمای^[2] معادله‌ی (۲) را «قضیه‌ی شبه‌کار-انرژی جنبشی» و باز شرود و برنارد^[13] آن را «معادله‌ی مرکز جرم» نام نهادند. چَپی و شرود^[6] با به‌کارگیری این معادله همراه با یک اصل انرژی بر یک «سیستم ذره‌ای» رهیافت قدیمی را اصلاح کردند. سیستم ذره‌ای مدلی از سیستم مسئله است که در آن همه‌ی جرم آن در مرکز جرمش متمرکز شده است. در این رهیافت جابجایی هر شیء در سیستم همان جابجایی مرکز جرم سیستم است.

در متون فیزیک – برای مثال در مقالات شرود^[3] و مونگان^[12] – برای حل شماری از مسائل به معادلات (۱) و (۲) استناد می‌شود. در اینجا قصدم این است که ثابت کنم برای دانشجویانی که شروع به حل مسائل انرژی می‌کنند هیچ‌یک از معادلات (۱) یا (۲) بهترین گزینه نیست. به ویژه معادله‌ی (۲) که معادله‌ای «انرژی‌گون» است بیشتر موجب سردرگمی دانشجویان می‌شود. اصلاً نیازی نیست معادله‌ی جدیدی مانند این را معرفی کنیم به خصوص معادله‌ای که موجب گیج شدن دانشجویان شود. دانشجویانی که به دقت رهیافت انرژی را آموخته‌اند هم اینک ابزار لازم را برای حل مسائل پیچیده در اختیار دارند. رهیافت حل این مسائل سراسر بوده و باید به همین شیوه ارائه گردد نه اینکه با معرفی معادلات غیر ضروری مشکل را بدتر کرد.

۵-۲ نگاهی دیگر به قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی:

رهیافت‌های سنتی آموزش مفهوم انرژی با قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی آغاز می‌کنند و هرگاه با وضعیت‌های جدید مواجه می‌شوند جملاتی را به این معادله اضافه کرده و بسط می‌دهند. این جملات اضافی شامل کار انجام‌شده توسط نیروهای ناپایستار، انرژی پتانسیل و غیره می‌شوند. بسیار سخت و دشوار است که دانشجویان نوپای فیزیک این شکل از بسط قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی پایه را درک کرده و به کار ببرند.

من فهمیدم که بهتر است در ابتدای درس مکانیک و قزمان را به ارائه‌ی یک معادله‌ی کلی انرژی اختصاص داده و همانطور که در فصل چهارم گفتیم بعداً جملات معادله را بنا به اقتضای مسئله کاهش دهیم. معادله‌ی کلی، معادله‌ی پایستگی انرژی (CEE) است:

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{\text{int}} = W + Q + T_{\text{MT}} + T_{\text{MW}} + T_{\text{ER}} + T_{\text{ET}} \quad (3)$$

برای دانشجویان خیلی آسان‌تر است جملاتی را بشناسند که متعلق به یک معادله‌ی کلی خوش‌فهم نیست تا اینکه در رهیافت سنتی آنها را به یک معادله‌ی ساده‌شده اضافه کنند.

دانشجویانی که رهیافت کلی انرژی را آموختند در شروع یک چالش جدید به قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی چنگ نمی‌زنند، در عوض از معادله‌ی (۳) استفاده می‌کنند. در خیلی از موارد قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی راه‌حل مناسبی برای مسئله نیست و این رهیافت کلی است که موجب می‌شود مسئله حل گردد.

۳-۵ نگاهی دیگر به مُعادله‌ی شبه کار یا مُعادله‌ی مرکز جرم:

اکنون بگذارید توجه‌مان را به مُعادله‌ی (۲) معطوف کنیم تا همراه با قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی مسائل را حل کنیم. این رهیافت معایب زیر را دارد:

۱- انتگرال سمت چپ مُعادله‌ی (۲) از جنس کار نیست زیرا جابجایی در آن، جابجایی مرکز جرم است نه نقطه اثر نیرو. با خواندن سمت چپ مُعادله‌ی (۲) به «شبه کار» یا «کار مرکز جرم» به شدت بر این فرض تاکید می‌کنیم که این انتگرال شکلی از کار است. آموزگاری که به دقت جابجایی را در تعریف کار به عنوان نقطه اثر نیرو مشخص کرده در ارائه‌ی مُعادله‌ی (۲) برای دانشجویان اش مشکل خواهد داشت زیرا شامل جمله‌ای شبیه به کار است ولی جابجایی در آن متفاوت تعریف شده است.

۲- در متون فیزیک [3] به این نکته اشاره شده است که مُعادله‌ی (۲) یک مُعادله‌ی انرژی نیست زیرا از مُعادله‌ی دینامیکی، قانون دوم نیوتن ایجاد شده است. دانشجویان با این نکته به مشکل برمی‌خورند زیرا مطمئن‌اند سمت چپ مُعادله‌ی (۲) شبیه به کار است و سمت راست آن شبیه به انرژی جنبشی!

۳- در آموزش‌های ما بر اهمیت این موضوع تاکید کردیم که مسائل می‌توانند با اصول بنیادی حل شوند. در رهیافت انرژی فقط یک اصل بنیادی وجود دارد: پایستگی انرژی و فقط یک مُعادله در ارتباط با این اصل وجود دارد: مُعادله‌ی پایستگی انرژی. در رهیافت کلی انرژی مُعادله‌ی (۱) فروکاستی مشخص از مُعادله‌ی کلی پایستگی انرژی در حالت خاص است. چون مُعادله‌ی (۲) بسیار شبیه به مُعادله‌ی انرژی است دانشجویان در رویارویی با این حقیقت گیج خواهند شد که در آن رهیافت انرژی دو مُعادله ظاهر شده در حالی که فقط یک مُعادله وجود دارد!

اگر رهیافت متفاوتی را به جای مُعادله‌ی (۲) به کار ببریم این معایب محو خواهند شد. نشان دادن آن آسان است که مُعادله‌ی (۲) از نظر ریاضی هم‌ارز با قضیه‌ی ضربه-تکانه است. زیرا هر دو از قانون دوم نیوتن استخراج شده‌اند. قضیه‌ی ضربه-تکانه عبارت است از:

$$\int \sum \mathbf{F}_{ext} dt = m\Delta v_{CM} \quad (4)$$

که همان اطلاعات را راجع به مرکز جرم می‌دهد. دانشجویان هم‌اینک قضیه‌ی ضربه-تکانه را در جعبه ابزار خویش دارند. چرا باید مُعادله‌ی دیگری - مُعادله‌ی (۲) - را معرفی کرد که همان اطلاعات را ارائه دهد؟ علاوه بر این چرا باید به دانشجویان یک مُعادله‌ی انرژی‌گون معرفی کرد ولی به آنها گفت که این یک مُعادله‌ی واقعی انرژی نیست؟

پس ما در رهیافت انرژی-تکانه، برای حل مسائل از قضیه‌ی ضربه-تکانه به جای مُعادله‌ی شبه‌کار یا مرکز جرم استفاده می‌کنیم. دانشجویان هم‌اینک با این مُعادله آشنا هستند پس دلیلی وجود ندارد که یک مُعادله‌ی جدید انرژی‌گون معرفی کنیم که درک آنها را از کار برهم بزند.

۴-۵ رهیافت انرژی-تکانه:

در رهیافت انرژی-تکانه که در این فصل گفته شد برای حل مسائل به دو مُعادله ارجاع گردید که یکی CEE یا مُعادله‌ی (۳) و دیگری قضیه‌ی ضربه-تکانه یا مُعادله‌ی (۴) بود که به جای مُعادلات (۱) و (۲) - از رهیافت سنتی - به کار می‌رفتند.

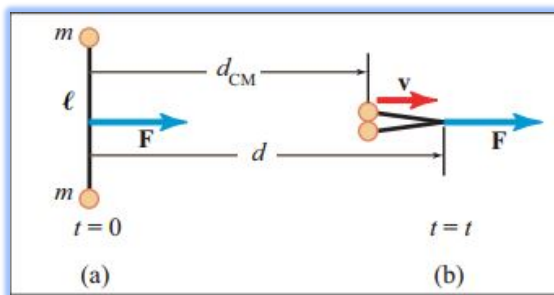
رهیافت انرژی-تکانه مزایای زیر را دارد:

- ۱- نیازی به معرفی «شبه‌کار» یا «کار مرکز جرم» نیست. فقط یک نوع کار هست که بر روی سیستم انجام می‌گیرد، کاری که با تعریف استاندارد محاسبه می‌شود.
- ۲- معادله‌ی (۴) به وضوح معادله‌ی انرژی نیست پس نمی‌تواند با معادلات واقعی انرژی دچار اشتباه و سردرگمی شود.
- ۳- مسائلی که درگیر سیستم‌های چرخان یا تغییرشکل‌پذیر هستند می‌توانند با انتخاب یک اصل بنیادی از رهیافت انرژی - CEE - و یک اصل از رهیافت تکانه - قضیه‌ی ضربه-تکانه - حل شوند.

۵-۵ مسائل نمونه:

اجازه دهید با استفاده از رهیافت انرژی-تکانه سه مسئله‌ی نمونه را حل کنیم. نخستین مسئله حالت ساده‌ای از یک سیستم تغییرشکل‌پذیر است که **شروود** [3] آن را مطرح کرده است.

مسئله‌ی ۱:



شکل ۱- دو قطعه با نخ به طول l به هم وصل شده‌اند. نیروی ثابتی به بزرگی F مرکز نخ را کشیده و باعث می‌شود قطعه‌ها به سمت راست و نیز به سمت هم‌دیگر حرکت کنند. هنگامی که آنها با هم برخورد می‌کنند، برخوردشان کاملاً ناکشسان است.

شکل ۱a نمایی از بالا از پیکربندی اولیه‌ی دو قطعه به جرم m را نشان می‌دهد که بر روی سطحی بدون اصطکاک با نخ بی‌جرمی به طول l بسته شده‌اند. در زمان $t = 0$ نیروی ثابتی به بزرگی F مرکز نخ را به سمت راست می‌کشد. در زمان t قطعه‌های متحرک به هم‌دیگر برخورد کرده و به هم می‌چسبند. در این زمان - همانطور که شکل ۱b نشان می‌دهد - نقطه اثر نیرو به اندازه‌ی d جابجا شده و قطعه‌ها هر کدام سرعت v را دارند. v چقدر است و چقدر از انرژی انتقال‌یافته به سیستم به انرژی درونی تبدیل شده است؟

راه‌حلی که در اینجا داده می‌شود از رهیافت انرژی-تکانه استفاده کرده و به همان نتیجه‌ای می‌رسد که **شروود** رسیده است. ما دو قطعه را به عنوان سیستم شناسایی می‌کنیم. همانطور که شکل ۱b هم نشان می‌دهد چون سیستم تغییرشکل‌پذیر است فاصله‌ای که مرکز جرم می‌پیماید با فاصله‌ی نقطه اثر نیرو یکی نیست. از این شکل - و با مدل‌سازی قطعه‌ها به صورت اشیاء ای با اندازه‌ی صفر - می‌بینیم که: $d_{CM} = d - l/2$.

این حقیقت که نیروی وارد بر سیستم ثابت است نتیجه می‌دهد که شتاب مرکز جرم سیستم در بازه‌ی زمانی $t = 0$ تا $t = t$ ثابت می‌باشد. وقتی شتاب ثابت باشد در بازه‌ی زمانی فوق که مرکز جرم از حال سکون شروع به حرکت می‌کند سرعت متوسطش نصف سرعت نهایی‌اش می‌شود. پس بازه‌ی زمانی حرکت مرکز جرم از حال سکون تا سرعت نهایی v در فاصله‌ی d_{CM} برابر می‌شود با:

$$\Delta t = \frac{d_{CM}}{v_{avg}} = \frac{d - l/2}{v/2} = \frac{2d - l}{v} \quad (5)$$

اکنون از قضیه‌ی ضربه-تکانه - معادله‌ی (۴) - داریم:

$$F\left(\frac{2d - \ell}{v}\right) = 2m(v - 0) \quad (6)$$

حلّ مُعادله‌ی (۶) سرعتِ نهایی را به دست می‌دهد:

$$v = \sqrt{\frac{F(2d - \ell)}{2m}} \quad (7)$$

مُعادله‌ی پایستگی انرژی برای این سیستم به شکل زیر فروکاسته می‌شود:

$$\Delta K + \Delta E_{\text{int}} = W + Q + T_{\text{MW}} \quad (8)$$

که در آن K انرژی جنبشی هر دو قطعه بوده و ΔE_{int} افزایش انرژی درونی قطعه‌ها پس از برخورد کاملاً ناکشسان است. نیروی F کار W را روی سیستم انجام می‌دهد. جمله‌ی Q بیانگر انرژی‌ای است که گرما از قطعه‌های گرم (پس از برخورد) به هوا یا سطح منتقل می‌کند و T_{MW} بیانگر انتقال انرژی توسط صوت است که برخورد قطعه‌ها به همدیگر تولید کرده است. بیاید فرض کنیم این دو جمله‌ی آخر چشم‌پوشیدنی هستند^۱. پس مُعادله‌ی پایستگی انرژی به شکل زیر کاهش بیشتری می‌یابد:

$$\Delta K + \Delta E_{\text{int}} = W \quad (9)$$

با توجه به پارامترهای داده‌شده، مُعادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{1}{2}(2m)v^2 - 0 + \Delta E_{\text{int}} = Fd \quad (10)$$

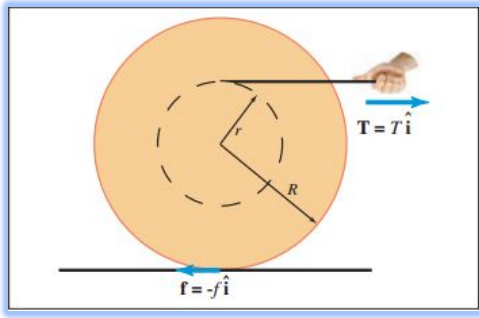
مُعادله را برای ΔE_{int} حل کرده و به جای v مُعادله‌ی (۷) را جایگذاری می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{int}} &= Fd - \frac{1}{2}(2m)v^2 \\ &= Fd - \frac{1}{2}(2m)\frac{F(2d - \ell)}{2m} \\ &= Fd - F\left(d - \frac{\ell}{2}\right) = \frac{1}{2}F\ell \end{aligned} \quad (11)$$

دو مسئله‌ی بعدی را **مونگان** مطرح کرده و ما آن‌ها را در فصل اول معرفی کردیم. **مونگان** این مسائل را با معرفی مفاهیمی چون «کار مرکز جرم» یا «کار ذره» حل کرد. همانطور که در ادامه نشان داده می‌شود هیچ نیازی به معرفی انواع کمیت‌های اضافی کارگونه نیست: دانشجویی که رهیافت تکانه-انرژی را آموخته است هم‌اینک ابزار لازم را برای حل این مسائل در اختیار دارد.

مسئله‌ی ۲:

^۱ **شروود** جمله‌های گرما و صوت را از مُعادله جمع کرده و در انرژی درونی E_{int} وارد می‌کند که همان نتیجه‌ی ریاضی را به دست می‌دهد. دیدم که خیلی از تنش‌های مفهومی از ترکیب انرژی‌های انتقالی بیرون سیستم (گرما، صوت) با شکلی از انرژی ذخیره‌سازی (انرژی درونی) ایجاد می‌شوند.



شکل ۲- قرقره‌ای به شعاع R با نیرویی به بزرگی T کشیده می‌شود. این نیرو بر نخ‌ی وارد می‌شود که دور محور قرقره به شعاع r پیچانده شده است. قرقره با یک میز افقی در تماس است که نیروی اصطکاک f را به آن وارد می‌کند. قرقره بدون لغزش می‌غلتد.

وضعیت فیزیکی‌ای را در نظر بگیرید که در شکل ۲ نشان داده شده است. قرقره‌ای با تقارن استوانه‌ای به جرم m و شعاع R بر یک میز افقی اصطکاک‌دار در حال سکون است. قرقره با یک نیروی ثابت افقی به بزرگی T به سمت راست کشیده می‌شود. این نیرو به کمک نخ‌ی جرم که به دور محوری به شعاع r پیچیده شده قرقره را می‌کشد. در نتیجه قرقره بدون لغزش فاصله‌ی L را در امتداد میز می‌غلتد. الف) سرعت انتقالی قرقره و ب) مقدار نیروی اصطکاک f را بیابید.

مونگان قسمت الف را به کمک معادله‌ی (۱) حل می‌کند. در آنجا او W را «کارِ ذره» می‌نامد. این نام برای دانشجو گیج‌کننده است زیرا قرقره به وضوح ذره نیست. رهیافت انرژی-تکانه با CEE، معادله‌ی (۳) شروع می‌شود. با تشخیص اینکه کار بر روی سیستم قرقره و نخ با دست انجام می‌شود که نتیجه‌اش انرژی جنبشی، تنها انرژی موجود در سیستم خواهد بود. CEE این مورد خاص به معادله‌ی (۱) فروکاسته می‌شود. انرژی جنبشی سیستم دو مولفه دارد: انرژی جنبشی انتقالی مرکز جرم و انرژی جنبشی دورانی حول مرکز جرم:

$$W = \Delta K = \Delta K_{trans} + \Delta K_{rot} \quad (12)$$

اگر مرکز جرم قرقره به اندازه‌ی L جابجا شود، نقطه اثر نیرویی که دست بر نخ وارد می‌کند جابجایی‌ای به بزرگی $L \left(1 + \frac{r}{R}\right)$ خواهد بود. در نتیجه از معادله‌ی (۱۲) به دست می‌آید:

$$TL \left(1 + \frac{r}{R}\right) = \frac{1}{2} m v_{CM}^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (13)$$

که در آن I گشتاور لختی قرقره حول مرکز جرم‌اش می‌باشد. با اعمال شرط غلتش بدون لغزش $\omega = \frac{v_{CM}}{R}$ به دست می‌آید:

$$v_{CM} = \sqrt{\frac{2TL \left(1 + \frac{r}{R}\right)}{m(1 + \gamma)}} \quad (14)$$

که در آن $\gamma = \frac{I}{mR^2}$. این نتیجه با جواب **مونگان** در توافق است و فقط به یک معادله‌ی استاندارد پایستگی انرژی نیاز دارد که در رهیافت کلی به کار می‌رود. برای قسمت ب مونگان از دو معادله استفاده می‌کند. قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی برای مرکز جرم و نسخه‌ی دورانی قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی. ترکیب این معادلات به نتیجه‌ی **مونگان** می‌انجامد:

$$f = \frac{\gamma - \frac{r}{R}}{1 + \gamma} T \quad (15)$$

در رهیافت انرژی-تکانه ما یک معادله را، قضیه‌ی ضربه-تکانه را بر سیستم اعمال می‌کنیم:

$$(T - f)\Delta t = m(v_{CM} - 0) = m v_{CM} \quad (16)$$

این حقیقت که نیروی برآیند ثابت است نتیجه‌اش شتاب ثابت مرکز جرم قرقره خواهد بود. برای شیء‌ای که از حال سکون با شتاب ثابت شروع به حرکت می‌کند سرعت میانگین‌اش نصف سرعت نهایی‌اش خواهد شد. بنابراین بازه‌ی زمانی حرکت مرکز جرم که مسافت L را از حال سکون تا سرعت نهایی v_{CM} طی می‌کند برابر است با:

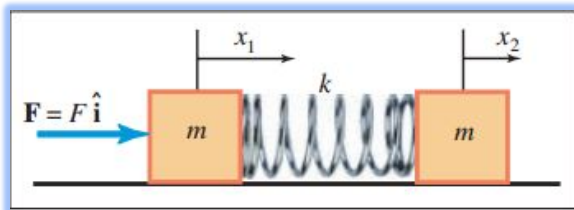
$$\Delta t = \frac{L}{v_{CM,avg}} = \frac{2L}{v_{CM}} \quad (17)$$

که در نتیجه معادله‌ی (۱۶) به شکل زیر درخواهد آمد:

$$(T - f) \frac{2L}{v_{CM}} = mv_{CM} \quad (18)$$

با جایگذاری v_{CM} از معادله‌ی (۱۴) در معادله‌ی (۱۸) و حل آن بر حسب f ، معادله‌ی (۱۵) را به دست خواهیم آورد.

مسئله‌ی ۳:



شکل ۳- دو بلوک به جرم m با فنری با ثابت فنر k یا هم در تماس‌اند. سیستم بر میز بدون اصطکاکی در حال سکون قرار دارد. نیروی ثابتی با بزرگی F به بلوک سمت چپی وارد آمده آن را تا فاصله‌ی x_1 جابجا می‌کند. در این بازه‌ی زمانی فنر موجب می‌شود که بلوک سمت راستی تا فاصله‌ی x_2 جابجا شود.

همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد دو بلوک صلب هر کدام به جرم m بر روی سطح میز بدون اصطکاکی در حال سکون هستند. فنری با جرم ناچیز و ثابت نیروی k با آنها در تماس است. وقتی فنر در حال سکون است فاصله‌ی بین دو بلوک L می‌باشد. در بازه‌ی زمانی Δt نیروی ثابتی به بزرگی F به بلوک سمت چپی وارد شده و آن را تا فاصله‌ی x_1 جابجا می‌کند. در مدت این بازه‌ی زمانی بلوک سمت راستی تا فاصله‌ی x_2 به سمت راست جابجا می‌شود. بعد از

بازه‌ی زمانی Δt نیرو قطع می‌شود. بعد از قطع نیرو الف) سرعت مرکز جرم سیستم فنر و دو بلوک و ب) انرژی نوسانی کل رانسبت به مرکز جرم سیستم به دست بیاورید.

باز هم **مونگان** برای حل قسمت‌های الف و ب از معادلاتی بهره می‌برد که بیانگر کار مرکز جرم و کار ذره هستند. این معادلات برای حل هر قسمت از این مسئله به دو خط فرمول نیاز دارند در حالی که من حس می‌کنم این راه‌حل‌ها با به‌کارگیری معادلات اضافی انرژی‌گونه فرصت درک مفهومی را از دانشجو می‌گیرند. در رهیافت انرژی-تکانه برای حل قسمت الف قضیه‌ی ضربه-تکانه را به سیستم فنر و دو بلوک اعمال می‌کنیم. با تشخیص اینکه نیروی F در بازه‌ی زمانی Δt ثابت است، از معادله‌ی (۴) به دست می‌آید:

$$F \Delta t = (2m)(v_{CM} - 0) = 2mv_{CM} \quad (19)$$

در بازه‌ی زمانی Δt مرکز جرم سیستم فاصله‌ی $\frac{1}{2}(x_1 + x_2)$ را با شتاب ثابت می‌پیماید. بنابراین:

$$\Delta t = \frac{\frac{1}{2}(x_1 + x_2)}{v_{CM,avg}} = \frac{\frac{1}{2}(x_1 + x_2)}{\frac{1}{2}v_{CM}} = \frac{(x_1 + x_2)}{v_{CM}} \quad (20)$$

Δt را از معادله‌ی (۱۹) جایگذاری کرده، به دست می‌آوریم:

$$v_{CM} = \sqrt{\frac{F(x_1 + x_2)}{2m}} \quad (21)$$

برای یافتن انرژی نوسانی در قسمت ب ما CEE را به سیستم فنر و دو بلوک اعمال می‌کنیم. می‌دانیم که انرژی جنبشی سیستم می‌تواند به صورت $K = K_{CM} + K_{vib}$ بیان گردد که در آن انرژی نوسانی دو بلوک نسبت به مرکز جرمشان می‌باشد. پس CEE تبدیل می‌شود به:

$$\Delta K_{CM} + \Delta K_{vib} + \Delta U_{vib} = W \quad (22)$$

که در آن انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره‌شده در فنر در حالتی است که فاصله‌ی دو بلوک از هم غیر از L باشد. با تشخیص اینکه $K_{vib} + U_{vib} = E_{vib}$ و مقدار اولیه‌ی انرژی جنبشی مرکز جرم و انرژی نوسانی هر دو صفر می‌باشد این معادله به صورت زیر درمی‌آید:

$$K_{CM} + E_{vib} = Fx_1 \quad (23)$$

توجه کنید که کار انجام‌شده روی سیستم برابر با حاصل ضرب نیرو در جابجایی x_1 ، نقطه اثر این نیرو است. بنابراین:

$$E_{vib} = Fx_1 - K_{CM} = Fx_1 - \frac{1}{2}(2m)v_{CM}^2 \quad (24)$$

با جایگذاری v_{CM} از معادله‌ی (21) داریم:

$$E_{vib} = Fx_1 - \frac{1}{2}(2m) \left[F \frac{(x_1 + x_2)}{2m} \right] = F \frac{(x_1 - x_2)}{2} \quad (25)$$

باید تذکر داد هر سه مسئله‌ای که در بالا گفته شد درگیر نیروی ثابتی بودند که موجب می‌شد بازه‌ی زمانی Δt به آسانی محاسبه شود.

اگر نیروی وارد بر سیستم به طور مشخصی با زمان تغییر کند آنگاه رهیافت انرژی-تکانه سراسر باقی می‌ماند. انتگرال معادله‌ی (4) برای چنین نیرویی می‌تواند محاسبه شود. اگر نیرو به طور مشخصی با مکان تغییر کند راه‌حل پیچیده‌تر خواهد شد. به عبارت دیگر مسئله‌ای که درگیر یک سیستم چرخان یا تغییرشکل‌پذیر است و تحت تاثیر نیرویی که با مکان تغییر می‌کند به احتمال زیاد سطح‌اش از کلاس درس مقدماتی بالاتر خواهد بود. برای چنین مسئله‌ای اگر نیرو تابع خوش‌رفتاری از مکان باشد سیستم می‌تواند گسترش یافته و عاملی را دربر بگیرد که وارد کننده‌ی این نیرو است. اکنون نیرو، نیرویی داخلی در یک سیستم منزوی است و می‌توان آن به شکل انرژی پتانسیل درآورد. سپس می‌توان این سیستم منزوی را تحلیل کرد و راه‌حل را یافت.

۵-۶ نتیجه‌گیری:

رهیافت‌های انرژی برای مسائل، دانشجویان فیزیک را درگیر چالش می‌کند. این چالش‌ها بسیار دشوار خواهند شد اگر دیدگاه محدودی آنها چنین ارائه دهد که ابتدا از قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی استفاده کرده و بعد به نسخه‌های خاصی از این قضیه و معادلات اضافی انرژی گون ختم شود. وقت کلاس درس مکانیک مقدماتی به خوبی صرف بحث در معادله‌ی کلی پایستگی انرژی و کاربرد آن در تحلیل مسائل خواهد شد.

برای مسائلی که درگیر سیستم‌های چرخان یا تغییر شکل‌پذیر-اند استفاده از قضیه‌ی ضربه-تکانه به جای شبه‌کار، کارِ ذره و مُعادله‌ی مرکز جرم مزیت آشکاری دارد. استفاده از قضیه‌ی ضربه-تکانه به دانشجویان این اختیار را می‌دهد که اصلی از تکانه را که هم‌اینک آموخته‌اند همراه با CEE از رهیافت انرژی به کار ببرند بدون اینکه نیازی به مُعادلات اضافی انرژی‌گونه باشد.

۶- جوابیه‌ی مقاله

۶-۱ درباره‌ی تعریفی از کار^۱:

در مقاله‌ای که اخیراً منتشر شد **جان جویت جونپور** سعی کرد تعریف جدیدی از کار ارائه دهد. در نتیجه‌گیری‌اش نوشت: «برای روشن کردن تعریف کار در کتابهای درسی و ارائه‌های کلاسی می‌توان بیش از اینها صحبت کرد. این مباحث برای اجتناب از ناسازگاریهایی مفهومی لازم است و مانع از این می‌شود که عبارات و تعاریف قبلی را در شرایط جدید اصلاح کنیم». من چندان با این گفته موافق نیستم. از این رو به جای اختراع تعریف جدیدی از مفهوم نسبتاً قدیمی و خوش ساخت، از همان تعریف روشن و استاندارد بهره می‌برم که اکثر فیزیکدانان آن را پذیرفته‌اند. به عنوان مثال کتاب درسی فیزیک کلاسیک تالیف **هانس سی. آهانیان**^[25] را بردارید. کلی‌ترین تعریف از کار در صفحه‌ی ۱۶۸ فراهم شده است. در آنجا می‌توانیم بخوانیم «برای ذره‌ای که در امتداد یک مسیر داده‌شده از نقطه‌ی P_1 تا نقطه‌ی P_2 حرکت می‌کند کار کل برابر است با»:

$$W = \int_{P_1}^{P_2} F \cos\theta \, dr \quad (\text{معادله‌ی ۲۷ کتاب})$$

که در آن F نیرویی است که به عنصر dr وارد شده و θ زاویه‌ی بین F و dr است. انتگرال‌های معادلات (۲۸) و (۲۹) از کتاب، دو عبارت ریاضی معادل را برای کار فراهم می‌کنند. **هرکدام** از این معادلات می‌توانند برای محاسبه‌ی کار انجام‌شده توسط **هر نیرو** بر روی **یک ذره** و در **هر** پدیده‌ی فیزیکی به کار روند. وقتی بیش از یک نیرو داشته باشیم که بر یک ذره اثر می‌کنند **کار برآیند** تعریف می‌شود که برابر با کار انجام‌شده توسط نیروی برآیند روی آن ذره است. برای کامل کردن تعریف کار باید گفت کار انجام‌شده بر روی سیستم برابر است با مجموع کل کار برآیند انجام‌شده روی هر ذره‌ای که در سیستم هست (که می‌تواند بیانگر مجموعه‌ای از ذرات مختلف، چه از جسم جامد یا شیء تغییرشکل‌پذیر باشد). این موردی است که می‌توان هنر آموزش درس فیزیک مقدماتی را در آن یافت، روش‌هایی که معلّم می‌تواند مفهومی را بدون استفاده از دستگاه ریاضیاتی توسعه‌یافته معرفی کند. گذر سال‌ها ثابت کرد که تعریف زیر بسیار تاثیرگذار بوده است (که می‌توان آن را در صفحه‌ی ۱۶۵ کتاب درسی **آهانیان**^[25] یافت): «اگر نیروی ثابت F به ذره‌ای وارد شود کار انجام‌شده توسط این نیرو با جابجایی Δr روی ذره به صورت حاصل ضرب نیرو در طول جابجایی در کسینوس زاویه‌ی بین نیرو و جابجایی تعریف می‌شود». این تعریف روشن بوده و از نظر ریاضی با مرجع ۱ (صفحه‌ی ۳۸ کتاب) سازگار است و هیچ‌گونه تناقض پنهانی ندارد زیرا **فقط** برای یک شیء نقطه‌ای و یک نیروی ثابت به کار می‌رود. با شروع از این تعریف در حالت حرکت یک بُعدی (که در آموزش فیزیک مقدماتی مهم‌ترین حالت است) معلّم می‌تواند دانشجویان را وادارد که کار را همچون مساحت نمودار F بر حسب x درک کنند که تعمیم مهمی است در جهت یافتن کار نیروی متغیر (برای مثال نیروی کشسانی). به علاوه اگر قضیه‌ی کار-انرژی جنبشی به شیوه‌ی درستی بیان شود از آشفتگی بیشتر جلوگیری خواهد شد، یعنی «تغییر انرژی جنبشی برابر است با کاری که **نیروی برآیند** روی ذره انجام می‌دهد» (مرجع ۲ از صفحه‌ی ۱۷۱ همان

¹ On a Definition of Work; Letters to the Editor, The Physics Teacher, 46, May 2008

کتاب) (در حالت کلی تغییر انرژی جنبشی یک سیستم برابر است با کار برآیندی که روی سیستم انجام می‌شود). تمام مثال‌هایی که **جان جویت** در مقاله‌اش فراهم کرده است می‌تواند بر حسب تعریف کلاسیکی کار به روشنی توضیح داده شود. به ویژه در مثال او از شکل ۱ (فصل اول) می‌توان گفت کاری که دست انجام می‌دهد TL و کار برآیند روی قرقره برابر است با $TL \left(1 + \frac{r}{R}\right)$.

ولنتین وُرشیلف^۱

دانشگاه بستن، دپارتمان فیزیک

۲-۶ پاسخ جویت:

من از **دکتر وُرشیلف** به خاطر بازخورد-اش از مقاله‌ام سپاسگزارم. منظورم از تعریف کار این است که جابجایی در تعریف را سازگارانه به صورت نقطه اثر نیرو (به جای شیء یا ذره) شناسایی کنیم چون این تعریف **واحد** می‌تواند در تمام دوره‌ی آموزشی فیزیک به کار رود. این به هیچ‌وجه «تعریف جدیدی از کار» نیست. با نگاهی ژرف‌تر به متن «کلاسیکی‌ای» که ذکر شد - ویرایش دوم **فیزیک آهانیان** [25] - می‌توانیم نمونه‌های فراوانی را بیابیم که در آن جابجایی همانطوری شناسایی شده است که من پیشنهاد کردم. برای مثال **وایت**^۲ [26] را در نظر بگیرید: «کار همچون نیرو ضرب در فاصله‌ای تعریف می‌شود که در آن نیرو اثر می‌کند». یا **مرچانت**^۳ و **چانس**^۴ [27]: «کار دلالت بر کمیتی دارد که از راه ضرب کردن نیرو در فاصله به دست می‌آید، این فاصله در جهتی است که نیرو بر آن اثر می‌کند». و **استیوارت**^۵ [28]: «کار به صورت حاصل ضرب نیروی وارد در فاصله‌ای تعریف می‌شود که آن نیرو حرکت می‌کند». «کلی‌ترین تعریف از کار» که از **آهانیان** نقل شد در حقیقت به دلیل محدود شدن‌اش به کار انجام‌شده روی ذره به جای سیستم، کلی‌ترین تعریف نیست. **دکتر وُرشیلف** با اشاره به بسط تعریف ذره‌ای کار به سیستم می‌گوید که کار برآیند انجام‌شده روی سیستم برابر است با کار برآیند انجام‌شده روی هر ذره‌ای که در داخل سیستم است. برای سیستمی از گاز محصورشده در داخل دستگاه پیستون-سیلندر، ذرات گفته‌شده چه هستند؟ همه‌ی مولکولهای گاز یا لایه‌ی نازکی از آنها در زیر پیستون یا برخی زیر مجموعه‌های دیگر از آنها؟ در هر کدام از این حالات، محاسبه‌ی کار انجام‌شده با تعیین جابجایی‌های ذرات بسیار و جمع زدن کارها خیلی پیچیده‌تر است از محاسبه‌ی کار انجام‌شده توسط **یک** نیرو که بر گاز وارد می‌شود و **یک** جابجایی که از پیستون است.

جان جویت

پُمنای کالیفرنیا، دانشگاه پلی‌تکنیک کالیفرنیا

Valentin Voroshilov^۱

White^۲

Merchant^۳

Chance^۴

Stewart^۵

- [1] H. Erlichson, "Work and kinetic energy for an automobile coming to a stop," *Am. J. Phys.* 45, p. 769, Aug. 1977.
- [2] C. PENCHINA, "Pseudowork-energy principle," *Am. J. Phys.* 46, p. 295-296, March 1978.
- [3] B. Sherwood, "Pseudowork and real work," *Am. J. Phys.* 51, p. 597-602, July 1983.
- [4] A. Mallinckrodt and H. Leff, "All about work," *Am. J. Phys.* 60, p. 356-365, April 1992.
- [5] H. Leff and A. Mallinckrodt, "Stopping objects with zero external work: Mechanics meets thermodynamics," *Am. J. Phys.* 61, p. 121-127, Feb. 1993.
- [6] R. Chabay and B. Sherwood, "Bringing atoms into first-year physics," *Am. J. Phys.* 67, p. 1045-1050, Dec. 1999.
- [7] R. Jordan, "Work reworked," *Phys. Teach.* 40, p. 526-527, Dec. 2002.
- [8] J. Wetherhold, "Work reworked problem," *letter to the editor, Phys. Teach.* 41, p. 260, May 2003.
- [9] R. Mancuso, "Work and potential energy," *letter to the editor, Phys. Teach.* 41, p. 260, May 2003.
- [10] R. Jordan, "Work reworked, author response," *letter to the editor, Phys. Teach.* 41, p. 260-261, May 2003.
- [11] R. Weinstock, "Work reworked—reworked," *letter to the editor, Phys. Teach.* 41, p. 316, Sept. 2003.
- [12] C. Mungan, "A primer on work-energy relationships for introductory physics," *Phys. Teach.* 43, p. 10-16, Jan. 2005.
- [13] B. Sherwood and W. Bernard, "Work and heat transfer in the presence of sliding friction," *Am. J. Phys.* 52, p. 1001-1007, Nov. 1984.
- [14] R. Bauman, "Physics that textbook writers usually get wrong; I. Work," *Phys. Teach.* 30, p. 264-269, May 1992.
- [15] R. Serway and J. Jewett, "Physics for Scientists and Engineers, 7th ed," Belmont CA, Brooks/Cole, 2008.
- [16] R. Serway and J. Jewett, "Principles of Physics, 4th ed," Belmont CA, Brooks/Cole, 2006.

- [17] R. Chabay and B. Sherwood, "Matter & Interactions I: Modern Mechanics, 2nd ed," Hoboken, NJ, Wiley, 2007, p. Chap. 5.
- [18] G. Barrow, "Thermodynamics should be built on energy—not on heat and work," *J. Chem. Educ.* *65*, p. 122–125, Feb. 1988.
- [19] D. Keepports, "How does the potential energy of a rising helium-filled balloon change?," *Phys. Teach.* *40*, pp. 164-165, March 2002.
- [20] R. Romer, "Heat is not a noun," *Am. J. Phys.* *69*, p. 107–109, Feb. 2001.
- [21] R. Bauman, "Physics that textbook writers usually get wrong: II. Heat and energy," *Phys. Teach.* *30*, p. 353–356, Sept. 1992.
- [22] R. Baierlein, "Does nature convert mass into energy?," *Am. J. Phys.* *75*, p. 320–325, April 2007.
- [23] A. Arons, "Development of energy concepts in introductory physics courses," *Am. J. Phys.* *67*, p. Dec. 1999, 1063–1067.
- [24] C. Mungan, "Thermodynamics of a block sliding across a frictional surface," *Phys. Teach.* *45*, p. 288–291, May 2007.
- [25] H. C. Ohanian, "Physics, 2nd ed (expanded)," New York, W.W. Norton & Company, Inc., 1989.
- [26] H. White, "Introduction to College Physics," New York, Van Nostrand, 1968, p. 81.
- [27] F. Merchant and C. Chance, "Elements of Physics," Toronto, Copp Clark, 1936, p. 48.
- [28] O. Stewart, "Physics," Boston, Ginn, 1924, p. 91.