روی ترازوی فنری در داخل آسانسور: وقتی آسانسور شروع به سقوط کند چه رخ می‌دهد؟

یاسمینا بالوکویچ[1]، جوسیپ سلیسکو[2]، آدریان کورونا کروز[3]
ترجمهٔ احمد توحیدی

معمولاً نویسندگان کتاب‌های درسی فیزیک مفهوم بی‌وزنی (ظاهری یا واقعی) را با یک «آزمایش فکری» مطرح می‌کنند که در آن شخصی در یک آسانسور سقوط آزاد کند، باید ترازوی فنری که شخص روی آن ایستاده است وزن او را صفر نشان دهد. جر و بحث حل‌نشده‌ای دربارهٔ چگونگی این «خواندن صفر» در گرفته است. بعضی از شکل‌های کتاب‌ها، که اولین آن‌ها، کتابی از پرلمان در هشتاد سال پیش بود، نشان می‌دهد که هنوز شخص مدام با ترازو در تماس است؛ یعنی: «وزن صفر» پیامد این «واقعیت» است که شخص و ترازو گرچه در زمان سقوط در تماس‌اند، اما یکدیگر را فشار نمی‌دهند. شکل‌ها در کتاب‌های دیگر، از جمله آن‌هایی که ناسا تهیه کرده است، نشان می‌دهند که شخص و ترازو رو به بالا پرتاب شده‌اند و جداگانه در هوا شناورند. ما آزمایش‌های اولیهٔ بسیار ساده و مشابهی را با استفاده از یک «جعبهٔ افتان» متصل به یک دوربین ویدیوی خانگی انجام دادیم. نتایج حاصل نشان می‌دهند در آسانسوری که سقوط آزاد می‌کند، ترازوی واقعی به ندرت شخص را به بالا پرتاب می‌کند.

وزن و بی‌وزنی چیست؟

جر و بحث‌های کنونی دربارهٔ بی‌وزنی ناشی از اختلاف‌نظر نویسندگان کتاب‌های درسی دربارهٔ تعریف «علمی» از مفهوم وزنِ «گرانشی» یا وزن «عملیاتی» است. آن‌هایی که به تعریف گرانشیِ وزن (نیروی گرانشی وارد بر یک جسم) علاقه‌مندند، فرض می‌کنند که جسم در سقوط آزاد، هنوز وزن دارد، اما شاید بی‌وزن به نظر برسد؛ چون نمی‌تواند نیروی تماسی به جسم دیگر در سقوط آزاد (مثلاً ترازوی فنر) وارد کند. آن‌هایی که اصطلاح «وزن» را عملیاتی (نیروی تماسی با یک ترازوی فنری) تعریف می‌کنند بر «بی‌وزنی واقعی» تأکید دارند؛ زیرا در سقوط آزاد همهٔ اجسام در تماس با یکدیگر (در این مورد، شخص و ترازوی فنری) وقتی در حال سکون یا حرکت یکنواخت باشند بر اثر میدان گرانشی زمین تغییر شکلی پیدا نخواهند کرد.

نویسندگان کتاب‌های درسی در چگونگی مطرح کردن مفهوم بی‌وزنی واقعی یا ظاهری توافق بیشتری دارند. معمولاً از یک «آزمایش فکری» استفاده می‌شود که در آن شخصی در یک آسانسور با استفاده از ترازویی فنری وزن خود را اندازه می‌گیرد. وقتی آسانسور در حال سکون باشد یا با سرعت ثابت حرکت کند، ترازو «وزن واقعی» ($W_{\text{واقعی}}$) را برابر نیروی گرانشی وارد بر شخص نشان می‌دهد. حرکت‌های شتابدار مختلف آسانسور در

راستای قائم به «وزن‌های ظاهری» ($W_{\text{ظاهری}}$) متفاوت می‌انجامد. وقتی که آسانسور شتاب رو به بالا دارد، $W_{\text{واقعی}} > W_{\text{ظاهری}}$، وقتی که آسانسور شتاب رو به پایین دارد $W_{\text{واقعی}} < W_{\text{ظاهری}}$ است. اگر کابل آسانسور پاره شود شخص شوربخت درمی‌یابد که وزن ظاهریش صفر است.

برای نویسندگان کتاب‌های درسی احتمالاً استفاده از معادله قانون دوم نیوتون در چارچوب مرجعی که ناظر روی زمین قرار دارد، جذاب‌تر از احساس عجیبی است که بسیاری از شاگردان دربارهٔ معنای شرایط از دیدگاه عقل سلیم دارند. اگرچه نویسندگان کتاب‌های درسی مختلف دربارهٔ خواندن صفر ترازوی فنری در سقوط آزاد توافق دارند، اما در مورد شرایط شخص داخل آسانسور در حال سقوط آزاد اتفاق نظر ندارند. پیش از آنکه به بیان شکل‌هایی بپردازیم که خلاف این تفسیر را نشان می‌دهند مشاهدهٔ چشم‌انداز تاریخی و جهانی آن آموزنده است.

پرلمان و بی‌وزنی اجسام در سقوط آزاد

یاکوف ایسیدروویچ پرلمان[۴]، (شکل ۱) پرکارترین نویسندهٔ روسی کتاب‌های فیزیک، نجوم و ریاضی برای همگان بود. کتاب‌هایش به بسیاری از زبان‌ها ترجمه شد و میلیون‌ها نسخه از آن‌ها در سراسر جهان به فروش رسید.

پرلمان مجذوب بی‌وزنی اجسام در سقوط آزاد بود. در اواخر قرن نوزدهم، برای نویسندگان روسیِ کتاب‌های درسی «نیروی گرانی» با «فشار» وارد از جسم به تکیه‌گاه تفاوتی مفهومی داشت. آن‌ها «فشار» را «وزن» می‌نامیدند. پرلمان در این محیط اصطلاح‌شناختی پدیده‌های شگفت‌انگیز بی‌وزنی را واقعی در نظر گرفت و در سه کتاب *فیزیک جذاب* (۱۹۱۳/۱۲۹۲)، *سفرهای میان‌سیاره‌ای* (۱۹۱۵/۱۲۹۴) و *آیا فیزیک می‌دانید؟* (۱۹۳۴/۱۳۱۳) خوانندگان را در سرگرمی‌هایش شریک کرد.

یک خوانندهٔ دقیق با مقایسه چاپ‌های مختلف این کتاب‌ها درمی‌یابد که پرلمان به یاد گرفتن بیشتر نمایش‌های تجربی بی‌وزنی در سقوط آزاد بسیار علاقه‌مند بود. انتخاب نمایش‌هایش کمی شگفت‌انگیز است. در کتاب *سفرهای میان‌سیاره‌ای* تغییرهای گوناگونی را در بخش «بی‌وزنی جسم در حال سقوط» می‌بینیم که سرانجام توصیف چند نمایش بی‌وزنی با ابزارهای سقوط آزاد در اختیار می‌گذارد. این نمایش‌ها که برای استفاده در کلاس طراحی شده بودند در سال (۱۹۳۸/۱۳۱۷) توسط پروفسور نیکلای الکسیویچ لیوبیمو[۵] از دانشگاه دولتی مسکو انجام شد.

در کتاب *آیا فیزیک می‌دانید؟* پرلمان برداشتی مفهومی از بی‌وزنی در جهان متفاوت «آزمایش‌های فکری» را مطرح کرد. یعنی، پرسشی دو قسمتی (شماره ۵۳) که به رویداد داخل یک آسانسور در حال سقوط مربوط است (شکل ۲).

پرسش ۵۳ به این صورت است: «شما روی یک ترازوی فنری در اتاقک آسانسوری ایستاده‌اید (شکل ۲). ناگهان، کابل آسانسور پاره می‌شود و اتاقک با سرعت جسم در سقوط آزاد فرو می‌افتد.

الف. ترازوی فنری در طی سقوط چه عددی را نشان می‌دهد؟

ب. آیا در مدت سقوط آب از دهانهٔ یک تنگ وارونه به بیرون جریان پیدا می‌کند؟

جواب‌های پرلمان به این صورت بودند:

الف. «ترازوی فنری عدد صفر را نشان می‌دهد، بدن شما فنر ترازو را نمی‌فشارد.

ب. آب از تنگ وارونه به بیرون جریان پیدا نمی‌کند».

شایان توجه است که نه ترازو و نه کف اتاقک آسانسور شخص را به بالا پرتاب نمی‌کنند.

پس از گذشت هشتاد سال، چه سرنوشتی در انتظار ایده پرلمان دربارهٔ جزئیات ظریف این «آزمایش فکری» است؟ آیا این ایده پذیرش عام یافته است یا ایده‌های رقیب در «بازار آموزشی» مطرح شده است؟

کتابچه‌های آموزشی ناسا دربارهٔ شرایط شخص در آسانسور در حال سقوط

همه می‌دانند که ناسا به افکار عمومی دربارهٔ خود بسیار اهمیت می‌دهد و همیشه به کار روی ارتقای جنبهٔ آموزشی پژوهش‌های ریزگرانی خود مشغول است. درواقع، مربیان ناسا چند نمایش بی‌وزنیِ در حال سقوط را به‌ویژه برای اجرا در کلاس طراحی کرده‌اند. پیشنهادهای آموزشی به معلمان نشان می‌دهند که ناسا علاقه‌مند است دانش‌آموزان پدیده‌های بی‌وزنی را فعالانه بیاموزند (برای مثال، شاگردان باید بتوانند نتیجه آزمایش را پیش از انجام آن پیش‌بینی کنند).

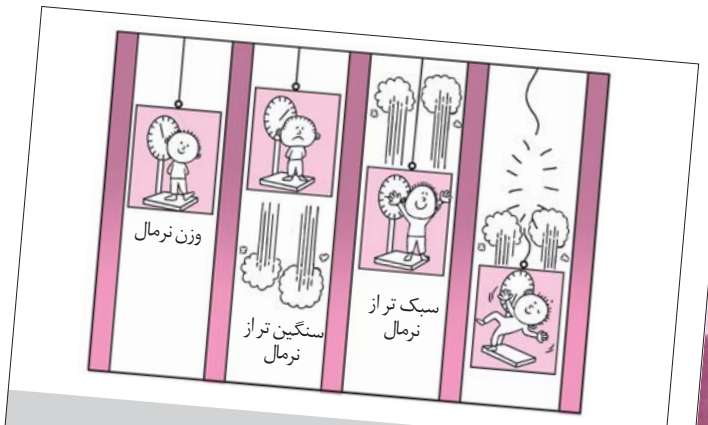
طبق آنچه گفته شد، طبیعی است ببینیم ناسا دربارهٔ وضعیت شخص در آسانسور وقتی سقوط آزاد را شروع می‌کند چه می‌گوید. طرح‌های هنرمندانه‌ای در انتشارات ناسا نشان می‌دهند که وضعیت شخص در آسانسور در حال سقوط (شکل‌های ۳ و ۴) با نظر پرلمان کاملاً فرق دارند. طبق این ایده، شخص و ترازو باید هنگام شروع به سقوط آسانسور رو به بالا پرتاب شوند.

با وجود این در سازمان ناسا هم عده‌ای موافق رویکرد پرلمان هستند؛ مثلاً یادداشت کوتاه هشداردهنده‌ای در «ریزگرانی: گرفتار ریاضیات می‌شوید» حاکی از آن است که: «این شکل گمراه‌کننده است. شخص و ترازو هم‌زمان شناور نمی‌شوند. شخص برای شناور شدن باید بالا بپرد».

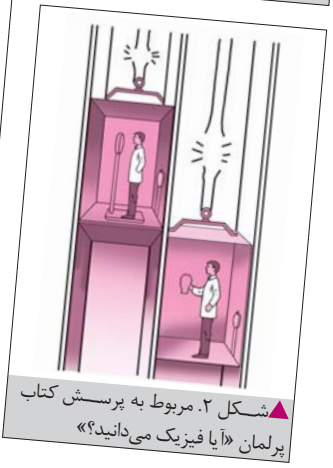
تصویرهای کتاب‌های درسی فیزیک دربارهٔ شخصی که در آسانسور سقوط آزاد می‌کند

تصویرهای کتاب‌های درسی فیزیک نشان می‌دهند که

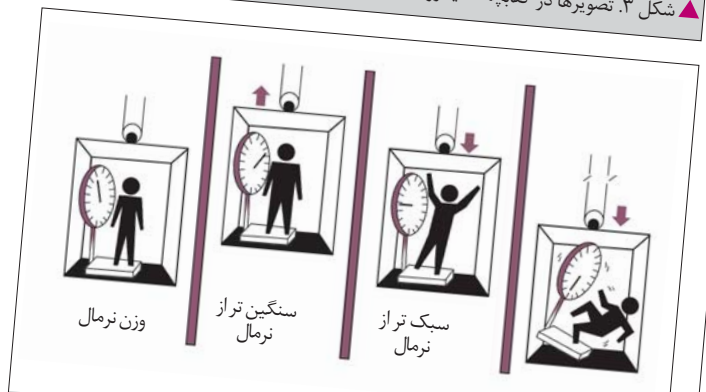
شکل ۱. یاکوو ایسیدروویچ پرلمان (۱۲۶۱ ـ ۱۳۲۱) / (۱۸۸۲ ـ ۱۹۴۲)



شکل ۳. تصویرها در کتابچه «میکروگرانش»



شکل ۲. مربوط به پرسش کتاب پرلمان «آیا فیزیک می‌دانید؟»

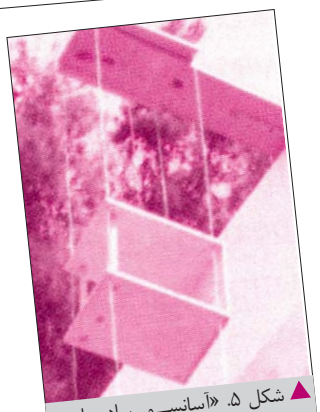


شکل ۴. تصویرها در کتابچه «میکروگرانش»

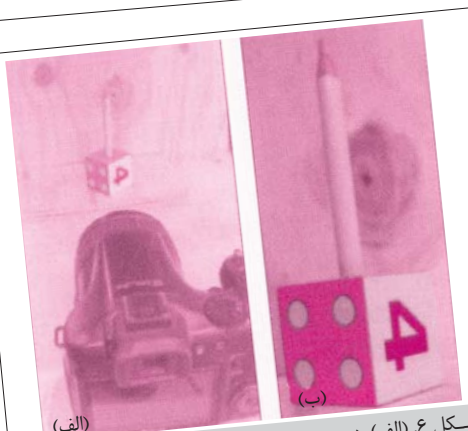
نویسندگان دربارهٔ وضعیت شخص هنگامی که آسانسور شروع به سقوط می‌کند اختلاف‌نظر دارند. بعضی از تصویرها تکرار هنرمندانهٔ تصویرهای ناسا دربارهٔ این ایده است که شخص و ترازو باید به بالا پرتاب شوند. دیگر کتاب‌ها تصویرهایی شبیه چیزی را دارند که تا جایی که می‌دانیم، برای نخستین بار در کتاب پرلمان ظاهر شده است (شکل ۲). نویسندگان این کتاب‌های درسی فکر می‌کنند احتمال اینکه شخص پس از سقوط هنوز روی ترازو ایستاده باشد بیشتر است. حتی می‌توان یک کتاب درسی را یافت که تصاویر آن برخلاف شکل دوم کتاب پرلمان، زنی باشد که روی ترازو، کف آسانسور ایستاده است و وقتی که آسانسور شروع به سقوط آزاد می‌کند به بالا پرتاب شده است.

آیا این اختلاف‌نظر در مورد یک پرسش نه‌چندان مهم به دیدگاه‌های شخصی چند نویسنده کتاب‌های درسی مربوط است؟ پاسخ ما به دو دلیل منفی است: نخست، محتوای کتاب‌های درسی چاپ‌شده نه فقط بازتاب دیدگاه‌های نویسندگان نیست، بلکه دست‌کم بخشی از دیدگاه‌های جامعه آموزش فیزیک را نیز در نظر می‌گیرد؛ برای مثال، بسیاری از استادان با درجه دکتری فیزیک و تجربه آموزشی قابل ملاحظه‌ای که دارند، معمولاً محتوای کتاب‌های درسی را در مواقع مختلف (پیش از انتشار، آزمون میدانی و فرایند انتخاب برای استفاده دانش‌آموزان و چاپ‌های جدید) بازنگری و تصویب می‌کنند. دلیل دیگر، که بسیار مهم‌تر است به این ایدهٔ کتاب درسی مربوط می‌شود که شاگردان این موضوع را که اجسام سنگین «به‌طور طبیعی» در دستگاه‌های سقوط آزاد به بالا پرتاب می‌شوند پذیرفته‌اند.

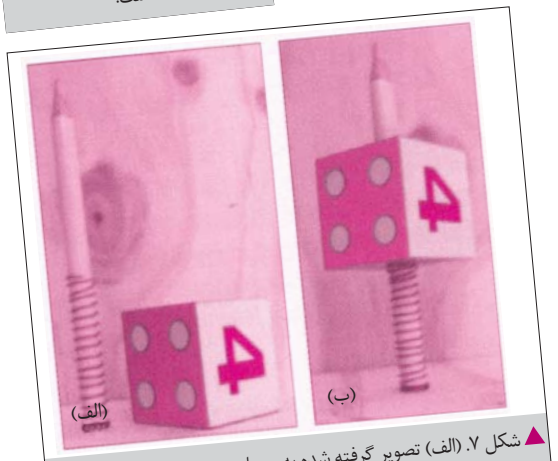
آن‌ها از این موضوع در کارهای توصیفی در رویکردهای آموزش فعال بی‌وزنی استفاده می‌کنند؛ برای مثال، آن‌ها می‌گویند آب از یک بطری در حال سقوط آزاد با یک سوراخ به خارج جریان پیدا نمی‌کند؛ زیرا آب از سوراخ به طرف بالا حرکت می‌کند. اگرچه نحوه بیان‌های دقیق متنوع‌اند، اما اساس استدلالشان این است: آزمایش با آسانسور در حال سقوط نشان می‌دهد که در سقوط



▲ شکل ۵. «آسانسور ساده‌سازی شده». گوی فلزی سنگین و فنر، در قسمت‌های پایین‌تر فنرها در عکس نشان داده نشده است.



▲ شکل ۶. (الف). دوربین ویدیو و مکعب. (ب) تصویر گرفته شده به وسیله دوربین از مکان اولیه مکعب وقتی که مکعب در حال سکون است. جعبه در سقوط آزاد است. محل جعبه تغییر نمی‌کند.



▲ شکل ۷. (الف) تصویر گرفته شده به وسیله دوربین از فنر بدون مکعب روی آن. (ب) تصویر گرفته شده به وسیله دوربین از فنر با مکعب روی آن.

▲ شکل ۸. حرکت‌های عمودی مکعب و فنر داخل جعبه در حال سقوط. دوربین تصویر ۳۰۰ قاب را در هر ثانیه می‌گیرد. چون دهمین قاب از این سری‌های متوالی را انتخاب کرده‌ایم. فاصله زمانی بین تصویرهای متوالی $\frac{۱}{۳۰}$ ثانیه است.

آزاد همهٔ اجسام داخل آسانسور رو به بالا حرکت می‌کنند.

مشکل چگونه حل می‌شود؟

اگر بحث و گفت‌وگو دربارهٔ نتیجهٔ یک آزمایش واقعی باشد، فیزیک‌دان‌ها معمولاً سعی می‌کنند آزمایش‌های بهتری را طراحی و اجرا کنند؛ چون جر و بحث بالا به یک «آزمایش فکری» مربوط می‌شود، سازنده است که از ارنست ماخ[۶]، کسی که برای اولین بار این عبارت «آزمایش فکری» را وضع کرد نکته‌هایی را بیاموزیم. او با در نظر گرفتن شرایط فرضی با پیامدهای نامطمئن، آنچه در زیر می‌آید را بیان کرد:

«نتیجهٔ یک آزمایش فکری، و این موضوع که از نظر ذهنی شرایط مختلف می‌توانند به حدی تعیین‌کننده و قطعی به نظر برسند که نویسنده‌ای به درستی یا نادرستی احساس کند توانایی آن را دارد که آزمون‌های بیشتر با یک آزمایش فیزیکی را کنار بگذارد. به هر حال، هرچه نتیجهٔ آزمایش نامطمئن‌تر باشد، آزمایش‌های فکری توانمندتر، پژوهشگر را وا می‌دارد تا به‌عنوان یک پیگیری طبیعی آزمایش فیزیکی را برای تکمیل و تعیین نتیجه دنبال کند».

چون امکان استفاده از آسانسوری که در برخورد با زمین مقاوم باشد و شخص شجاعی را که مایل به قبول خطر درگیر شدن در آزمایشی مشابه شکل‌های مورد بحث باشد، نداشتیم مجبور شدیم در پی رویکرد متفاوتی باشیم. بنابراین ناچار به در نظر گرفتن نکته‌های زیر شدیم:

- بادکنک بادشده‌ای که با وزنهٔ یک کیلوگرم روی آن تغییر شکل یافته است، در سقوط آزاد وزنه را رو به بالا پرتاب می‌کند.
- بسیار محتمل است که یک سطح سخت (سفت) با یک تغییر شکل ناچیز بتواند در حال سکون جسمی که روی آن سقوط آزاد می‌کند را به بالا پرتاب کند.
- یک ترازوی واقعی نه بادکنک بادشده است نه یک سطح سخت.

ابتدا به فکر افتادیم که آزمایش را با یک ترازوی واقعی انجام دهیم. ترازوی انتخاب‌شده بایستی این ویژگی را داشت که

سرانجام در سقوط آزاد «به بالا بجهد». بنابراین باید خیلی محکم بود تا در آزمایش آسیب نبیند. چون چنین ترازویی را پیدا نکردیم. بنابراین تصمیم گرفتیم شرایط را تا حد امکان ساده کنیم.

ساده‌سازی‌های اساسی پاسخ‌های نویدبخشی به دست داد

«آسانسور ساده‌سازی شده»

نقش «آسانسور در سقوط آزاد» را یک جعبه چوبی دست‌ساز و باز اجرا کرد (شکل ۵). ابعاد آن ۲۵cm × ۴۰cm × ۳۵cm بود. جعبه از ارتفاع ۲/۶ m فرو افتاد و سقوط آن با چهار ریسمان تنظیم شد. گوی سنگینی که به انتهای هر یک از ریسمان‌ها متصل شده بود کمک کرد حرکت جعبه تقریباً نزدیک به سقوط آزاد باشد. برای اینکه سرعت جسم کاهش یابد و از برخورد خردکنندهٔ آن با زمین جلوگیری کند هر ریسمان پیش از اتصال به گوی، از فنری قوی عبور می‌کرد.

«شخص ساده‌سازی شده» روی یک کف سخت

جسم انتخابی برای «ساده‌سازیِ» شخص یک مکعب چوبی (جرم ۱۸g و هر ضلع ۳/۴ cm) بود. یک مداد رنگی (به طول ۱۴cm) به کف جعبهٔ افتان متصل شده بود تا «راهنمای» حرکت‌های عمودی نهایی مکعب در سقوط آزاد باشد. قطر سوراخ روی مکعب (۸mm) بزرگ‌تر از قطر مداد (۷mm) بود، بنابراین هیچ نیروی اصطکاکی بین مکعب و مداد به وجود نمی‌آورد. یک دوربین ویدیو به کف جعبه متصل شده بود تا شاهد رفتار مکعب در سقوط آزاد باشد [شکل ۶ (الف)]. تصویر مکان اولیه مکعب در زمان ساکن بودن جعبه، که دوربین گرفته است، در شکل ۶ (ب) دیده می‌شود.

ضبط‌های ویدیویی گوناگون که دوربین متصل به جعبهٔ در حال سقوط گرفته است، نشان می‌دهند که مکعب وقتی جعبه در سقوط آزاد است حرکت نمی‌کند. به عبارت دیگر، مکعب چه جعبه بی‌حرکت باشد یا در حال سقوط آزاد، روی کف جعبه ساکن می‌ماند. پس احتمال بسیار دارد شخصی که روی کف سخت یک آسانسور ایستاده است در سقوط آزاد به بالا پرتاب نشود. همین نتیجه‌گیری برای ترازوهای واقعی معتبر است؛ زیرا فنر داخلی آن‌ها در فرایند اندازه‌گیری وزن بسیار کم تغییر شکل می‌دهند (ترازو مشابه یک کف سخت عمل می‌کند).

«شخص ساده‌سازی‌شده» روی «ترازوی ساده‌سازی‌شده»

برای یک ترازوی بسیار ساده‌سازی‌شده از یک فنر کشسان (به طول ۵cm) استفاده کردیم. می‌دانستیم این طرح (بسیار ساده) برای یک ترازو، دشوار می‌تواند شبیه یک ترازوی واقعی عادی رفتار کند. فنر بین مکعب و کف جعبه قرار داده شد. مداد، در سقوط آزاد، حرکت عمودی پایانی «شخص ساده‌سازی‌شده» و «آسانسور ساده‌سازی‌شده» را هدایت می‌کرد. تصویرهای اولیه دوربین از ترازو (فنر) بدون یا همراه با شخص (مکعب) که روی آن نصب شده است به ترتیب در شکل ۷ (الف) و (ب) دیده می‌شوند. همان‌طور که انتظار داشتیم جعبه چوبی آشکارا فنر را تغییر شکل داد. رفتار مکعب در سقوط آزاد خیلی تفاوت داشت. مکعب با سرعت ثابت به بالا پرتاب شد (نسبت به چارچوبی که در سقوط آزاد همراه آن بود). فنر هم رو به بالا پرتاب شد و درواقع به‌طور فیزیکی از کف جعبه جدا شد (شکل ۸).

چرا رفتار مکعب روی کف سخت و روی فنر فشرده متفاوت است؟

وقتی جعبه ساکن باشد، نیروی گرانشی رو به پایین وارد بر مکعب با نیروی کشسانی رو به بالای فنر متوازن می‌شود. این نیروها را کف تغییر شکل یافتهٔ جعبه یا فنر فشرده اعمال می‌کنند. با وجود این، به علت سطح‌های تغییر شکل متفاوت (که برای کف و نامشهود برای فنر کاملاً مشهود است)، انرژی‌های پتانسیل مربوط به تغییر شکل‌ها کاملاً متفاوت‌اند. انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره‌شدهٔ مشهود در فنر فشرده بسیار بزرگ‌تر از تغییر شکل فوق‌العاده کم کف سخت جعبه است.

وقتی در سقوط آزاد، مکعب بی‌وزن می‌شود (در دستگاه مرجع متصل به جعبه)، انرژی پتانسیل کشسانی به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. اگر انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره‌شده عملاً صفر باشد، چنان‌که برای کف سخت روی می‌دهد، برای مکعب هیچ انرژی جنبشی باقی نمی‌ماند. به بیان دیگر، مکعب بدون حرکت روی کف باقی می‌ماند. برعکس، برای فنر فشرده، انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره‌شده صفر نیست؛ بنابراین، مکعب در سقوط آزاد انرژی جنبشی به دست می‌آورد و به بالا حرکت می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند که اصولاً باید شخص و ترازوی داخل آسانسور در سقوط به بالا پرتاب شوند. با وجود این چنین حادثه‌ای باید فقط در مورد ترازوهایی روی دهند که بتوان درست و حسابی آن را به‌صورت فنری ساده با جرم کم مدل‌سازی کرد. اما فکر می‌کنیم احتمال وجود چنین فنرهایی در جهان بسیار کم است. بنابراین، شخص و ترازو می‌توانند فقط در جهان موهومی «آزمایش‌های فکری» به بالا پرتاب شوند. در چنین جهانی داخل یک آسانسور در سقوط آزاد فضایی محدود بدون میدان گرانشی است (اصل هم‌ارزی اینشتین)، یعنی اجسام پرتاب‌شده نمی‌توانند حرکت لَخت رو به بالایشان را «به اختیار» متوقف کنند و در وسط آسانسور شناور بمانند. در نتیجه، شخص و ترازو به ناچار به سقف آسانسور برخورد می‌کنند و به پایین باز می‌گردند.

A Person Stands on a Balance in an Elevator: What Happens When The Elevator Starts to Fall?

پی‌نوشت‌ها

1. *Jasmina Balukovic*
2. *Josip Slisko*
3. *Adrian Corona Cruz*
4. *Yakov Isidrovich Perelman*
5. *Nikolay Alekseevich Lyubimov*
6. *Ernest Mach*

مرجع

THE PHYSICS TEACHER. VOL, 56, MARCH 2018.