آموزشی

نیروی گریز از مرکز؛ واقعی یا تخیلی؟

آرش ظهوریان پردل

مقدمه

«سطل پر آبی را که به طنابی بسته‌ایم، بر صفحه‌ای عمود بر زمین، به دور خود می‌چرخانیم. اگر آن را با سرعت مناسبی بچرخانیم، ملاحظه خواهیم کرد که حتی در بالاترین نقطهٔ مسیر (که سطل کاملاً در حالت وارونه قرار گرفته است) آب درون آن به زمین نمی‌ریزد. در عوض، آب به ته سطل فشرده می‌شود. چرا چنین است؟»

بدون شک اکثر ما بارها اصطلاح «گریز از مرکز» را از زبان افراد مختلف شنیده‌ایم؛ و این مفهومی است که در علم فیزیک، هیچ‌گونه جایگاه و تعریفی ندارد (که در ادامه، به دلایل و چرایی آن خواهیم پرداخت) البته به کار بردن این اصطلاح از جانب اشخاصی که با فیزیک آشنا نیستند، چندان شگفت‌انگیز نیست، و اساساً هم نباید از چنین افرادی توقع توصیف درست و اصولی این موضوع را داشته باشیم. اما مسئله زمانی بغرنج می‌شود که می‌بینیم دانش‌آموزان دبیرستانی، و حتی بسیاری از دانشجویان رشته‌های فنی - مهندسی و علوم پایه، به‌وجود چنین نیرویی اعتقاد دارند و تلاش می‌کنند در محاسبه‌ها و تشریح پدیده‌های حرکتی، جایی برای آن پیدا کنند. چنین واقعیتی، نشان از تصور نادرست و سطحی از فیزیک دارد؛ تصویری که اصولاً از سال‌های دبیرستان در دانش‌آموزان به‌وجود می‌آید.

کلیدواژه‌ها: نیروی گریز از مرکز، نیروی واقعی، نیروی تخیلی، قانون‌های نیوتون

بسیاری از دانش‌آموزان، از دورهٔ دبیرستان، با سه قانون نیوتون دربارهٔ حرکت آشنا می‌شوند و احتمالاً تعریف هر کدام را نیز تا سال‌های بعد در حافظهٔ خود ثبت می‌کنند؛ اما این‌ها تعاریفی است عموماً کلیشه‌ای که بدون آگاهی دانش‌آموزان از معنای عمیقی که در پس هر یک وجود دارد، به صورتی تکراری و نامفهوم، در ذهنشان شکل می‌گیرد. می‌دانیم که بیشتر آنچه ما امروز به‌عنوان مکانیک کلاسیک می‌شناسیم، مرهون دستاوردهای گالیله و نیوتون است. اما عدم درک روند تاریخی پژوهش‌های گالیله و نیوتون، که برخلاف اندیشهٔ ارسطویی، دربارهٔ حرکت بود، خود عاملی است که باعث می‌شود در حالی که دانش‌آموزان و دانشجویان با قوانین حرکت آشنایی پیدا می‌کنند، از درک صحیح آن‌ها و نیز توانایی به‌کارگیری آن‌ها در توجیه و توضیح پدیده‌های طبیعی عاجز بمانند. در نظر دانش‌آموزان با دانشجویان، علم فیزیک عموماً در یک رشته رابطه‌های ریاضی و تعریف‌های بدیهی خلاصه می‌شود، بدون آنکه آن‌ها بتوانند پیوستگی‌های مفهومی و فراز و نشیب‌های تاریخی این موضوع را درک کنند. مطرح شدن مفاهیم و اصطلاحاتی نظیر «نیروی گریز از مرکز» از جانب ایشان نیز گواه بر این است که نظام آموزشی ما (اعم از معلمان و مدرسان، کتاب‌های درسی و روش‌های آموزشی) در تغییر تفکر و ایجاد نگرشی صحیح نسبت به قوانین علم مکانیک در دانش‌آموز، ناکارآمد و ناتوان است.

در این مقاله تلاش بر این است تا یکی از همین کژفهمی‌ها یا سوءتفاهم‌هایی را که متأسفانه در کتاب‌های درسی، نشانی از توضیح و حتی اشاره‌ای به آن نمی‌بینیم، تشریح و تحلیل کنیم.

ارسطو، فیلسوف و طبیعی‌دان مشهور یونان باستان، عقیده داشت که «نیرو موجب حرکت می‌شود.» شاید در بدو امر، چنین عبارتی برای ما بدیهی جلوه کند؛ همان‌طور که اگر صندلی چرخدارمان را هل دهیم، حرکت می‌کند و چنانچه از اعمال نیرو خودداری کنیم، از حرکت باز می‌ایستد. یا هنگامی که سوار دوچرخه می‌شویم، تا وقتی که رکاب می‌زنیم، دوچرخه به جلو رانده می‌شود و اگر رکاب زدن را متوقف کنیم دوچرخه نیز از حرکت باز خواهد ایستاد و... . البته در زمان خود ارسطو، مثال‌هایی مطرح می‌شد که با این نظریه ناسازگار بود. از آن جمله می‌توان به پرتاب شدن تیر از چلهٔ کمان اشاره کرد: پس از رها شدن تیر، دیگر نیرویی به آن وارد نمی‌شود؛ پس چرا تیر به حرکت خود ادامه می‌دهد؟ ارسطو برای توجیه چنین پدیده‌ای، استدلال خاصی داشت. او می‌گفت، هوا از نوک پیکان به سوی انتهای تیر حرکت و این هوای فشردهٔ انتهای تیر اسباب حرکت تیر را فراهم می‌کند. به هر حال، جدا از این توجیه‌های عجیب، نفس پرداختن ارسطو به حرکت و علت حرکت قابل توجه است.

پس از چندین سده، گالیلئو گالیله و سپس سِر آیزاک نیوتون، تعاریفی کاملاً متفاوت و تازه ارائه کردند که حاصل دستاوردشان (که آن را به نام «مکانیک کلاسیک» می‌شناسیم)، نه‌تنها تصحیح و تغییر نگرش ارسطویی بلکه تبیین اصولی مدون به نام «روش علمی» بود که تا پیش از آن سابقه نداشت.

مکانیک گالیله و نیوتون بیانگر این واقعیت است که سکون و حرکت یکنواخت (حرکتی که در آن، جهت و مقدار سرعت ثابت بماند) نیاز به دلیلی ندارد. به بیان دیگر، مطابق قانون لختی گالیله (و یا با اندکی تفاوت، قانون اول نیوتون) اجسام تمایل دارند که اگر ساکن هستند، در همان وضعیت سکون بمانند و اگر حرکت می‌کنند، به همان حرکت با سرعت ثابت ادامه دهند. این ویژگی را اینرسی یا لختی می‌نامیم که البته کسی دلیل این ویژگی اجسام مادی را نمی‌داند.

(توجه کنیم که یکی از دستاوردهای ارزندهٔ گالیله، این بود

که نتیجه گرفت میان سکون و حرکت یکنواخت، تفاوتی وجود ندارد، بلکه آنچه اهمیت دارد چارچوبی است که نسبت به آن به رویدادها نگاه می‌کنیم. به‌عبارت دیگر، بیان اینکه «فلان جسم ساکن است» و یا «فلان جسم با سرعت ثابت حرکت می‌کند»، بی‌معناست، مگر مشخص شود که نسبت به کدام چارچوب لخت سنجیده می‌شود. این واقعیت، کلید فهم نسبیّت خاص اینشتین محسوب می‌شود. اما آنچه را که ما در اینجا دربارهٔ سکون و حرکت یکنواخت مطرح می‌کنیم می‌توان نسبت به زمین در نظر گرفت؛ چارچوبی که با اندکی اغماض، می‌تواند به‌عنوان چارچوب لخت در نظر گرفته شود.

نتیجه آنکه، برای حرکت الزاماً به نیرو نیاز نداریم. این تصحیح را در قانون دوم نیوتون می‌توان مشاهده کرد. مطابق قانون دوم نیوتون: «نیرو موجب تغییر حرکت می‌شود» و نه خود حرکت. همچنین «نیرو در راستای تغییر حرکت است» و نه الزاماً در راستای حرکت. بنابراین، عباراتی مانند: «علت حرکت چیست؟» و یا «مطالعهٔ علل حرکت»، از منظر مکانیک نیوتونی، عباراتی نادرست است و باید از به‌کار بردن آن‌ها پرهیز کرد.

***

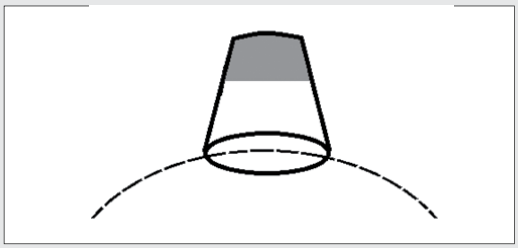
حال می‌خواهیم به اهمیت تفکیک «احساس» و «قانون فیزیکی» بپردازیم. فرض کنید درون ماشین در حال حرکتی نشسته‌اید و راننده ناگهان ترمز می‌کند. شما احساس خواهید کرد که به جلو پرتاب شده‌اید. اما آیا نیرویی شما را به جلو پرتاب کرده است؟ خیر! احساس ما و قانون‌های فیزیک، الزاماً بر هم منطبق نیستند! از نظر شما، گویی نیرویی رو به جلو بر اندامتان وارد شده است، در حالی که توضیح این اتفاق توسط علم فیزیک، صرفاً با کمک قانون اول نیوتون قابل توجیه است: بدن شما تمایل دارد حتی پس از ترمز نیز به حرکت ادامه دهد، در حالی‌که بدنه یا چارچوب خودرو، از حرکت باز ایستاده است. به همین دلیل است که «احساس می‌کنید» نیرویی بر شما اعمال شده است.

مثال دیگری را در نظر بگیرید: در آسانسوری ایستاده‌اید و ناگهان آسانسور به بالا حرکت می‌کند و در نتیجهٔ آن، «احساس می‌کنید» نیرویی شما را به کف آسانسور می‌فشارد، در حالی‌که مطابق قوانین مکانیک، هیچ نیروی پایین‌سویی به شما وارد نشده است و این «احساس» شما، باز هم به راحتی توسط قانون نخست مکانیک، توضیح داده می‌شود. (مثال اخیر، در تبیین نسبیت عام اینشتین، نقش بسیار مؤثری ایفا کرد).

توجه به این اصل مهم حیاتی است که اگر بخواهیم برای به جلو پرتاب شدنمان در ماشین، به یک نیروی تخیلی روی بیاوریم، دیگر باید از عضویت در تیم گالیله و نیوتون استعفا دهیم، چراکه در واقع فیزیک جدیدی را برای خودمان خلق کرده‌ایم، که طبعاً کاری نامعقول است.

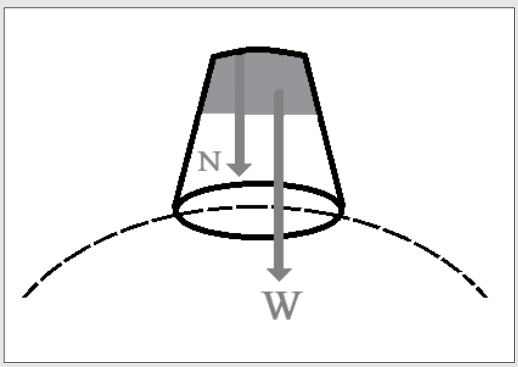
***

با توجه به آنچه گفته شد، حال می‌توانیم به نیروی گریز از مرکز بپردازیم: این نیرو از جمله نیروهای تخیلی است. به بیان دیگر، اگر می‌خواهیم از مکانیک کلاسیک بهره بگیریم، باید فکر وجود چنین نیرویی را از سر بیرون کنیم. در غیر این صورت، نوع نگرش و استدلالمان، با ارسطوییان تفاوتی نخواهد داشت. برای تشریح این موضوع، مثال سطل پر آب را با هم بررسی می‌کنیم. در بالاترین نقطهٔ این مسیر دایره‌ای که صفحهٔ آن بر زمین عمود است، با چنین وضعیتی مواجه‌ایم: (شکل ۱)



برای کسی که فیزیک نمی‌داند، بی‌درنگ این پرسش مطرح می‌شود که «چرا آب درون سطل بیرون نمی‌ریزد؟» ولی می‌دانیم که چنین پرسشی اساساً نادرست است، چرا که دلیلی برای فرو ریختن آب وجود ندارد، چون قرار نیست حرکت الزاماً در راستای نیرو صورت گیرد. اما برای کسی که با دانش فیزیک سر و کار ندارد، به نظر می‌رسد که نیروی مرموزی آب درون سطل را به بالا هُل می‌دهد و در همین‌جاست که نیروی موهومی «گریز از مرکز» را ابداع می‌کنند!

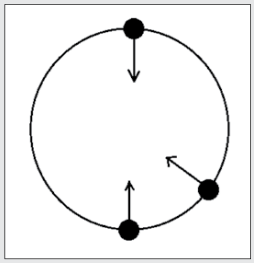
حال بیایید قوانین مکانیک نیوتونی را در این حالت مرحله به مرحله پیاده کنیم: ابتدا باید نیروهایی را که بر آب درون سطل وارد می‌شوند مشخص کنیم. دو نیرو به آب وارد می‌شود: یکی نیروی گرانی و دیگری، نیروی عمودی کف سطل:



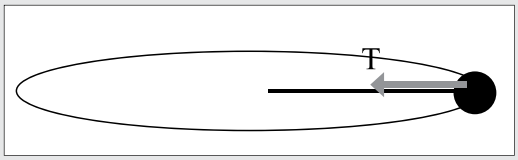
حال می‌توانیم پرسش نادرستی چون: «چرا آب فرو نمی‌ریزد؟» را به شکل صحیح مطرح کنیم: «آیا تغییر حرکت جسم، در راستای نیروی اعمال شده خواهد بود؟» که البته، مطابق مکانیک گالیله و نیوتون، جواب مثبت است.

بهتر است پیش از بررسی این پرسش دربارهٔ حرکت بر مسیر دایره‌ای، توضیحی بدهیم:

در حرکت دایره‌ای، نیرو (یا نیروهایی) وجود دارند که سبب ماندن در مسیر دایره می‌شوند. این نیرو(ها) همواره در راستای شعاع و به‌سوی مرکز دایره، بر جسم وارد می‌شوند. این نیرو (نیروها) را مرکزگرا می‌گوییم. باید به این نکته توجه

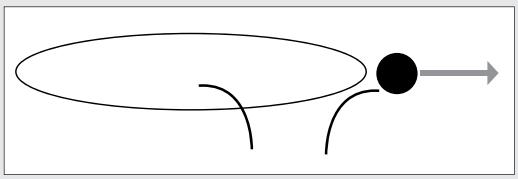


کنیم که نیروی مرکزگرا، نیروی مستقل یا ویژه‌ای نیست که مثلاً در کنار گرانی یا کشش نخ قرار داشته باشد، بلکه به نیرو یا نیروهایی کـه امکان حرکت بر مسیر دایره‌ای را فراهم می‌کنند (از هر نوعی که باشند)، مرکزگرا می‌گوییم. به‌عنوان مثال، فرض کنید گلوله‌ای را به انتهای نخی بسته‌ایم و آن را بر صفحهٔ افقی، بالای سرمان می‌گردانیم. آن نیرویی که موجب می‌شود گلوله بر مسیر دایره‌ای‌اش باقی بماند، نیروی کشش نخ است. پس در اینجا، نیروی مرکزگرا چیزی به جز نیروی کشش نخ نیست.



شرایطی را در نظر بگیرید که ناگهان نیروی مرکزگرا از میان برود (مثلاً طنابی که گلوله به آن متصل شده است، پاره شود).

ممکن است باز هم به اشتباه و با توسل به حس معمول و عقل سلیم، احساس کنیم که «به واسطهٔ نیروی گریز از مرکز»، گلوله در راستای شعاعی و به‌سوی خارج از مسیر پرتاب خواهد شد:

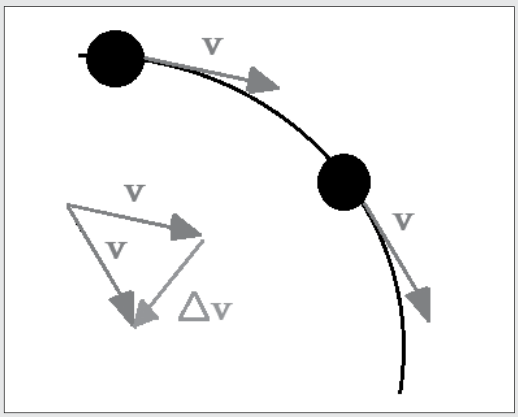


این در حالی اسـت که مطابق قانـون لختی، گلوله حرکت مستقیم‌الخط و یکنواختی را در پیش خواهد گرفت که مسیر آن بر مسیر دایره‌ای مماس خواهد بود.

به پرسش اصلی بازگردیم: «آیا تغییر حرکت جسم (سطل پر آب)، در راستای نیروی اعمال شده خواهد بود؟»

چون حرکت سـطل پر از آب در مسـیر دایـره‌ای صورت می‌گیرد، بی‌درنگ بحث وجود نیروی مرکزگرا مطرح می‌شود و همواره و در تمام نقاط مسیر، نیرویی به سوی مرکز مسیر دایره‌ای به دسـتگاه سطل - آب وارد می‌شـود. (در حالتی که سطل در بالاترین نقطهٔ مسیر قرار گرفته، مجموع نیروی گرانی و نیز نیروی عمودی سطح، مصداق نیروی مرکزگراست.)

از طرفی، راسـتای حرکت، همان راسـتای سـرعت است. بنابراین عبارت «نیرو در راسـتای تغییر حرکت است»، می‌تواند به‌صورت: «راسـتای نیرو و تغییر سـرعت، یکسان است» تعبیر شود. در حرکت دایره‌ای، راستای سرعت همواره مماس بر مسیر اسـت. بنابراین، با شکل سادهٔ زیر، که موقعیت جسمی را در دو مکان متفاوت مسیری دایره‌ای نشان می‌دهد، می‌توانیم مشاهده کنیم که راسـتای تغییر سـرعت (تغییر حرکت) جسم، همان راستای نیروی مرکزگراست:

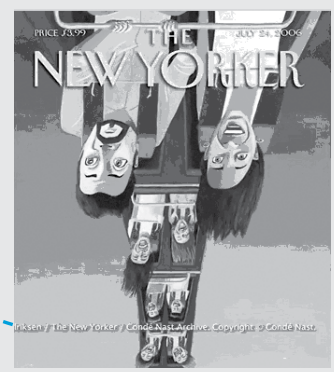


با اینکه فهمیدیم دلیلی برای سقوط کردن آب درون سطل وجود ندارد، اما هنوز به این مسـئله که چرا آب به کف سـطل فشرده می‌شود، پاسخ نداده‌ایم، یعنی جایی که سر و کلهٔ نیروی گریز از مرکز پیدا می‌شود!

برای درک چرایی این پدیده، به مثال آسانسور بازمی‌گردیم: گفتیم داخل آسانسـوری ایستاده‌اید و آسانسور با سرعت زیادی شـروع به بالا رفتن می‌کند. در این حالـت (که برای بیان بهتر مسئله، نیروی گرانی را هم نادیده می‌گیریم)، نیرویی رو به بالا به شما وارد می‌شود، در حالی که احساس می‌کنید به کف آسانسور جذب می‌شـوید. آب درون سطل نیز همان احساس فرد داخل آسانسور را دارد. به بیان دیگر، این‌گونه نیست که نیروی عجیب و غریب و نامأنوسـی به نام گریز از مرکز باعث فشرده شدن آب به کف سطل شـود، بلکه می‌توان آب داخل سطل را ناظری در نظر گرفت که در ماشینی نشسته و ناگهان خودرو با سرعت زیاد شروع به حرکت می‌کند. نتیجهٔ این حرکت، فشرده شدن مسافر به صندلی ماشـین است (در حالی که واقعاً نیرویی او را به عقب هل نمی‌دهـد). تمام این موارد، مثال‌هایـی از قانون لختی و یا اینرسی محسوب می‌شوند.

بنابراین ملاحظه می‌کنید که به‌جـای به‌کارگیری نیرویی سـاختگی، تخیلـی و غیرعلمی، با همان ابـزار فیزیک گالیله و نیوتون، می‌توان به خوبی از پس توجیه پدیده‌های فیزیکی برآمد.

چالش- تصویر زیر که روی جلد یکی از شـماره‌های مجلهٔ معتبـر نیویورکر چاپ شـده چرخ و فلکـی را در بالاترین نقطهٔ مسـیرش نشان می‌دهد. آیا می‌توانید بگویید چه اشکالی در آن می‌بینید؟ (پاسخ خود را تشریح و تحلیل کنید)



منابع
1.Richard Wolfson, Physics and Our Universe, 2011
2. Richard Feynman, Lectures on Physics, Addison Wesley, 1965
3. Ruth Chalby, Matter & Interactions, John Wiley & Sons, inc., 2001
4. Serway and Jeweet, Physics for Scientists and Engineers, 6th ed.