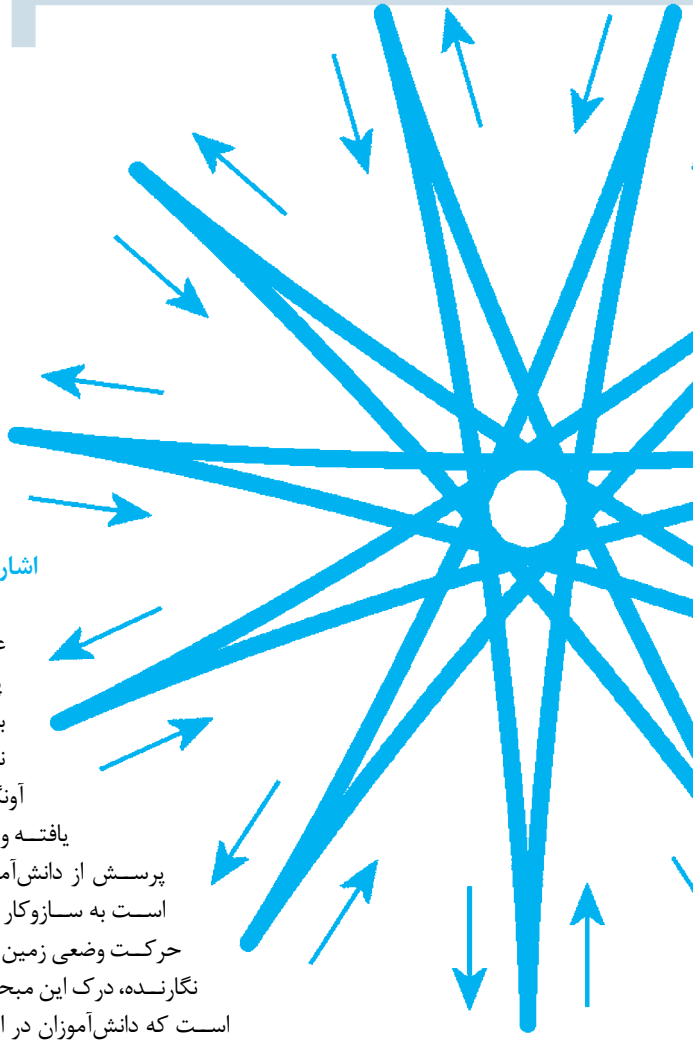
نیروهای لختی و آونگ فوکو

محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر
کارشناس گروه فیزیک
دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی

کلیدواژه‌ها: آونگ فوکو، دستگاه لَخت، دستگاه نالَخت، نیروی مجازی، نیروی کوریولیس.



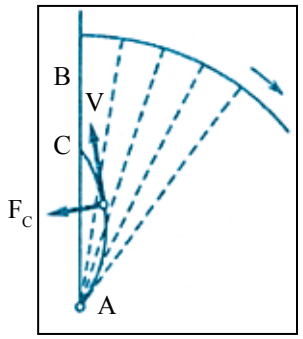
اشاره

در اوایل کتاب، علوم زمین دورهٔ پیش دانشگاهی به‌گونه‌ای نابجا و نامفهوم، مبحثی به آونگ فوکو اختصاص یافته و تنها با طرح چند پرسش از دانش‌آموزان خواسته شده است به سازوکار این آونگ در اثبات حرکت وضعی زمین پی ببرند. به اعتقاد نگارنده، درک این مبحث فراتر از دانشی است که دانش‌آموزان در این پایهٔ تحصیلی دارند، چرا که حتی دانشجویان فیزیک هم تازه در درس مکانیک تحلیلی خود با آن آشنا می‌شوند. در هر حال، چون این مبحث، آن هم چنین نابجا و نامفهوم در کتاب درسی آمده است، سعی می‌کنم تا آنجا که ممکن است با بیانی ساده آن را توضیح دهم. البته توضیح آن خود نیاز به پیش‌نیازهایی دارد که نخست به آن خواهیم پرداخت.

اولین پیش‌نیاز، آشنایی با چارچوب‌های مرجع لخت و نالخت است. چارچوب مرجع لخت، چارچوبی (دستگاهی) است که در آن قوانین نیوتن برقرار است. برای آن‌که دریابیم آیا دستگاهی لخت است یا خیر، کافی است بررسی کنیم که آیا نیروهای وارد از سایر اجسام می‌توانند حرکت مشاهده شده در این چارچوب را توجیه کنند یا خیر؛ اگر چنین باشد، دستگاه لخت است، ولی اگر معلوم شود نیروهایی وجود دارند که نمی‌توانند با اثر سایر اجسام توجیه شوند، به آن معناست که دستگاه نالخت است و شتاب‌ها از نیروهایی مجازی، موسوم به نیروهای لختی ناشی می‌شوند. برای مثال در حرکت ماهواره به دور زمین، می‌دانیم که آنچه باعث حرکت چرخشی ماهواره می‌شود، شتاب گرانشی حاصل از نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره است. یعنی ناظر لخت استدلال می‌کند که این شتاب گرانشی، شتاب جانب به مرکز لازم برای چرخش ماهواره را تأمین می‌کند. اما ناظری که همراه با ماهواره می‌چرخد، همراه با آن شتاب می‌گیرد و بنابراین از دید او شتاب ماهواره صفر است. ولی از طرفی او می‌داند که تحت تأثیر یک نیروی جاذبهٔ گرانشی از سوی زمین قرار گرفته است. بنابراین مجبور می‌شود برای توجیه این موضوع، وجود نیرویی *مجازی* به نام *نیروی گریز از مرکز* را بپذیرد که جهت آن در خلاف جهت جاذبهٔ گرانشی زمین است. یعنی او برای شتاب نگرفتن خود چنین استدلال می‌کند که نیرویی در خلاف جهت جاذبهٔ گرانشی زمین و هم‌اندازه با آن به ماهواره اثر می‌کند تا آن نیروی جاذبه را خنثی کند. نیروی گریز از مرکز یکی از مشهورترین نیروهای لختی است.

حال به سراغ مثالی دیگر می‌رویم که ما را با نیروی لختی دیگری آشنا می‌کند و عمده‌ترین نقش را در تحلیل آونگ فوکو دارد. فرض کنید یک تکه گچ زیر خط‌کشی قرار دارد و خود گچ روی تخته‌ای قرار گرفته است. اگر خط‌کش را به‌طور مستقیم حرکت دهیم، گچ خط مستقیمی را بر تخته ترسیم می‌کند. ولی اگر تخته ساکن نباشد و زیر خط‌کش با آهنگ ثابتی بچرخد، گچ دیگر خط مستقیمی بر تخته نمی‌کشد، بلکه مسیری منحنی را برجای می‌گذارد (شکل ۱). یعنی مسیر گچ نسبت به دستگاه مرجع چرخان منحنی است و چون چنین مسیر خمیده‌ای را می‌پیماید، ناظر واقع در دستگاه چرخان مجبور می‌شود برای توجیه این مسیر حرکت ادعا کند که شتابی عمود بر مسیر گچ وجود داشته که باعث چنین حرکت خمیده‌ای شده است (مثل شتاب جانب به مرکز که باعث حرکت دورانی یکنواخت می‌شود). بنابراین در دستگاه مرجع چرخان، نیرویی لختی وجود دارد که بر مسیر نمایش داده شده توسط گچ عمود است. این نیروی لختی به احترام فیزیک‌دان فرانسوی *گاسپارد گوستاو کوریولیس*[1] که برای نخستین‌بار به‌وجود این نیرو پی برد، *نیروی کوریولیس* خوانده می‌شود.

محاسبات در کتاب‌های مکانیک تحلیلی نشان می‌دهند

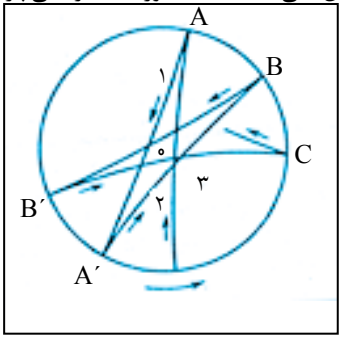


شکل ۱. اگر صفحهٔ دوّار ساکن باشد، گچ مسیر مستقیم AB را خواهد پیمود. ولی اگر صفحه مطابق شکل بچرخد، گچ مسیر خمیدهٔ AC را به نمایش خواهد گذاشت که ناظر دستگاه چرخان، آن را به نیروی لختی $\vec{f}_c$ موسوم به نیروی کوریولیس نسبت می‌دهد.

که برای حرکت‌های جسم در صفحه‌ای عمود بر محور چرخش، نیروی کوریولیس f_c مساوی با دو برابر حاصل‌ضرب سرعت زاویه‌ای دستگاه مرجع چرخان (ω) در سرعت جسم نسبت به این دستگاه (v) و جرم جسم (m) است: $f_c=2m\,\omega\,v$. جهت این نیرو عمود بر سرعت جسم است و در نتیجه اگر جهت حرکت جسم یا جهت چرخش دستگاه مرجع وارونه شود (یعنی مثلاً از ساعتگرد به پادساعتگرد) جهت نیروی لختی کوریولیس نیز وارونه می‌شود. توجه کنید که در مثال بالا، علاوه بر نیروی لختی کوریولیس، نیروی لختی گریز از مرکز نیز بر جسم وارد می‌شود، اما اینجا تنها به نیروی کوریولیس پرداختیم.

اکنون که با نیروهای لختی و به‌ویژه نیروی کوریولیس آشنا شدیم، زمان آن است که با آونگ فوکو آشنا شویم. آونگ فوکو عملاً وسیله‌ای آزمایشی است که فیزیک‌دان فرانسوی *ژان برنارد لئون فوکو*[2] برای اثبات چرخش زمین (و در نتیجه نالخت بودن آن) در سال ۱۸۵۱ در پاریس به‌کار گرفت. فوکو آونگی را به کار برد که وزنهٔ سنگینی از سیم نازک درازی (به طول ۶۷m) آویزان شده بود. دورهٔ شتاب آونگ ۱۶s بود و برای اجتناب از پیچش سیم، افق‌های بالایی آن به یاتاقانی وصل شده بود که می‌توانست آزادانه حول محور قائم بچرخد.

اگر زمین دستگاه مرجع لخت بود، آونگی که به نوسان در می‌آمد، در مدت نوسان‌های بعدی در صفحهٔ یکسانی باقی می‌ماند. ولی معلوم شد که صفحهٔ نوسان‌های آونگ نسبت به زمین ساکن نمی‌ماند، بلکه به‌طور ساعتگرد می‌چرخد و این از



شکل ۲. بر اثر نیروی کوریولیس، مسیر وزنه از نمای «دید از بالا» به شکل ستاره درمی‌آید.

همان نیروی لختی کوریولیس سرچشمه می‌گیرد. همان‌طور که دیدیم نیروی لختی کوریولیس مسیر حرکت مستقیم را خمیده می‌کنند و بر وزنه، نیروهایی عمود بر مسیر اثر می‌کنند. انحنای مسیر، بسته به جهتی که آونگ در آن حرکت می‌کند (جلو یا عقب)، تغییر علامت می‌دهد. مسیر وزنهٔ آونگ فوکو در نیمکرهٔ شمالی از نمای «دید از بالا» به‌گونه‌ای اغراق‌آمیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این شکل توجه کنید که من برای تفهیم موضوع از عددهای ۱ و ۲ و ۳ استفاده کرده‌ام تا متوجه چیزی شوید که در این شکل به شدت اغراق‌آمیز رسم شده است. توجه کنید که آغاز نوسان را از A در ابتدای مسیر ۱ گرفته‌ایم. در صورت چرخش نداشتن زمین، توقع آن بود که نوسان روی خود مسیر ۱ ادامه یابد. ولی پس از آنکه وزنه به A' می‌رسد، مسیرش بر اثر نیروی کوریولیس اندکی خمیده می‌شود و به‌جای A به نقطهٔ B بازمی‌گردد. سپس از نقطهٔ B به B' می‌رود و به‌جای بازگشت به B، به نقطهٔ C بازمی‌گردد و این فرایند ساعتگرد همچنان ادامه می‌یابد.

زمان یک چرخش کامل به عرض جغرافیایی محلی بستگی دارد که آزمایش در آنجا انجام می‌شود و برابر با $\frac{24h}{\sin\lambda}$ است که λ عرض جغرافیایی ناحیه است.

بنابراین در قطب، صفحهٔ نوسان آونگ با همان سرعتی نسبت به زمین حرکت می‌کند که زمین نسبت به دستگاه مرجع خورشید- ستارگان دوران می‌کند، ولی با علامت مخالف. یعنی صفحهٔ نوسان آونگ در دستگاه مرجع خورشید- ستارگان ساکن می‌ماند. این امر لخت بودن دستگاه مرجع خورشید- ستارگان را به اثبات می‌رساند و همچنین ثابت می‌کند که زمین دستگاه مرجع لخت نیست، بلکه نسبت به دستگاه لخت با سرعت زاویه‌ای 2π راویان در روز دوران می‌کند.

افزون بر آزمایش اثبات چرخش زمین با آونگ فوکو، پدیده‌های دیگری نیز وجود دارند که با نیروی کوریولیس توجیه می‌شوند. اجسامی که در نیمکرهٔ شمالی به طرف شمال حرکت می‌کنند تحت تأثیر نیروی کوریولیسی رو به شرق قرار می‌گیرند و اجسامی که به طرف جنوب حرکت می‌کنند تحت تأثیر نیروی کوریولیسی رو به غرب قرار می‌گیرند (یعنی باز هم به طرف راست جهت حرکت). چنین نیرویی باعث فرسایش بیشتر سمت راست رودخانه‌ها در نیمکرهٔ شمالی می‌شود. نیز به همین دلیل است که ریل طرف راست خط‌آهن‌های دو خطی کمی بیشتر از ریل سمت چپ فرسوده می‌شود. این ماجرا در نیمکرهٔ جنوبی برعکس می‌شود و طرف چپ رودخانه‌ها و راه‌آهن‌ها بیشتر فرسوده می‌شود.

این پدیده در مورد حرکت هوا نیز مصداق دارد، یعنی هوای جاری به سمت نواحی فشار کمتر در نیمکرهٔ شمالی به‌طور پادساعتگرد می‌چرخد، در حالی که هوای جاری به سمت نواحی فشار بالا، ساعتگرد می‌چرخد. این دو نوع چرخش، گاهی موجب تلاطم‌های عظیمی موسوم به چرخنده‌ها و واچرخنده‌ها در سطح زمین می‌شوند.

آونگ فوکو عملاً وسیله‌ای آزمایشی است که فیزیک‌دان فرانسوی ژان برنارد لئون فوکو برای اثبات چرخش زمین (و در نتیجه نالخت بودن آن) در سال ۱۸۵۱ در پاریس به‌کار گرفت.

پی‌نوشت

1. Gaspard Gustar Coriolis (1792- 1843)
2. Jean Bernard Leon Foucault (1819- 1868)

منابع

۱. کتاب علوم زمین دورهٔ پیش‌دانشگاهی؛ ص ٤- ٥، سال ۱۳۹۱.
۲. لندسبرگ؛ دورهٔ درسی فیزیک؛ ترجمهٔ لطیف کاشیگر و همکاران، تهران: انتشارات فاطمی، ۱۳۸۰.
۳. هالیدی، رزنیک و واکر؛ مبانی فیزیک؛ ترجمهٔ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، تهران: انتشارات آراکس، ۱۳۹۰.
4. M.P.Lord; Macmillan Dictionary of Physics; 1986.