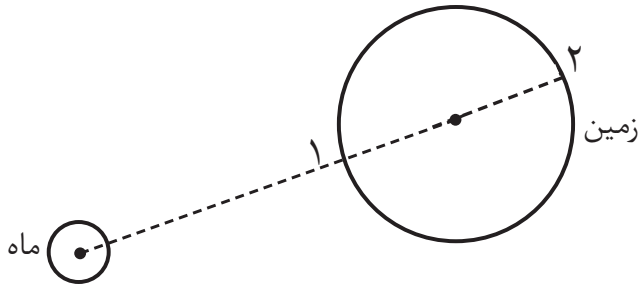
کشندها و جزر و مد

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

واژهٔ «کشند»[1] اشاره به جابه‌جایی نسبی ماده در یک جسم بر اثر نیروی گرانشی اجسام دیگر دارد که در این‌جا آن جسم، زمین است که به‌طور عمده در میدان گرانشی ماه قرار گرفته است. به زبان ساده، می‌توان دلیل اصلی کشند را جاذبهٔ گرانشی وارد از ماه بر مواد روی زمین دانست.

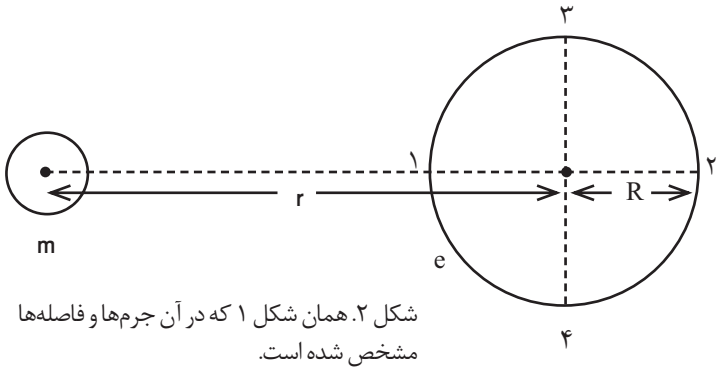
همان‌طور که می‌دانیم نیروی گرانشی با فاصله تغییر می‌کند و بنابراین، اگر شکل ۱ را در نظر بگیرید، درخواهید یافت که نیروی گرانشی وارد بر نقطهٔ ۱ بیشتر از نیروی گرانشی وارد بر نقطهٔ ۲ است، زیرا در فاصلهٔ کمتری از ماه قرار گرفته است. درواقع، مرکز ماه نسبت به آن طرفی از زمین که مقابل آن قرار گرفته است، چهار هزار مایل و نسبت به طرف دیگر آن هشت هزار مایل فاصله دارد. چنین تفاوتی در فاصله، به تفاوت در جاذبهٔ گرانشی وارد بر این دو نقطه و ایجاد جزر و مد می‌انجامد.



شکل ۱. شکل فرضی فاصلهٔ ماه و زمین

البته، ماه هم دریا و هم خشکی را جذب می‌کند، ولی به دلیل تفاوت ماهیت آب و خشکی است که جزر و مد جلوه‌گر می‌شود، و نیروی گرانشی ماه با کشیدن آب به موازات خطی که زمین را به ماه وصل می‌کند، شکل توزیع آب را تغییر می‌دهد. به عبارت دیگر، جزر و مد را می‌توان اثر نیروهای کشندی روی آبهای زمین دانست و می‌توان آن را «کشند دریایی» نیز نامید.

اکنون می‌خواهیم به بیان ریاضی، برای کسانی که اطلاعات ریاضی بیشتری دارند، همین موضوع را توضیح دهیم. شکل ۲، دو جسم کروی را یکی به نام m (به نشانهٔ ماه: moon) و دیگری به نام e (به نشانهٔ زمین: earth) نشان می‌دهد. فاصلهٔ بین دو مرکز آنها را r و شعاع جسم e را (که کشند را برای آن بررسی می‌کنیم) R می‌نامیم.



شکل ۲. همان شکل ۱ که در آن جرم‌ها و فاصله‌ها مشخص شده است.

متوسط نیروی وارد از طرف جسم m بر جسم e برابر با مقدار نیروی وارد از مرکز m به مرکز آن است که از قانون گرانش چنین به‌دست می‌آید:

$$F_\circ = GM_mM_e / r^2 \qquad (1)$$

که در آن، M_m جرم ماه، M_e جرم زمین، و G ثابت جهانی گرانش است. آن‌گاه نیروی وارد بر جسم e (زمین) در نقطهٔ ۱ چنین می‌شود:

$$F_1 = \frac{GM_mM_e}{(r-R)^2} = \frac{GM_mM_e}{r^2(1-\frac{R}{r})^2} = F_\circ(1-\frac{R}{r})^{-2} \qquad (2)$$

با توجه به این‌که $r \gg R$ است، می‌توانیم از بسطی ریاضی موسوم به «بسط ε» (اپسیلون) استفاده کنیم. اگر ε عدد کوچکی باشد، با استفاده از این بسط داریم: $(1\pm\varepsilon)^n \approx 1\pm n\varepsilon$. در رابطهٔ بالا R/r همان ε است و درنتیجه داریم:

$$F_1 \approx F_\circ(1+\frac{2R}{r}) = F_\circ + \frac{2F_\circ R}{r} \qquad (3)$$

ملاحظه می‌شود، نیروی وارد بر جسم e در نقطهٔ ۱ به اندازهٔ $2F_\circ R / r$ با متوسط نیروی وارد بر این جسم اختلاف دارد؛ این نیرو در راستای شعاع و رو به سمت خارج است.

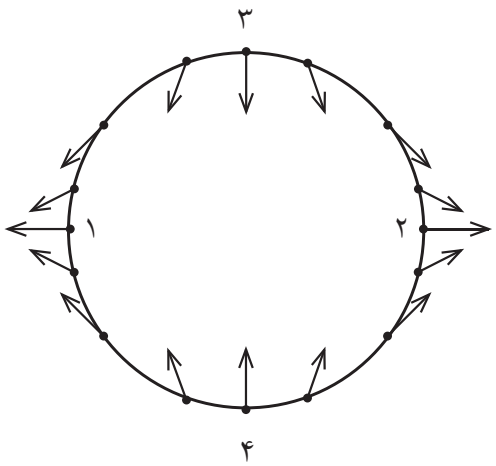
حال اگر نیروی وارد بر نقطهٔ ۲ را بررسی کنیم، درست به همان ترتیب خواهیم داشت:

$$F_2 = \frac{GM_mM_e}{(r+R)^2} = \frac{GM_mM_e}{r^2(1+\frac{R}{r})^2} = F_\circ(1+\frac{R}{r})^{-2} \qquad (4)$$

توجه کنید که چون $r \gg R$ است، باز می‌توانیم با اختیار $R / r = \varepsilon$، از بسط $(1\pm\varepsilon)^n \approx 1\pm n\varepsilon$ استفاده کنیم و از آن‌جا چنین به‌دست می‌آوریم:

$$F_2 \approx F_\circ(1-\frac{2R}{r}) = F_\circ - \frac{2F_\circ R}{r} \qquad (5)$$

بنابراین در نقطهٔ ۲ نیز نیرو به اندازهٔ $2F_\circ R / r$ با متوسط نیروی وارد بر جسم اختلاف دارد. *تفاوت نیروی گرانشی ماه در مکان‌های متفاوت زمین، با نیروی گرانشی متوسط وارد بر زمین، همان نیروی مولد کشند است.* در نقاطی غیر از ۱ و ۲ نیز کشند داریم که البته شدت کشند در آن نقاط کمتر است، زیرا برای این نقاط نیروی وارد بر e به دو مؤلفه تجزیه می‌شود. از همین‌روست که می‌گوییم در نقاط ۱ و ۲ بلندترین مد را داریم. نیروی مولد کشند برای نقاط متفاوت زمین در شکل ۳ رسم شده است.



شکل ۳. نیروی مولد کشند برای نقاط متفاوت زمین

توجه کنید که اگر زمین نمی‌چرخید، آن‌گاه نقاط ۱ و ۲ همواره دارای بیشترین مد بودند. ولی چرخش زمین به این معناست که یک منطقهٔ ساحلی در طول یک روز از دو محل بیشترین مد می‌گذرد. بنابراین دو بازه برای بیشترین مد وجود دارد. حرکت ماه به دور زمین در همان جهت حرکت وضعی زمین است و معمولاً بین دو بیشترین مد، حدود ۱۲ ساعت و ۲۳ دقیقه طول می‌کشد.

البته عوامل دیگری نیز وجود دارند که موضوع را پیچیده‌تر می‌کنند. یکی از آن‌ها اصطکاک آب ساحل است. این اصطکاک، پاسخ آب به کشیده شدنش توسط ماه را به تأخیر می‌اندازد. بنابراین ممکن است نقطهٔ بیشترین مد در یک شهر بندری، یک یا چند ساعت پس از زمانی رخ دهد که ماه در بالاترین نقطهٔ خود در آسمان قرار دارد. مثلاً نقطهٔ بیشترین مد در «کانال انگلیس»[۲] (مسیری آبی

به طول ۳۵km که جنوب انگلستان را از شمال فرانسه جدا می‌کند)، همواره چند ساعت به‌تأخیر می‌افتد.

عامل دیگری که باعث پیچیدگی موضوع می‌شود، نیروی گرانشی وارد از خورشید است. البته تأثیر خورشید تقریباً نصف تأثیر ماه است، زیرا گرچه خورشید بسیار بزرگ‌تر از ماه است، ولی در فاصلهٔ بسیار دورتری از زمین قرار دارد (فاصلهٔ خورشید از زمین حدود ۳۹۳ بار بیشتر از فاصلهٔ ماه از زمین است). اما در هر حال این تأثیر وجود دارد. خورشید نیز حدوداً هر ۱۲ ساعت یک مد ایجاد می‌کند. درنتیجه، دامنهٔ جزر و مدها (دامنهٔ کشند) متناوباً تغییر می‌کند. وقتی زمین، ماه و خورشید در یک امتداد باشند، دامنهٔ بیشترین کشند بیشینه است. این اتفاق معمولاً در حین هلال ماه نو و شب بدر رخ می‌دهد و مجموع اثرهای کشندی آن‌ها باعث ایجاد جزر و مدهای بزرگ‌تری موسوم به «مهکشند»[3] می‌شود. وقتی جهت زمین با خورشید و ماه زاویهٔ 90° بسازد، مجموع این اثرها باعث ایجاد کوچک‌ترین جزر و مدها موسوم به «کهکشند»[4] می‌شود.

حالت‌های خاصی نیز وجود دارند که نمونهٔ بارز آن‌ها جزر و مدهای خلیج فاندی در «نواسکوتیا»[5] است که دامنهٔ کشند در عرض چند ساعت به ۱۵ متر می‌رسد. این دامنهٔ عظیم جزر و مد ناشی از «پدیدهٔ تشدید» است. اثرهای کشندی تمایل دارند نوسان‌هایی نیز ایجاد کنند. اما چون دورهٔ تناوب این نوسان‌ها با دورهٔ مدها تطابق ندارد، خود را بروز نمی‌دهند. در خلیج فاندی دورهٔ این نوسان‌ها تقریباً ۱۳/۳ ساعت است که به زمان ۱۲/۴ ساعت فاصله بین مدهای این خلیج نزدیک است. گزارش‌ها حاکی از آن‌اند که تغییرات کشندی در خلیج فاندی به تدریج افزایش یافته‌اند، چرا که دورهٔ شدید این خلیج به‌تدریج به دورهٔ تغییرات کشندی نزدیک شده است. امکان دارد این انتقال ناشی از تغییر شکل خلیج بر اثر افزایش ارتفاع سطح دریا بوده باشد.

در مصبّ رودخانه‌ها، آب تا مدتی پس از مد همچنان به طرف «بالارود»[6] و تا مدتی پس از جزر همچنان به طرف «پایین‌رود»[7] جاری می‌شود. جریان اگر به طرف خشکی یا مصب‌رود باشد، فراکشندی و اگر برعکس در جهت دور شدن از خشکی یا مصب‌رود باشد، فروکشندی نامیده می‌شود. سرعت جریان‌های کشندی از محلی به محل دیگر متغیر است. در فواصلی از مصب بعضی رودخانه‌ها- مثل «رود کلرادو»- که با کشند مواجه می‌شوند، موجی به ارتفاع بیش از ۳ متر، تقریباً مثل دیواری از آب به طرف رودخانه حرکت می‌کند. به این پدیده «اُشترک» (خیزاب) می‌گویند.

ماه هم دریا و هم خشکی را جذب می‌کند، ولی به دلیل تفاوت ماهیت آب و خشکی است که جزر و مد جلوه‌گر می‌شود. نیروی گرانشی ماه با کشیدن آب به موازات خطی که زمین را به ماه وصل می‌کند، شکل توزیع آب را تغییر می‌دهد

همان‌طور که پیشتر گفته شد، اثرات کشندی فقط شامل آب دریاها نمی‌شود. کشندهای وارد بر تودهٔ جامد زمین، موجب تغییر شکل دوره‌ای آن می‌شوند و تغییراتی را در شتاب گرانی (ثقل) در نقاط معینی از زمین پدید می‌آورند. این تغییرات موضعیِ شتاب‌گرانی ممکن است به چند ۱۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه برسد. چنین کشندهایی آهنگ چرخش زمین را تقریباً به اندازهٔ یک ثانیه در هر صد هزار سال کاهش می‌دهند و موجب افزایش فاصلهٔ ماه از زمین می‌شوند. کشندهایی که زمین در ماه ایجاد می‌کند، موجب شده‌اند که همواره روی ثابتی از ماه به طرف زمین باشد.

کشندهای جوی نیز به‌صورت تغییرات نوسانی کوچک در فشار جو در هر نقطه، با دامنه‌ای از مرتبهٔ ۰/۰۳ میلی‌بار، بروز می‌کنند.

پی‌نوشت

1. tide
2. English Channel
3. spring tides
4. neap tides
5. Nova Scaotia
6. up stream
7. down stream

منابع

1. The Flying Circus of Physics, Jearl Walker, 2007, 2nd Edition, John Wiley & Sons.

(این اثر توسط محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر ترجمه شده و هم‌اکنون به‌نا م**نمایش هیجان‌انگیز فیزیک**، به چاپ رسیده است.)

۲. دانش‌نامهٔ فیزیک. دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه (زنجان). بنیاد دانش‌نامه‌نگاری ایران. چاپ اول. ۱۳۸۷.

۳. خوش‌بین خوش‌نظر، محمدرضا. پاسخ به پرسش‌های مبانی فیزیک و پرسش‌های برانگیزانندهٔ دیگر. انتشارات صفار. ۱۳۸۵.