شناوری و قانون ارشمیدس

آرش ظهوریان پُردل

مقدمه

همهٔ ما با داستان مشهور ارشمیدس و تاج پادشاه سیراکیوز آشنا هستیم؛ داستانی که در آن، ارشمیدس ــ مخترع و مهندس مورد احترام اهالی جزیره ــ با شوق و شعف فراوان، از حمام بیرون می‌آید و به خیابان می‌دود و با فریاد «یافتم! یافتم!»، خبر از کشف مهم خود می‌دهد. بدون توجه به حقیقی یا ساختگی بودن این داستان، آنچه در این میان حائز اهمیت است، قانون ارشمیدس دربارهٔ اجسام شناور در آب است. شاید بتوان، ارشمیدس را یکی از مهم‌ترین دانشمندان باستان دانست که آزمایش کردن و اعمال تجربی را ناپسند نمی‌دانست بلکه روشی برای رد یا اثبات قوانین فیزیک می‌دانست. وی با ابتکارات و اختراعات اعجاب‌انگیز خود، نه‌تنها مردم سیراکیوز را تا سال‌ها از گزند سربازان رومی محفوظ نگاه داشت، بلکه توانست به نتایج مهمی دست یابد که یکی از آن‌ها، «قانون ارشمیدس» است. پیش از وارد شدن به بحث اصلی، بهتر است به بررسی و مرور برخی مفاهیم اساسی دربارهٔ شاره‌ها (از جمله فشار و چگالی) بپردازیم.

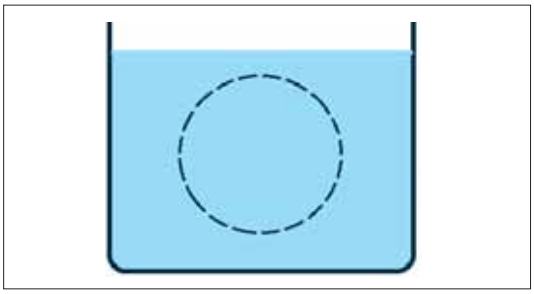
کلیدواژه‌ها: شناوری، قانون ارشمیدس

شاره، به مواد (یا حالت‌هایی) گفته می‌شود که در آن‌ها، اتم‌ها می‌توانند به راحتی بر روی هم بلغزند و سرانجام، شکل ظرف را به خود بگیرند (مایعات) و یا حتی بتوان آن‌ها را به هم فشرد و نزدیک‌تر کرد (گازها). شاره‌ها ویژگی‌های متفاوتی نسبت به جامدات دارند. به‌عنوان مثال، در جامدات، نیروی مقاوم در برابر حرکت (اصطکاک) ارتباطی به سرعت ندارد (نیروی اصطکاکی که جاده بر خودروی متحرک با سرعت ۱۸۰ کیلومتر/ساعت وارد می‌کند، با نیروی اصطکاک وارد بر خودروی مشابهی که با سرعت ۲۰ کیلومتر/ساعت حرکت می‌کند، برابر است). این در حالی است که هرچه سرعت حرکت شاره بیشتر باشد، نیروی مقاوم نیز بزرگ‌تر خواهد بود. (مثلاً نیروی مقاومت هوا بر جسم در حال سقوط، با افزایش طبیعی سرعت جسم، بیشتر می‌شود و یا در استخر، نیروی مقاوم در برابر بدن شما، وقتی می‌خواهید با سرعت بیشتری در استخر راه بروید، بیشتر می‌شود.)

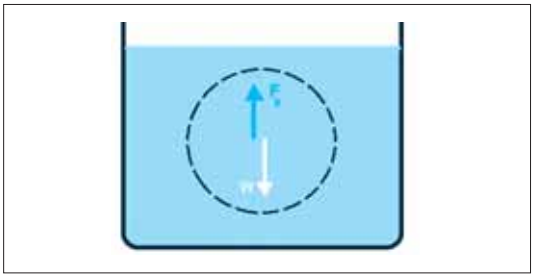
اما ویژگی مهمی که می‌خواهیم در مورد آن صحبت کنیم، «فشار در شاره‌ها»ست. توجه داشته باشید که به‌کار بردن کمیت نرده‌ای فشار به‌جای کمیت برداری نیرو، به منظور دقیق‌تر کردن موضوع صورت می‌گیرد. گاهی می‌توان این دو مفهوم را به‌جای همدیگر به‌کار برد (برخی اوقات هم از اصطلاح نیروی فشار استفاده می‌شود).

اگر جسمی در شاره‌ای قرار گیرد، تحت فشار (نیرو) قرار می‌گیرد. فشار نیروی «مؤثر» وارد بر جسم، در دو جهت متفاوت اعمال می‌شود: یکی فشار ناشی از شارهٔ موجود در قسمت بالایی جسم، و دیگری فشار ناشی از آن قسمت از شاره که در پایین جسم قرار دارد. اما آنچه بیش از خود «فشار» حائز اهمیت است، «تفاوت فشار» است. چرا که این «تفاوت فشار» است که موجب اعمال نیروی برآیند غیرصفر بر جسم می‌گردد. جسم درون شاره نیز، همواره در معرض این «تفاوت فشار» قرار دارد و فرق نمی‌کند که این جسم، در چه عمقی از شاره قرار داشته باشد. همواره نیرویی خالص (و با اندازه‌ای ثابت)، به جسم درون شاره وارد می‌شود که این نیرو را «نیروی شناوری» می‌نامیم. نیروی شناوری وارد بر جسم، فقط و فقط به «حجم» جسم بستگی دارد و سنگینی و سبکی جسم، تأثیری بر نیروی شناوری وارد بر آن ندارد.

شاره‌ها را می‌توان در دو حالت ایستا (استاتیک) و پویا (دینامیک) بررسی کرد که در اینجا، فرض ما بر این است که شاره، در تعادل استاتیکی است. در این صورت، می‌توانیم ظرفی را در نظر بگیریم که شارهٔ درون آن (آب) در تعادل است. حال، پوسته‌ای فرضی و نامرئی را در این ظرف در نظر می‌گیریم: حجم مشخصی از آب را دربرمی‌گیرد.



نیروهای فشاری که شارهٔ موجود در دو طرف این پوسته به آن وارد می‌کند، یکدیگر را خنثی می‌کنند و در نتیجه، فقط اختلاف فشار قسمت بالا و پایین این حجم فرضی اهمیت پیدا می‌کند که نتیجهٔ آن، نیروی رو به بالای شناوری است. چون شارهٔ ما در تعادل ایستایی است، بنابراین برآیند نیروهای وارد بر این حجم فرضی باید صفر باشد. نیروی دیگری که باید در نظر بگیریم، نیروی وزن این جسم فرضی است که موجب حفظ تعادل ایستایی آن می‌شود:



بنابراین، نیروی شناوری وارد بر این حجم آب با وزن واقعی آن برابر است. (کمی بعد، از این واقعیت بهره خواهیم گرفت)

در ضمن، مقصود از «وزن واقعی» جسم، نیروی گرانی وارد بر آن (بدون توجه به اینکه در چه محیطی قرار دارد) است. در حالی‌که وزن ظاهری آن ـ وزنی که با در نظر گرفتن نیروی شناوری اندازه می‌گیریم ـ قطعاً مقدار کمتری است.

حال، جسم صلبی را در این ظرف آب قرار می‌دهیم. در این‌صورت، این جسم، به اندازهٔ حجم خود، آب جابه‌جا می‌کند. به‌عبارت دیگر، میزان آبی که هر جسم در آب (شاره) جابه‌جا می‌کند، تنها به حجم آن جسم بستگی دارد. فرض کنیم جسم جامدی که درون ظرف آب قرار می‌دهیم، هم ـ حجم همان پوسته کروی نامرئی باشد. بنابراین، به اندازهٔ همان آب موجود در پوسته، آب جابه‌جا می‌کند. از طرفی، می‌دانیم که وزن این آب با نیروی شناوری وارد بر جسم فرضی برابر است. نتیجهٔ این استدلال را ارشمیدس به‌صورت زیر بیان کرد:

نیروی شناوری وارد بر جسم درون شاره، برابر است با وزن آبی که جابه‌جا می‌کند

در مورد این قانون، باید به سه نکته توجه کنیم:

۱. نیروی شناوری وارد بر جسم، برابر با وزن آب جابه‌جا شده است و نه الزاماً وزن واقعی خود جسم و نه مطلقاً وزن ظاهری آن.

۲. پیش‌تر گفتیم که نیروی شناوری، به عمقی که جسم در آن قرار گرفته، بستگی ندارد. این واقعیت را می‌توان با استفاده از قانون ارشمیدس، این‌گونه بیان کرد که جسم، بدون توجه به عمقی که در آن قرار دارد، همواره مقدار آب ثابتی را جابه‌جا می‌کند که نتیجه آن، ثابت بودن نیروی شناوری است.

۳. نیروی شناوری وارد بر جسم (وزن آب جابه‌جا شده)، هیچ رابطه‌ای با وزن جسم ندارد و تنها به حجم آن بستگی دارد.

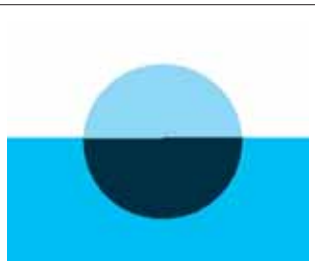
بنابراین، با دو نیرو مواجه‌ایم: نیروی گرانی و نیروی شناوری. نیروی گرانی (وزن واقعی جسم) به جرم جسم بستگی دارد و ارتباطی به حجم آن ندارد. از سوی دیگر، نیروی شناوری، فقط به حجم جسم بستگی دارد و ارتباطی به جرم آن ندارد:

	حجم	جرم
نیروی شناوری (F_b)	✓	×
نیروی وزن (W)	×	✓

اجسام درون شاره‌ها، در سه حالت قرار می‌گیرند

الف. شاید روی سطح آب شناور شوند، که البته خود این وضعیت، بسته به اینکه نسبت چگالی جسم به شاره چقدر باشد، می‌تواند حالت‌های مختلفی داشته باشد. مثلاً در مورد یک کوه یخ، ممکن است حدود هشتاد و پنج درصد حجم آن، زیر سطح آب قرار بگیرد و ما تنها قادر به مشاهده پانزده درصد آن باشیم:

در حالی‌که در مورد توپی با چگالی نصف چگالی آب، قادر به دیدن پنجاه درصد حجم آن خواهیم بود:



ب. ممکن است جسم در ارتفاع یا عمق معینی از شاره قرار بگیرد. مانند بالونی که در ارتفاع ثابت در هوا قرار دارد یا ماهی‌ای که در عمق مشخصی شنا می‌کند. در این‌صورت چگالی جسم را سرنشین بالون و یا ماهی تنظیم می‌کند.

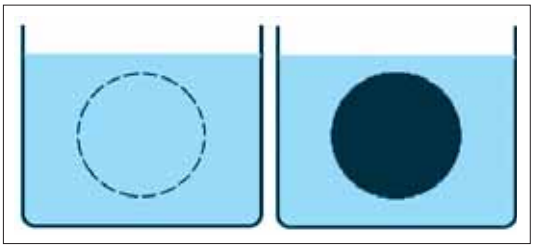
پ. حالت دیگر این است که جسم، به ته شاره سقوط کند که در این حالت چگالی جسم باید از چگالی شاره بیشتر باشد.

این واقعیت به ظاهر ساده و بدیهی را با آنچه پیش‌تر دیدیم، تحلیل می‌کنیم:

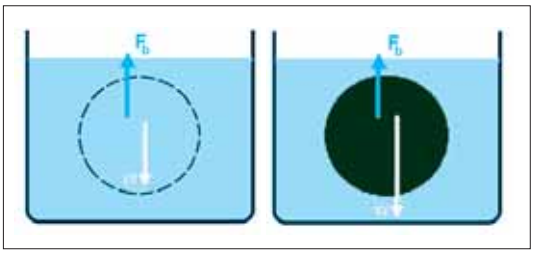
گفتیم که نیروهای وارد بر جسم درون شاره، به حجم و جرم آن بستگی دارند: نیروی شناوری به حجم، و نیروی وزن واقعی، به جرم. این دو کمیت (وزن و جرم)، در کنار هم، چگالی را تعریف می‌کنند. اما چرا اگر چگالی جسم، از چگالی شاره بیشتر باشد، جسم سقوط می‌کند؟

برای پاسخ به این پرسش، باز به پوستهٔ فرضی درون آب برمی‌گردیم:

ظرف‌های آبی را کنار هم قرار می‌دهیم که در یکی، مانند قبل، جسم خارجی‌ای قرار ندارد و تنها، حجمی فرضی و دلخواه از آب را در نظر گرفته‌ایم و در ظرف دیگر، جسم صلب مشابه با حجم فرضی، ولی با جرم بیشتر را قرار داده‌ایم:



چون حجم هر دو جسم (یکی حقیقی و دیگری مجازی) یکسان است، پس نتیجه می‌گیریم که نیروی شناوری وارد بر هر دو یکسان است. اما در مورد نیروی گرانی وارد بر آن‌ها چه می‌توان گفت؟ چون جرم جسم صُلب از آب هم حجمش بیشتر است، پس نیروی گرانی وارد بر آن بزرگ‌تر است و در نتیجه برآیند نیروهای وارد بر آن صفر نیست و جسم به ته شاره سقوط کرده و ته‌نشین می‌شود:



پس نتیجه می‌گیریم که با حجم برابر، جسمی که جرم بیشتری دارد، در شارهٔ مزبور فرو می‌رود و معنای این سخن آن است که اگر «چگالی» جسم غوطه‌ور، از چگالی آن بیشتر باشد، شناور نمی‌ماند و سقوط می‌کند.

×××

داستان ارشمیدس، این‌گونه آغاز شد که مطابق افسانه‌ها، پادشاه سیراکیوز (هرون)، به زرگرش دستور ساختن تاج طلایی را داد و زرگر آن را ساخت. اما چون شاه به زرگر مشکوک شد، از ارشمیدس خواست تا تدبیری بیندیشد و او را از چگونگی و کیفیت کار زرگر آگاه کند. از ادامهٔ داستان که به خزینه حمام و فریادهای ارشمیدس برهنه در خیابان است می‌گذریم و به توضیح روش علمی و هوشمندانهٔ وی می‌پردازیم:

ارشمیدس تاج به ظاهر طلایی را در اختیار داشت. نخستین کاری که او انجام داد، وزن کردن تاج بود.

سپس قطعه‌ای طلایی هم‌وزن تاج را برگزید و این‌دو را با هم بر روی ترازویی، به حالت تعادل درآورد:

سپس، این مجموعه را داخل ظرف بزرگ پرآبی قرار داد. پیش از انجام آزمایش، وی انتظار داشت که به‌واسطهٔ برابری جرم هر دو وزنه، نیروی گرانی وارد بر هر دو یکسان باشد (که چنین هم بود). اما در مورد نیروی شناوری، اتفاق دیگری افتاد که بسیار تکان‌دهنده بود:

ارشمیدس در کمال ناباوری دریافت که تعادل دو جسم در آب به‌هم می‌خورد. در تحلیل چنین پدیده‌ای، می‌توان گفت که نیروی شناوری وارد بر تاج، از نیروی شناوری وارد بر قطعه طلای خالص بیشتر است (در حالی که جرم هر دو یکسان است). بزرگ‌تر بودن نیروی شناوری وارد بر تاج، بدین معناست که وزن آبی که تاج جابه‌جا می‌کند، بیشتر است و در نتیجه، حجم آب جابه‌جا شونده توسط تاج نیز بیشتر است که می‌توان سرانجام به این مهم رسید که حجم تاج پادشاه، از حجم طلای خالص هم‌وزنش بیشتر است! پس چگالی طلای خالص از چگالی تاج بیشتر است و این نتیجه، نیرنگ زرگر طماع را برملا کرد!

منابع

۱. هیوئیت، پل. فیزیک مفهومی (ج ۲). ترجمه دکتر منیژه رهبر.
2. Wolfson, Richard. Physics and Our Universe, The great courses, lecture 19 (Fluid Statics), 2011
3. Holton Cassidy and Rutherford-Springer 2002, Understand Physics.
4. Surway Jewett, Physics for Scientists and Engineers, 8th edition-Book/Cole
۵. گاموف، جورج، سرگذشت فیزیک، رضا اقصی (مترجم).