۱۰

خواص مکانیکی ماده

اغلب به این اهمیت می‌دهند که با چه چیزهایی،
در چه آرایشی، هسته‌های اولیه
متصل می‌شوند، و نیز با چه حرکتهایی
اینها بین خودشان جابه‌جا می‌شوند، زیرا این اتمهای یکسان
به هم می‌آورند آسمان، دریا و زمینها را
رودها، خورشیدها، دانه‌ها، درختان و نفس‌کشندگان را
اما آنها، علاوه بر این، به صورتهای مختلف
با چیزهای مختلف ترکیب می‌شوند، با حرکتهایی که هر کدام برای خود دارند.

لوکرتیوس (۵۵ سال پیش از میلاد)

۱۰ـ۱ مقدمه

از این پس توجه خود را به حرکت ذرات و اجسام صُلب گسترده معطوف می‌کنیم. اما نه ساختار درونی اشیا را می‌کاویم و نه در خصوص تغییر شکل اجسام، ناشی از نیروهای وارد بر آنها پژوهش می‌کنیم.

اما، یکی از قدیمیترین مبارزه‌جوییهای بشر برای فهم طبیعت در همین‌جا نهفته است. چرا آب در فشار جوّی و در دمای بین $0^\circ C$ و $100^\circ C$ به صورت مایع است؟ چرا آب در برابر نور مرئی شفاف است اما در برابر تابش فرو سرخ نسبتاً کدر است؟ چرا و چگونه آب در $0^\circ C$ از مایع به جامد و در دمای بالا به بخار تبدیل می‌شود؟ چرا فلزاتی مانند مس و آلومینیم رساناهای خوب، ولی شیشه، کوارتز و یاقوت از نظر الکتریکی نارسانا هستند؟

صدها پرسش از این دست مطرح می‌شود که می‌توان، و باید، پرسید. احتمالاً پاسخ بعضی از این پرسشها را می‌دانید. به پرسشهای دیگر هم در فصلهای آتی کتاب

پاسخ داده خواهد شد. بسیاری از پرسشها را مطرح نخواهیم کرد، زیرا یافتن پاسخ آنها ما را از بحث اصلیمان بسیار دور خواهد کرد. و دست آخر، بسیاری پرسشهای واقعاً مهم هست که باید بپرسیم، ولی این کار را نمی‌کنیم چون نمی‌دانیم این پرسشها چه هستند! مبارزه‌جویی حقیقی همین‌جاست. مطرح کردن پرسشِ درست، گام نخست و اساسی به سوی یک کشف جدید یا یک تئوری جدید است.

اتمها اجزای اصلی سازندهٔ همهٔ مواد هستند. اتمها با هم ترکیب می‌شوند و مولکولها را به وجود می‌آورند، که در حالت کلی، خواصی بسیار متفاوت با اتمهای تشکیل‌دهندهٔ خود دارند. مثلاً نمک طعام یک ترکیب شیمیایی ساده است که از کلر و سدیم تشکیل شده است، ولی نه به گاز سمّی کلر و نه به فلز بسیار واکنشپذیر سدیم شبیه است . مولکول، کوچکترین جزءِ یک ماده است که همان خواص شیمیایی خود ماده را دارد. در اینجا، تأکید بر خواص شیمیایی است، نه نوری، مکانیکی، یا الکتریکی. این خواص آخر، معمولاً با تغییر حالت ماده تغییر قابل ملاحظه‌ای می‌کنند.

همهٔ مواد می‌توانند به حالت جامد، مایع، یا گازی باشند. اغلب به جای حالت، از واژهٔ فاز استفاده می‌کنیم، و تبخیر یا ذوب شدن را تغییر فاز، یا گذار فازی می‌نامیم. گذارهای فازی دیگری نیز وجود دارد. مثلاً، آهن دقیقاً در $770^{\circ}C$، خواص مغناطیسی نامعمول خود را از دست می‌دهد، و در بالاتر از این دما، آهن نیز از لحاظ مغناطیسی مانند اکثر فلزات دیگر، نظیر روی، تنگستن، و آلومینیم رفتار می‌کند. یکی دیگر از گذارهای فازی جالب مربوط است به سرب در دماهای بسیار پایین؛ سرب در چنین دماهایی ناگهان، مقاومت الکتریکی خود را کاملاً از دست می‌دهد، و ابَر رسانا می‌شود.

۱۰ـ۲ جامدات، مایعات، و گازها

جامد عبارت است از هر ماده‌ای که به تنشهای برشی به طور کشسان پاسخ دهد.

تغییر شکل را در صورتی کشسان می‌نامیم که: (۱) تغییر شکل متناسب با نیرویی باشد که سبب آن است؛ و (۲) با برداشتن نیرو، تغییر شکل از میان برود.

تنش برشی را به زودی تعریف می‌کنیم. فعلاً می‌توانید تنش برشی را به صورت پیچش تصور کنید. سیّالات ـ نامی کلی که مایعات و گازها را در بر می‌گیرد ـ وقتی که تحت‌تأثیر تنش برشی قرار گیرند، جاری می‌شوند. تغییر شکل سیّالات کشسان نیست.

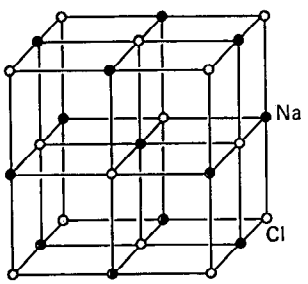
اشکال این تعریفها در این است که برخی مواد، مانند شیشه و پلاستیک، در دماهای بالا جریان می‌یابند، و با پایین آمدن دما، به‌تدریج چسبنده‌تر می‌شوند؛ سرانجام در دماهای معمولی، پاسخ مکانیکی آنها مانند جامدات معمولی، نظیر آهن یا نمک طعام، می‌شود. برای شیشه، گذار از مایع به جامد، تعریف دقیقی ندارد.

یک تعریف دیگر برای جامد، براساس ساختار میکروسکوپی آن، از این قرار است:
جامد هر ماده‌ای است که در آن، موضع میانگین اتمهای سازا ساختار بلوری ویژه‌ای را تشکیل دهند.

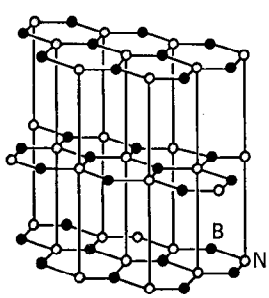
این تعریف را گاهی به تعریف قبلی ترجیح می‌دهیم، چون با این تعریف، از ابهامی که هم‌اکنون ذکرش گذشت، اجتناب می‌شود. البته این تعریف نیز کامل نیست، چون نمی‌تواند جامدات آمورف (بی‌ریخت) را در بر گیرد.

مدلهای چند بلور را در شکل ۱۰–۱ مشاهده می‌کنید. به خاطر داشتن این نکته مهم است که اتمها در داخل بلور ساکن و بی‌حرکت نیستند، بلکه با دامنه‌ای که بستگی به دما دارد، حول نقطهٔ تعادلشان نوسان می‌کنند. تنها موضع میانگین اتمهاست که به طور منحصر به فرد توسط ساختار بلور مشخص می‌شود.

در سیالات–مایعات یا گازها–موضع مولکولها به طور تصادفی (کاتوره‌ای) آرایش می‌یابند. فقط چگالی تعداد میانگین، یعنی میانگین تعداد مولکولها در واحد حجم، کاملاً معین است. در سیالات نیز، مانند جامدات، اتمها و مولکولها پیوسته در حرکتند.



سدیم کلرید



بور نیترید

شکل ۱۰–۱ ساختارهای بلوری برخی جامدات بلوری معمولی. ساختار NaCl (نمک طعام) چنان است که هر یون کلر با بار منفی، در محاصرهٔ یونهای مثبت فلز قلیایی قرار دارد، و برعکس. بور نیترید در یک ساختار شش ضلعی، شبیه کندوی عسل متبلور می‌شود.

معمولاً مایع و گاز را حالتهای جداگانه‌ای از ماده می‌دانیم. به طور کلی، تعیین اینکه یک ماده به صورت کدام یک از این دو حالت است دشوار نیست. تغییر فاز در دما و فشار مشخصی روی می‌دهد. اما اگر گاز خیلی متراکم باشد و دمایش به درستی تنظیم شود، به نقطهٔ بحرانی می‌رسیم، یعنی به شرایطی که در آن تمایز بین دو فاز ناپدید می‌شود.

از این مشاهده و همچنین از اصطلاح کلی سیال، روشن می‌شود که فازهای مایع و گازی، دست کم از بعضی جهات، با هم رابطهٔ نزدیکتری دارند تا با فاز جامد. این شباهتها کدامند؟

اولاً، بعضی از خواص مکانیکی این دو فاز از نظر کیفی به هم شبیه‌اند، هرچند تفاوتهای کمّی بدیهی و مهمی نیز وجود دارد. مایعات و گازها سیالند؛ یعنی جریان می‌یابند. جامدات چنین نیستند.

ثانیاً، در مقیاس مولکولی نیز بین آنها شباهتهایی وجود دارد. در مایعات و گازها، مولکولها به طور تصادفی آرایش یافته‌اند و می‌توانند با سهولت نسبی داخل ماده حرکت کنند. این موضوع به کمک این واقعیت آشکار می‌شود که اگر قطره‌ای از مادهٔ رنگی خوراکی قرمز رنگ به داخل یک لیوان پر از آب ریخته شود، پس از مدتی، حتی بدون هم‌زدن آب، همهٔ مایع را به طور یکنواخت رنگین می‌کند؛ همچنین اگر اندکی هیدروژن سولفید در گوشه‌ای از یک اتاق قرار گیرد، بوی بد آن به سرعت در همهٔ اتاق پخش می‌شود. این فرایند در آمیختن، که پخش نام دارد، در جامدات و در دماهایی که به اندازهٔ کافی پایینتر از نقطهٔ ذوب باشد، اساساً وجود ندارد.

همین‌قدر که تا اینجا برشمردیم برای برخی شباهتها کافی است. اما تفاوت مایعات و گازها کجاست؟ تفاوت اصلی در چگالی ذرات است. مطابق جدول ۱۰ـ۱ ، جرم و چگالی تعداد مولکولهای هر گاز در فشار جو و دمای متعارف نوعاً هزار بار از جرم و چگالی تعداد مولکولهای مایعات و جامدات کمتر است. در مایعات و جامدات، اتمها و مولکولها نسبتاً به هم نزدیکند. در گازها، میانگین فاصلهٔ اتمها زیاد است. این تفاوت بزرگ در چگالی تعداد مولکولها، نتایج بلافصلی دارد. اگرچه هم مایعات و هم گازها در برابر متراکم شدن مقاومت می‌کنند، گازها خیلی بیشتر از مایعات تراکم پذیرند. همچنین، تغییر چگالی هنگام ذوب شدن معمولاً فقط چند درصدی است؛ اکثر مواد هنگام انجماد منقبض می‌شوند، ولی چندتایی از آنها، مخصوصاً آب، منبسط می‌شوند اما مقدار انقباض یا انبساط نسبتاً ناچیز است. در مقابل، در گذار از فاز مایع به فاز گازی، معمولاً تغییر بسیار بزرگی در چگالی صورت می‌گیرد.

جدول ۱۰ـ۱ چگالی جرمی و چگالی تعداد مولکولهای چند ماده در ۰°C و فشار ۱atm.

ماده	حالت	چگالی جرمی، ρ، kg/m^3	چگالی تعداد مولکولها $/m^3$ مولکول
هوا	گاز	۱٫۳	$۲٫۷ \times ۱۰^{۲۵}$
هلیم	گاز	۰٫۱۸	$۲٫۷ \times ۱۰^{۲۵}$
هیدروژن	گاز	۰٫۰۹	$۲٫۷ \times ۱۰^{۲۵}$
اکسیژن	گاز	۱٫۴۳	$۲٫۷ \times ۱۰^{۲۵}$
کربن‌دی‌اکسید	گاز	۲٫۰	$۲٫۷ \times ۱۰^{۲۵}$
جیوه	مایع	$۱٫۴ \times ۱۰^{۴}$	$۴٫۲ \times ۱۰^{۲۸}$
آب	مایع	$۱٫۰ \times ۱۰^{۳}$	$۳٫۳ \times ۱۰^{۲۸}$
یخ	جامد	$۹٫۲ \times ۱۰^{۲}$	$۳٫۱ \times ۱۰^{۲۸}$
آلومینیم	جامد	$۲٫۷ \times ۱۰^{۳}$	$۶٫۰ \times ۱۰^{۲۸}$

دومین تفاوت مهم بین مایعات و گازها با چگالی نسبتاً زیاد مایعات رابطهٔ تنگاتنگی دارد. گازها آن‌قدر منبسط می‌شوند که همهٔ حجمی را که آنها را محضور کرده است پر کنند؛ اما نیروهای ربایشی متقابلی که بر مولکولهای مایع وارد می‌آیند، از انبساط آنها که متناظر است با پر شدن فضا، جلوگیری می‌کنند. در میدان گرانشی زمین، مایعی که در یک ظرف ریخته شود، ظرف را از کف ظرف به بالا پر می‌کند. اما اگر گرانش وجود نداشته باشد، مایعات شکلی کروی به خود می‌گیرند. این شکل کروی نمایشی است از کشش سطحی در سطح بین مایع و گاز، مایع دیگر، یا جامدی که مایع مورد نظر را احاطه کرده است.

۱۰ـ۳ چگالی و خواص کشسان جامدات

وقتی یک شیء را برای عمل مفروضی انتخاب می‌کنیم، مثلاً انتخاب یک سیم نازک برای نگهداشتن یک جرم، عموماً از قبل می‌دانیم که این شیء چه خواصی باید داشته باشد.

ممکن است مشخص کنیم که سیم باید از فلز نسبتاً سختی، مثل تنگستن ساخته شده باشد، به‌طوری که طولش تحت کشش ۵۰ N به طور کشسان به اندازهٔ ۱ mm افزایش یابد، و قادر باشد کشش ۳۰۰ N را تحمل کند. در این‌صورت می‌توان تعداد زیادی سیمهای تنگستنی را آزمود تا سیمی که با شرایط مشخص شده مطابقت داشته باشد پیدا شود.

شیوهٔ تجربی آزمون و خطا ضروری نیست؛ برای انتخاب سیمی با ابعاد مناسب، فقط باید چند پارامتر ذاتی مشخصهٔ همهٔ نمونه‌های تنگستن را، به هر شکل و ابعادی که باشند، بدانیم. بنابر این، تعیین هویت و تعریف خواص ذاتی ماده که بتوان آنها را برای پیشبینی پاسخ مکانیکی هرنمونه‌ای که از مادهٔ خاصی ساخته شده باشد به کاربرد، مهم است.

۱۰ـ۳(الف) چگالی

چگالی یکی از این خواص ذاتی ماده به شمار می‌آید؛ خاصیتی که در زندگی روزمره بیشتر از خواص دیگر کاربرد دارد و آسانتر از سایر خواص ماده می‌شود آن را فهمید. اغلب با در دست گرفتن یک قطعه از زه اتومبیل و برآورد وزن آن، و مقایسهٔ آن با ابعاد ظاهریش، می‌توانیم حدس بزنیم که از پلاستیک با پوشش فلزی ساخته شده است یا از فولاد. با این کار، عملاً، چگالی جسم-و به بیان دقیقتر، چگالی وزنی آن-را تخمین می‌زنیم.

چگالی جرمی، ρ، یک ماده بنابر تعریف، عبارت است از جرم در واحد حجم. یعنی

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (۱۰ـ۱)$$

بنابر این، جرم یک شیء از رابطهٔ زیر به دست می‌آید

$$m = \rho V \qquad (۱۰ـ۲)$$

و وزن آن نیز به این قرار به دست می‌آید

$$W = mg = \rho g V$$

که V حجم شیء است. واحد چگالی جرمی در SI کیلوگرم بر متر مکعب و دیمانسیون آن $[M]/[L]^3$ است.

چگالی جرمی چند جامد و مایع معمولی در جدول ۱۰–۲ آمده است. توجه کنید که مقادیر ρ در دمای خاصی داده شده‌اند. اکثر مواد با افزایش دما منبسط می‌شوند، و در نتیجه چگالی آنها با افزایش دما کاهش می‌یابد. این قاعده چند استثنا هم دارد؛ مشخصترین مورد در این خصوص، آب است، که با افزایش دما در محدودهٔ ۰°C تا ۴°C، منقبض می‌شود.

یک متر مکعب، حجم نسبتاً بزرگی است. گرم بر سانتیمتر مکعب یکی از واحدهای چگالی است که نسبت به کیلوگرم بر متر مکعب مناسبتر به نظر می‌رسد. از تعریف گرم و سانتیمتر می‌رسیم به

$$1\,g/cm^3 = 1000\,kg/m^3 \qquad (۱۰\text{-}۳)$$

برحسب این واحد بزرگتر، چگالی آب در ۴°C برابر $1\,g/cm^3$ است.

وزن مخصوص ماده، بنابر تعریف، عبارت است از نسبت چگالی آن به چگالی آب در ۴°C. بنابراین وزن مخصوص، کمیتی بدون دیمانسیون است؛ مقدار آن برابر است با چگالی جرمی ماده بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب.

جدول ۱۰-۲ چگالی برخی مواد معمولی در ۰°C و فشار 1 atm.

جامدات	چگالی، kg/m^3	مایعات	چگالی، kg/m^3	گازها	چگالی، kg/m^3
مس	$8,93 \times 10^3$	اتانول	$0,79 \times 10^3$	هوا	1,29
شیشه	$(2,4 - 6,0) \times 10^3$	اتر	$0,74 \times 10^3$	آمونیاک	0,77
طلا	$19,3 \times 10^3$	گلیسرول	$1,26 \times 10^3$	کربن دی اکسید	2,0
سرب	$11,3 \times 10^3$	نفت	$(0,8 - 0,95) \times 10^3$	هلیم	0,18
نیکل	$8,8 \times 10^3$	آب	$1,0 \times 10^3$	هیدروژن	0,09
پلاتین	$21,4 \times 10^3$	جیوه	$1,35 \times 10^4$	اکسیژن	1,43
نقره	$10,5 \times 10^3$	نیتروژن(−196°C)	$0,81 \times 10^3$		
تنگستن	$19,3 \times 10^3$	هلیم(−269°C)	$0,125 \times 10^3$		
اورانیم	$18,7 \times 10^3$				
چوب	$(0,25 - 1,0) \times 10^3$				
روی	$6,9 \times 10^3$				
آهن(فولاد)	$7,8 \times 10^3$				
آلومینیم	$2,7 \times 10^3$				
یخ	$0,92 \times 10^3$				

مثال ۱۰ـ۱ طول مکعبی از آلومینیم که وزن آن با وزن یک سانتیمتر مکعب طلا برابر باشد، چه‌قدر است؟

حل: باید داشته باشیم

$$\rho_{Al}(L_{Al})^3 = \rho_{Au}(1\,cm)^3$$

بنابر این $$L_{Al} = (1\,cm)\sqrt[3]{\frac{\rho_{Au}}{\rho_{Al}}} = (1\,cm)\sqrt[3]{\frac{19{,}3}{2{,}7}} = 1{,}93\,cm$$

مثال ۱۰ـ۲ در فشار جوّی، هوا در دمای $-194^\circ C$ مایع می‌شود. چگالی هوای مایع $0{,}92 \times 10^3\,kg/m^3$ است. اگر همهٔ هوای داخل اتاقی به ابعاد $5{,}00\,m \times 7{,}00\,m \times 3{,}00\,m$ متراکم شود، چند لیتر هوای مایع جمع می‌شود؟ (از تفاوت چگالی هوا بین $0^\circ C$ و دمای معمولی اتاق که $20^\circ C$ است چشم بپوشید.)

حل: حجم اتاق برابر است با

$$V = 5{,}00 \times 7{,}00 \times 3{,}00\,m^3 = 105\,m^3$$

جرم کلّ هوای اتاق عبارت است از

$$M = \rho_A V = (1{,}29\,kg/m^3)(105\,m^3) = 135\,kg$$

حجمی که این جرم از هوا اشغال می‌کند در هنگامی که تا حد مایع شدن متراکم شده باشد، برابر است با

$$V_{\text{هوای مایع}} = \frac{M}{\rho_{\text{هوای مایع}}} = \frac{135\,kg}{0{,}92 \times 10^3\,kg/m^3} = 0{,}147\,m^3 = 147\,L$$