آموزشی

فیزیک گذر ریسمان از یخ

پیروز مهذبی، استاد دانشگاه دیسکانسین
ترجمه: احمد توحیدی

یکی از قدیمی‌ترین و جالب‌ترین آزمایش‌های مربوط به گرما و ترمودینامیک، قراردادن ریسمانی روی یک قالبِ یخ، در حالی است که دو وزنه از دو سر آن آویزان شده باشد. پس از چندی، متوجه می‌شویم که ریسمان از یخ گذشته است بدون آنکه یخ دو نیم شود. توضیح سادهٔ این اثر آن است که فشارِ ریسمان باعث ذوب یخ بلافاصله زیر ریسمان می‌شود. ریسمان پایین می‌لغزد، و آب بالای آن دوباره منجمد می‌شود. این پدیده، جالب و برای بیشتر شاگردان کنجکاو درسِ علوم به حدّ کافی سرگرم‌کننده است، بنابراین درخور توضیح مفصل و کَمّی بیشتری است.

نخستین پرسش آن است که چرا باید یخ بر اثر فشار ذوب شود. بر پایهٔ اصل لوشاتلیه[1]، وقتی دستگاهی در تعادل با اختلال روبه‌رو شود، به‌طوری به آن واکنش نشان می‌دهد که اختلال حذف یا کمینه شود. در فشار یک اتمسفر، یخ و آب در دمای $0^\circ C$ در تعادل‌اند. وقتی یخ ذوب می‌شود، حجمش کاهش می‌یابد. بنابراین، بر پایهٔ اصل لوشاتلیه، اگر فشارِ روی یخ را در دمای $0^\circ C$ به بالاتر از یک اتمسفر افزایش دهیم، یخ باید ذوب شود تا حجمش و در نتیجه اختلال کاهش یابد، که این عمل باعث افزایش فشار می‌شود.

اثر فشار روی یخِ در حال ذوب را هم می‌توان از نمودار فازِ فشار- دما برای دستگاه آب در شکل(۱) درک کرد. شیب هر نمودارِ همزیستی از معادلهٔ کلاوسیوس- کلاپیرون به‌دست می‌آید.

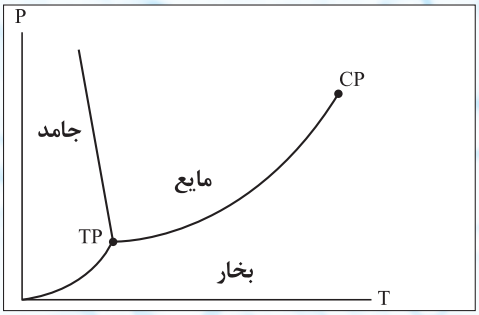
$$\frac{dp}{dT}=\frac{\Delta H}{T\Delta V}, \qquad (1)$$

که ΔH گرمای نهان یا (تغییرانتالپی) و ΔV تغییر حجم در حالِ گذر است، باتوجه به شکل، شیب نمودار (که تقریباً خطر راست است) منفی است. زیرا وقتی یخ ذوب می‌شود، گرمای نهان آن مثبت است (تقریباًبرای همه مواد چنین است) امّا تغییرات حجمش منفی است. بنابراین، بر پایه معادله کلاوسیوس- کلاپیرون[2] $\frac{dp}{dT}<0$ در نتیجه، با افزایش فشار، دمای ذوب کاهش می‌یابد، که با اصل لوشاتلیه سازگاری دارد. از سوی دیگر، برای مادهٔ معمولی که هنگام ذوب منبسط می‌شود، شیب نمودار مثبت است و افزایش فشار دمای ذوب را افزایش می‌دهد.

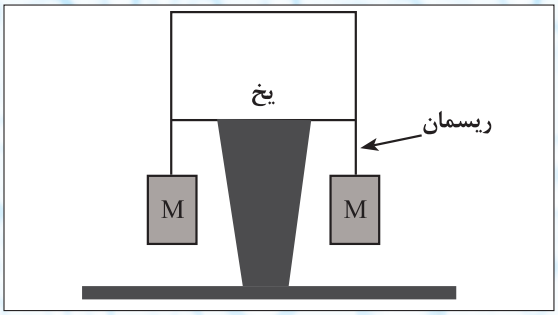
نخستین آزمایش گذر ریسمان از یخ را باتملی[3] با عنوان «ذوب و باز افسرد یخ در سال ۱۸۷۲» گزارش داده است. واژهٔ **بازافسرد** را اولین‌بار تیندال و هاکسلی[4] در سال ۱۸۷۵ برای توصیف این مشاهدهٔ فاراده ارائه کردند که وقتی دو قطعه یخ با هم تماس پیدا می‌کنند به یکدیگر می‌چسبند.

در مقاله سال ۱۹۶۵ مارک زیمانسکی[5] در مجله فیزیکزتیچر[6] با عنوان «بازافسرد یخ پدیدهٔ پیچیده‌ای است»، فیزیکِ ریسمانِ در حال گذر از یخ به‌طور کمّی بررسی شده است. او دربارهٔ این موضوع اظهار می‌دارد که با افزایش فشار روی یخ، دمای ذوب پایین می‌آید و در یک فرایند بی‌در روی برگشت‌پذیر که در طی آن انتروپی ثابت باقی می‌ماند دمای یخ کاهش می‌یابد. سپس بیان می‌کند که اگر یخ فشار منجمد باقی بماند، انتروپی باید به علت کم‌شدن دما کاهش یابد، بنابراین، مقداری یخ باید ذوب شود. ما در ادامه مقاله نشان خواهیم داد اگرچه فرآیند تقریباً بی‌دَررو است و نقطه ذوب یخ با افزایش فشار پایین می‌آید امّا دمای آن تا زمانی که مقداری یخ ذوب نشود کاهش پیدا نمی‌کند. در واقع، اگر دما ابتدا کاهش یابد، یخ نباید ذوب شود. افزون بر این، ما درست به همان نتایجی رسیدیم که زیمانسکی پیش‌تر به‌دست آورد بود امّا به‌روشی که رویکرد قابل فهم‌تری دارد.

همان‌طور که پیش از این گفته شد، وقتی ماده‌ای تغییر حالت می‌دهد، تغییرات فشار و دمایِ مطلق آن در نمودارِ همزیستی طبق معادله کلاوسیوس- کلاپیرون را معادلهٔ(۱) به‌هم مربوط می‌شوند. این معادله را می‌توان برای هر نوع تغییر حالت، جامد- مایع، مایع- گاز، و جامد- گاز به‌کار برد امّا



شکل۱. نمودارِ فاز فشار- دما برای دستگاه آب نزدیک نقطه سه‌گانه (CP)، TP نقطه بحرانی است.



شکل۲. فشار وارد شده به یک قالب یخ به‌وسیله ریسمانی که دو وزنه از آن آویزان است. ریسمان به‌تدریج از یخ می‌گذرد بدون آنکه یخ دو نیم شود.

در اینجا ذوب یخ مورد توجه ماست، $\Delta H = ۳۳۳/۵\frac{J}{g}$ و چگالی‌های یخ و آب در دمای $۰^\circ C$ به ترتیب $۰/۹۱۶۸\frac{g}{cm^۳}$ و $۰/۹۹۹۸\frac{g}{cm^۳}$ است، بنابراین خواهیم داشت.

$$\Delta V = \left[\frac{۱}{۰/۹۹۹۸} - \frac{۱}{۰/۹۱۶۸}\right]\times ۱۰^{-۶} \quad (۲)$$
$$= -۹/۰۵۵\times ۱۰^{-۸}\ \frac{m^۳}{g}$$

باتوجه به رابطه (۱) در نسبت ΔH به ΔV یکایِ کمیت حذف می‌شود، بنابراین، ΔH و ΔV را برای ماده می‌توان برمول، بر کیلوگرم، بر گرم و یا بر هر کمیت دیگری انتخاب کرد. افزون بر این، ΔH و ΔV نسبت به دما حساس نیستند، در گسترهٔ دمای مورد آزمایش با تقریب خوبی ثابت خواهند ماند.

بنابراین، مقدارهای ΔH و ΔV در معادله (۱) تغییرات دمای ذوب یخ و تغییرات فشار را به یکدیگر مربوط می‌سازد. برای مثال، در حوالی $۰^\circ C$ (۲۷۳/۱۵ K)، از معادله (۱) مقدار زیر به‌دست می‌آید.

$$\frac{dp}{dT} = -۱/۳۴۸\times ۱۰^{۷}\ \frac{N}{m^۲K} = -۱۳۳\ \frac{atm}{^\circ C} \quad (۳)$$

که نشان می‌دهد برای هر ۱۳۳ اتمسفر افزایش فشار، دمای ذوب یخ $۱^\circ C$ کاهش می‌یابد. این مقدار درست همان نتیجه‌ای است که زیمانسکی به‌دست آورده بود امّا، در رویکرد کنونی روش قابل فهم‌تری برای «بازافسرد» ارائه می‌شود.

آزمایش

اکنون آزمایش زیر را در نظر بگیرید: یک قالب یخ روی پایهٔ عایقی مانند قطعه‌ای چوب‌پنبه قرار دارد، در حالی که مطابق شکل۲ وزنه‌هایی از دوطرف آن آویزان شده‌اند. دلیل کاربرد ریسمان عایق گرمایی آن است که رسانش گرما به‌وسیله ریسمان از محیط به یخ به کم‌ترین مقدار برسد و فرآیند را تقریباً بی‌دررو نگه دارد. دستگاه در دمای اتاق و یا در یخچالی با دمای چند درجه بالای صفر نگه داشته می‌شود. متوجه شدیم که ریسمان آهسته از یخ می‌گذرد بدون آن یخ دو نیم شود. قطر ریسمان که مشابه نخ ماهی‌گیری است برابر با $D = ۰/۳۰۴۸\ mm$. همچنین فرض کنید طول ریسمانی که در بالای یخ با آن تماس دارد (جایی که اساساً همهٔ نیرو وارد می‌شود) $L=۵\ cm$ و جرم هر وزنه $M=۲Kg$ باشد. بنابراین فشاری که ریسمان به یخ وارد کند برابر است با

$$P = \frac{F}{A} = \frac{۲Mg}{LD} = \frac{۲(۲)(۹/۸۱)}{۰/۰۵(۳/۰۴۸\times ۱۰^{-۴})} \quad (۴)$$
$$= ۲/۵۷۵\times ۱۰^{۶}\ \frac{N}{m^۲}$$

یخ در دمای $۰^\circ C (۲۷۳/۱۵ K)$ در فشار یک اتمسفر $(۱/۰۱۳\times ۱۰^{۵}\ \frac{N}{m^۲})$، ذوب می‌شود. بگذارید دمایی که یخ بر اثر فشار $۲/۵۷۵\times ۱۰^{۶}\ \frac{N}{m^۲}$ ریسمان به آن ذوب می‌شود را محاسبه کنیم. تغییر فشار برابر است با

$$dP = ۲/۵۷۵\times ۱۰^{۶} - ۱/۰۱۳\times ۱۰^{۵} \quad (۵)$$
$$= ۲/۴۷۴\times ۱۰^{۶}\ \frac{N}{m^۲} = ۲۴/۴۲atm$$

با توجه به رابطه (۳) دمای متناظر با این تغییر فشار $dT = -۰/۱۸^\circ C$ است. بنابراین، یخ در $۰/۱۸^\circ C$ زیر نقطه ذوب معمولی، تحت فشاری که ریسمان به آن وارد می‌کند ذوب

می‌شـود. بدیهی است که کاهش دمای نقطه ذوب کم است. بنابراین، پرسش این اسـت که چگونه این کاهش کم دمای نقطه ذوب می‌تواند برای ریسمان این امکان را فراهم کند که از یخ بگذرد.

وقتـی یک قالب یخِ سـرد در دمای اتاق قـرار گیرد، به آهسـتگی گرم می‌شود تا دمای آن به $0^\circ C$ برسد. به‌هر حال، این وضعیت وقـت می‌گیرد زیرا یخ رسـانای گرمایی خوبی نیست. سپس هنگامی که سطح یخ به آهستگی گرمای نهان ذوب خـود را جذب می‌کند، قالب به‌تدریج ذوب می‌شـود. از این پس سـطح یخ با لایهٔ نازکی از آب پوشیده می‌شود و دما در فصل مشترک یخ- آب در دمای $0^\circ C$ باقی می‌ماند. بر اثر فشـاری که ریسمان وارد می‌کند نقطهٔ ذوب یخ بلافاصله زیر ریسـمان به $-0/18^\circ C$ کاهش می‌یابد. چون دمای یخ هنوز $0^\circ C$ اسـت مقداری یخ بلافاصله زیر ریسمان ذوب می‌شود و ریسـمان از وسط آب تشـکیل شده به طرف پایین حرکت می‌کند امّا با ذوب شـدن یخ، و تأمین گرمای نهان ذوب (در حـدود $80\frac{Cal}{g}$) از حوالی ریسـمان، دمای محل به‌طور قابل توجهی به زیر $0^\circ C$ فرو می‌افتد. در این وضعیت مقدار آبی که اکنون بالای ریسمان است و تحت تأثیر فشار بالایی قرار ندارد بار دیگر منجمد می‌شود، در این حالت آب، گرمای نهان ذوب را پس می‌دهد و دمای محل بار دیگر به $0^\circ C$ صعود می‌کند. این مراحل تکرار می‌شود تا اینکه ریسمان کاملاً از قالب یخ بگذرد. در اینجا بار دیگر تأکید می‌کنیم که در هر مرحله پیش از آن که مقداری یخ ذوب شود، دمای نزدیک ریسمان کاهش نمی‌یابد.

وقتی ریسـمان (که جرم آن در مقایسه با جرم وزنه‌های آویزان شـده ناچیز اسـت) از یخ می‌گذرد، انرژی پتانسـیل گرانشـی وزنه‌های آویزان کاهش می‌یابد و به آسانی به گرما تبدیل می‌شود. امّا، در پیوسـت مقاله نشان داده‌ایم، که این گرما در مقایسه با گرمای حاصل از ذوب و بازافسرد یخ ناچیز است. به‌هر حال، محرکِ فرآیند گرانی است و در پایان، فقط انرژی پتانسیل وزنه‌ها کاهش و انرژی داخلی دستگاه و اطراف آن افزایش می‌یابد.

شایان ذکر است که این آزمایش را نمی‌توان با یخ خشک (CO_2 جامد) انجام داد. زیرا داد. زیرا دیوکسیدکربن در هنگام ذوب منبسط می‌شود، بنابراین، بر پایه اصل لوشاتلیه، یخ خشک بر اثر فشـار ذوب نمی‌شود. همچنین بنا به رابطه(۱)، چون $\Delta V > 0$ است در این مورد دمای ذوب با فشار افزایش می‌یابد.

اگرچه فشـار ریسـمان حامل وزنه‌ها وقتی هنگام ذوب از نزدیـک دمـای $0^\circ C$ از یخ می‌گذرد، عامل مهمی اسـت، اما دلایل تجربی نشـان می‌دهند که عامل‌های دیگری باعث لغزندگی یخ و بازافسـرد آن در دماهای پایین‌تر و فشـارهای کوچک‌ترند. در واقع، روش آزمایش‌های مختلف نشان داده‌اند که ویژگی‌های سطحی یخ مربوط به لایهٔ نازک شبه مایع روی سطح‌اش حتی در دماهای زیر $0^\circ C$ باقی مانند.

مکونن[7] برای وجود این لایه براساس فشار سطح داخلی کـه باعث بازآرایی سـاختار مایع می‌شـود، توضیحـی ارائه کرده اسـت. این نتایج در پاییـن آوردن دمای ذوبِ بالاترین سـطح یخ تا $-13^\circ C$ با داده‌های به‌دست آمده از پراکندگی پرتو x سـازگاری دارد. جالب اسـت که وجود لایه شبه مایع را نخسـتین‌بار فاراده در سـال ۱۸۵۰ هنگام سـخنرانی در انجمن سلطنتی در مورد مشـاهده اینکه وقتی دو قطعه یخ آبدار به یکدیگر تماس داده می‌شـوند به‌هم می‌چسبند ارائه کرد. از سوی دیگر، جیمز تامسون[8]، این دیدگاه را که بازافسرد قالب‌های یخ مربوط به فشار وارد شده به آنهاست را استحکام بخشید. نکتهٔ جالب توجه اینکه برخلاف آزمایش‌های بعدی فاراده که فرضیه‌اش را تأیید کرد و همچنین پشتیبانی ویلارد گیبس[9] در سـال ۱۸۷۶ در مورد انتشار آن، دیدگاه تامسون نزدیک به یک قرن پا برجا باقی ماند.

ریسـمان‌های تحت فشـار همچنین می‌تواننـد از یخ در دماهـای خیلی پایین‌تر از $0^\circ C$ بگذرنـد امّا، در دماهای $-0/5^\circ C$ فشارِ ذوب باعث فرآیند نمی‌شود و سرعت گذر سیم بسیار کند است. پیشنهاد شده است که در دماهای پایین‌تر، جریان یک لایه نازکِ برشـی نیوتونی شاره چسبنده اطراف سیم سازوکاری برای گذر سیم است.

سـرانجام، اگر در آزمایش بالا، از یک سـیم فلزی مانند سـیم مسی استفاده شود، سرعت گذر بر اثر رسانایی گرمای ذوب در قطر سـیم در مراحل ذوب و باز انجماد افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. در این مورد، بخشی از سیم که بیرون از یخ است باید عایق‌کاری شود تا گرمای رسانایی به خارج از یخ به کم‌ترین مقدار خود برسد.

پیوست

وقتی که ریسـمان به فاصلـهٔ dy پایین می‌آید، کاهش انرژی پتانسـیل گرانشـی دو وزنه، که به گرمای Q_1 تبدیل می‌شود برابر است با

$$2Mgdy=Q_1 \qquad (پ.1)$$

در این بازهٔ زمانی، با عبور ریسـمان از یخ حجم یخی که ذوب و باز منجمد می‌شود برابر با $LDdy$ است. حاصل ضرب ایـن حجم در چگالی یخ و گرمـای نهان ذوب یخ برابر با Q_2 مقدار گرمایی اسـت که یخ هنگام ذوب و بازافسرد به ترتیب می‌گیرد و سپس پس می‌دهد.

$$Q_2 = (LDdy)\rho_{\text{یخ}}\,\Delta H \qquad (پ-2)$$

نسبت دو گرما

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{2Mg}{LDdy\rho_{\text{یخ}}\Delta H} \qquad (پ-3)$$

$$= \frac{2(2)(9/81)}{0/05(3/048\times10^{-4})(920)(333/5\times10^{3})} = 0/0084$$

بنابراین، Q_1 کمتر از Q_2 است.

پی‌نوشت

1. Le chatelier
2. Clausius- Clapeyron
3. Bottamley
4. Tyndall and Huxley
5. Mark Zemausky
6. Physics Teacher
7. Macconen
8. James Thomson
9. Willard Gibbs

منابع

Pirooz Mohazzabi
"The physics of string Passing Through Ice
The Physics Teacher
Vol. 49, october 2011