آنتروپی و احتمال؛

وقتی مفاهیم و واژه‌ها به رفع کج‌فهمی‌ها یاری می‌رسانند

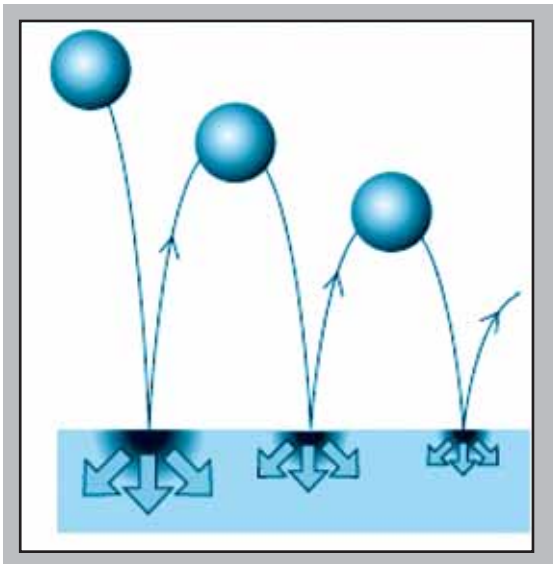
زهرا ارزانی
معلم شیمی ناحیه ۲، کرج

چکیده
آنتروپی، از مبحث‌های مطرح شده در کتاب شیمی (۳) است. طی دو سال گذشته، این مبحث را با دو شیوه در کلاس سوم دبیرستان نمونه دولتی شهید دکتر بهشتی کرج تدریس کردم و اثر هر شیوه را در میزان درك و یادگیری موضوع، مورد بررسی قرار دادم. در همین حال، دیدگاه‌های شماری از معلمان شیمی استان البرز را نیز دربارهٔ روش تدریس این مبحث جمع‌آوری کردم. بنا به این بررسی‌ها، اگر بحث آنتروپی، تنها با طرح موضوع بی‌نظمی و سپس پرداختن به راه‌های کاهش یا افزایش بی‌نظمی تدریس شود، سبب می‌شود دانش‌آموزان، آنتروپی را تنها به معنی نامنظم بودن سامانه بدانند. در حالی که می‌توان به کمك نمونه‌های مناسب و کمی توضیح دربارهٔ ریزحالت‌های انرژی، این کج‌فهمی را تا حد زیادی کاهش داد.

کلیدواژه‌ها: کج‌فهمی، آنتروپی، نظریهٔ احتمال

مقدمه

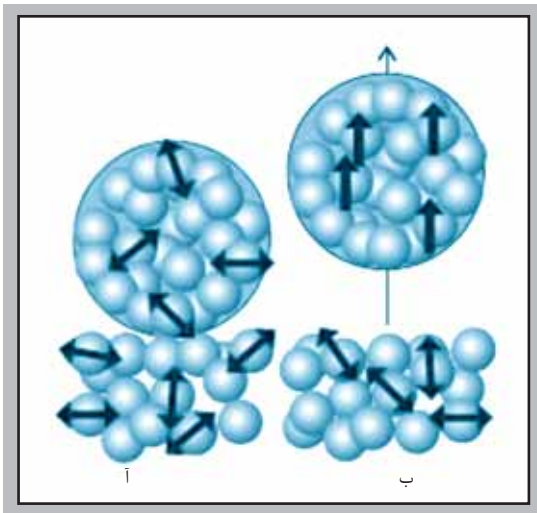
دیده‌ایم که یك توپ، پس از برخورد با زمین، دوباره به هوا برمی‌گردد در حالی‌که شدت پرتاب شدن آن، پس از هربار برخورد با زمین کمتر می‌شود تا اینکه کاملاً از حرکت بازمی‌ماند. مهم‌تر از این مشاهده، این است که هرگز ندیده‌ایم توپی به‌طور خودبه‌خود به هوا پرت شود و مانند یك فیلم که به عقب برمی‌گردد، رفتار کند.



شکل ۱ نمایش جهت حرکت یك توپ هنگام برخورد به زمین و انتقال انرژی به اتم‌های سطح

با برخورد توپ به زمین، در حالی‌که انرژی آن به سطح زمین منتقل می‌شود، گرمای ذره‌های سازندهٔ توپ و حرکت‌های گرمایی ذره‌های سطح زمین افزایش می‌یابد. بخشی از انرژی توپ در هر بار زمین خوردن، میان ذره‌های سطح توزیع می‌شود.

برای اینکه توپ بتواند دوباره در خلاف جهت اول حرکت کند باید انرژی گرمایی ذره‌های سطح با هم جمع شده، به توپ منتقل شوند و این، امکان‌ناپذیر است، شکل ۲.

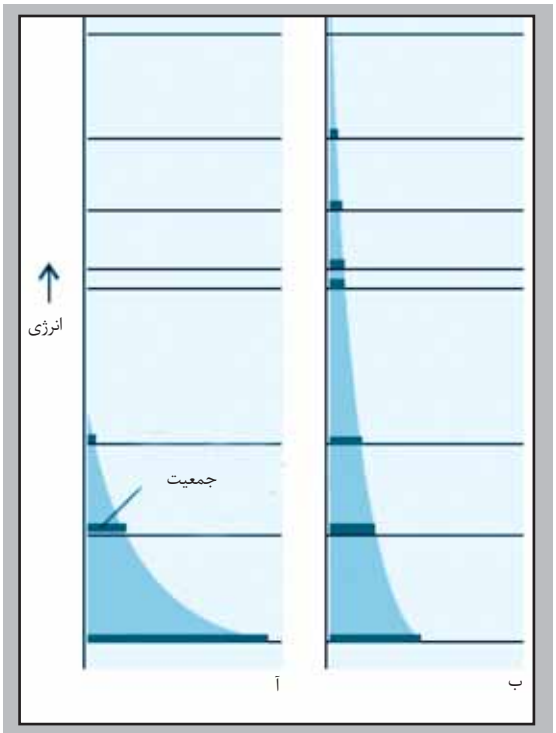


شکل ۲ آ) توپ پس از برخورد به زمین. مولکول‌ها داراي حرکت انتقالي در جهت یکسان هستند.
ب) حرکت گرمایي مولکول‌ها پس از توقف توپ. مولکول‌هاي سطح زمین و مولکول‌هاي توپ در جهت‌هاي مختلف حرکت مي‌کنند.

هرچه انرژی در میان ذره‌ها بیشتر توزیع شود آنتروپی هم بیشتر می‌شود. در حالت جامد، حرکت ذره‌ها درون جامد محدودتر از حالت مایع است. بنابراین در مایع که ذره‌ها آزادانه‌تر حرکت می‌کنند انرژی در سطح وسیع‌تری پخش می‌شود.

با نگاهی دقیق‌تر می‌توان دریافت که چرا با زیادتر شدن حرکت مولکول‌ها و توزیع انرژی، یك واکنش می‌تواند به‌طور خودبه‌خودی انجام گیرد. یك مولکول گاز N_2 را در نظر بگیرید که با سرعت مشخصی دارای حرکت‌های انتقالی، چرخشی و ارتعاشی است. انرژی مولکول‌ها به مجموع این حرکت‌ها و حرکت الکترون‌ها بستگی دارد. همان‌طور که انرژی الکترون کوانتیده است انرژی کل مولکول نیز باید کوانتیده در نظر گرفته شود. به هر حالت کوانتیده، یك ریزحالت می‌گویند و اگر روی ریزحالت‌های انرژی گرمایی تمرکز کنیم، تعداد ریزحالت‌ها تعداد راه‌هایی را به ما نشان می‌دهند که مولکول، در اثر حرکت‌های مختلف از آن‌ها برخوردار است.

به این ترتیب نحوهٔ توزیع مولکول‌ها در ترازهای انرژی به دما وابسته است. فرض کنیم ۱۰ ذره گاز N_2 داریم و حالت «آ»، ترازهای انرژی را در دمای پایین نشان دهد. می‌بینیم که بیشتر مولکول‌ها در ترازهای پایین‌تر قرار گرفته‌اند. یادآوری می‌شود که انرژی به‌طور یکسان در میان ذره‌ها توزیع نمی‌شود ولی با افزایش دما، توزیع انرژی بیشتر می‌شود و بر تعداد مولکول‌های ترازهای انرژی بالاتر می‌افزاید، شکل ۳ـ ب. هرچه دما بالاتر باشد اطلاع ما از موقعیت ذره‌ها کمتر خواهد بود و احتمال یافتن ذره‌ها در تراز پایه، کاهش می‌یابد.



شکل ۳ آ) در دماي پایین، تعداد کمي از ترازها اشغال شده‌اند.
ب) در دماي بالا، احتمال حضور ذره‌ها در ترازهاي بالاتر هم وجود دارد.

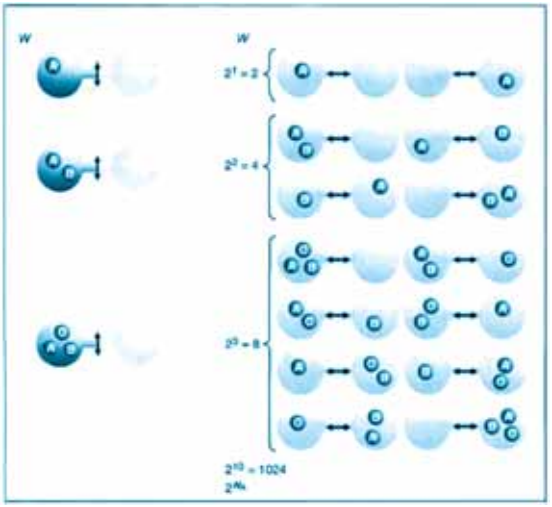
تدریس آنتروپی

روش ۱

در سال ۱۸۷۷ لودویك بولتزمن، آنتروپی را با رابطهٔ $S=K\ln W$ معرفی کرد که در آن، W تعداد حرکت‌های انتقالی ممکن برای ذره‌هاست. K نیز ثابت بولتزمن برابر با $\frac{R}{N_A}$ است که در آن R ثابت عمومی گازها و N_A عدد آووگادرو است.

محاسبهٔ S به شکل‌های مختلف امکان‌پذیر است. یکی از حالت‌ها، در نظر گرفتن احتمال است. در نظر بگیرید که یك mol گاز Ne در دمای ۲۹۸ K از یك ظرف به حجم ۱۰L به ظرفی به حجم ۲۰L منتقل می‌شود. با باز کردن شیر میان دو ظرف، گاز میان ظرف‌ها توزیع می‌شود و در هر ظرف ۰/۵ mol گاز وجود خواهد داشت. (چرا؟) آیا می‌توان این فرایند را به‌طور وارونه انجام داد بی‌آنکه نیرویی خارجی بر یکی از ظرف‌ها اعمال شود؟

در آغاز فرض کنید که تنها یك اتم نئون داریم. اگر شیر را باز کنیم امکان حرکت این اتم بیشتر می‌شود و 2^1 ریزحالت برای سامانهٔ شامل این اتم ایجاد می‌شود. یعنی تعداد ریزحالت‌ها دو برابر زمانی است که شیر بسته است.



با افزایش تعداد اتم‌های Ne، تعداد ریزحالت‌ها بیشتر می‌شود و ذره‌ها حرکت‌های انتقالی متفاوت خواهند داشت و امکان حرکت‌های انتقالی با $۲^{(\text{تعداد اتم})}$ تغییر می‌کند، شکل ۵.

پس برای یك مول گاز Ne، ۲^{N_A} حرکت انتقالی امکان‌پذیر می‌شود که همان تعداد ریزحالت‌هاست و چنین داریم:

$$\frac{W_۲}{W_۱} = ۲^{N_A}$$

$$\Delta S_{\text{سامانه}} = S_۲ - S_۱ = k\ln W_۲ - k\ln W_۱ = k\ln\frac{W_۲}{W_۱}$$

و از این دو رابطه خواهیم داشت:

$$\Delta S_{\text{سامانه}} = \frac{R}{N_A}\ln ۲^{N_A} = N_A.\frac{R}{N_A}\ln ۲ = R\ln ۲$$

$$\Delta S_{\text{سامانه}} = ۸/۳۱۴\frac{J}{mol.k} \times ۰/۶۹۳ = ۵/۷۶\frac{J}{mol.k}$$

روش ۲

در روش دیگر می‌توان برای محاسبهٔ آنتروپی از رابطهٔ $S = \frac{q}{T}$ استفاده کرد که در آن، T دمای واکنش و ثابت است و q گرمای مبادله شده را نشان می‌دهد.

گرمای سامانه برای هنگامی که حجم یك مول گاز Ne از ۱۰L به ۲۰L افزایش می‌یابد در دمای ۲۹۸K به‌طور تجربی اندازه‌گیری می‌شود که ۱۷۱۸J است. پس می‌توان نوشت:

$$\Delta S = \frac{۱۷۱۸J}{۲۹۸K} = ۵/۷۶\frac{J}{K}$$

و این، همان نتیجه‌ای است که از راه احتمال و با استفاده از رابطهٔ بولتزمن به‌دست آمد.

نمایی نزدیك از اثر انتخاب روش تدریس مناسب

در سال تحصیلی ۹۲-۹۱، برای تدریس بحث آنتروپی در کلاس سوم ریاضی دبیرستان نمونه دولتی شهید دکتر بهشتی کرج، از بررسی میزان آگاهی دربارهٔ موقعیت یك پرنده، به‌عنوان

اگر بحث آنتروپی، تنها با طرح موضوع بی‌نظمی تدریس شود سبب می‌شود دانش‌آموزان، آنتروپی را تنها به معنی نامنظم بودن سامانه بدانند

یك نمونه استفاده کردم که در تدریس خود، موقعیت پرنده‌ای در یك ساختمان دو طبقه را با موقعیت همان پرنده در یك ساختمان ده طبقه مورد مقایسه قرار دادم. از این نمونه چنین نتیجه‌گیری کردم که هرچه اطلاعات از موقعیت ذره (پرنده) کمتر باشد، آنتروپی بیشتر است. این توجیه با شکل موجود در کتاب چاپ سال ۹۱ سازگاری داشت که در آن افزایش آنتروپی یك گاز در اثر افزایش حجم ظرف به تصویر کشیده شده بود.

پس از استفاده از نمونهٔ پرنده و موقعیت آن، راه‌های افزایش و کاهش آنتروپی را مطرح کردم. در بهمن ماه سال ۱۳۹۲، از دانش‌آموزان این کلاس خواسته شد مطلب کوتاهی دربارهٔ آنتروپی بنویسند. همهٔ آن‌ها آنتروپی را با «بی‌نظمی» معادل گرفته و سپس با بیان یك نمونه، به توضیح راه‌های کاهش یا افزایش آنتروپی پرداخته بودند.

اثر همراهی مفاهیم و واژه‌ها در تفهیم مطلب

در سال تحصیلی ۹۳-۹۲، بخش «*بیشتر بدانید*» به صفحات ۶۸ و ۶۹ کتاب درسی افزوده شد که در نتیجهٔ آن، تصمیم گرفتم بحث آنتروپی را به دو شکل در کلاس تدریس کنم: نخست، نمونهٔ پرنده و بررسی آگاهی از موقعیت آن در دو ساختمان را مطرح کردم و بحث را با بیان افزایش احتمال و افزایش آنتروپی ادامه دادم. آنگاه فهرست کردن راه‌های افزایش یا کاهش انرژی پس از توضیح شکل‌های گنجانده شده در بخش *بیشتر بدانید* انجام گرفت. هنگامی که از آموخته‌های دانش‌آموزان به روشی که قبلاً اشاره شد، ارزیابی به عمل آوردم برایم مشخص شد که مطالب آورده شده در بخش *بیشتر بدانید* برای آن‌ها قابل فهم نبوده است. در ردیف نخست از جدول ۱، یادداشت‌های دانش‌آموزان دربارهٔ آنتروپی، دسته‌بندی شده است.

بنا به نتیجهٔ مشاهده شده، من بار دیگر مطلب موجود در حاشیهٔ کتاب و این موضوع را که بی‌نظمی به معنی آشفتگی و نامرتب بودن سامانه نیست، یادآوری کردم و برای درك بهتر دانش‌آموزان نمونهٔ دیگری را عنوان کردم که همان توجه به حرکت توپ در برخورد چندباره به سطح زمین و توقف کامل آن بود تا توجه آنان به این نکته جلب شود که مولکول‌ها از نظر مقدار انرژی در سطوح مختلفی قرار دارند و با افزایش تعداد این سطوح، آنتروپی افزایش می‌یابد. منظور از ریزحالت‌ها در بخش *بیشتر بدانید* را

ردیف	تعداد کل دانش‌آموزان	آنتروپی = بی‌نظمی و آشفتگی (دستهٔ ۱)	آنتروپی = بی‌نظمی و رابطهٔ آن با آگاهی از موفقیت ذره (دستهٔ ۲)	آنتروپی = بی‌نظمی و رابطهٔ آن با احتمال و آوردن نمونه (دستهٔ ۳)	آنتروپی و رابطهٔ آن با احتمال و میزان آگاهی از موفقیت، با توضیح قابل قبول (دستهٔ ۴)	آنتروپی و مفهوم احتمال و اطلاع از موفقیت با توضیح کامل (دستهٔ ۵)	آنتروپی همراه با توضیح ناقص
۱	۲۹	۱۷	٤	۷	۰	۰	۱
۲	۲۹	۲	۰	۱۷	۵	۳	۲

جدول ۱

هم «تعداد سطوح انرژی» تعریف کردم که مولکول‌ها در آن قرار می‌گیرند. به این ترتیب، بدون اشاره به رابطهٔ بولتزمن، بار دیگر بحث احتمال با افزایش تعداد مولکول‌ها یا وسیع شدن فضای حرکت، مورد بحث قرار گرفت. ردیف دوم جدول ۱، برداشت دانش‌آموزان را پس از تکرار مبحث دربارهٔ آنتروپی نشان می‌دهد.

نمونه‌هایی از یادداشت‌ها

دستهٔ ۱

ـ آنتروپی معیاری برای میزان بی‌نظمی مواد است.

ـ آنتروپی کمیتی است که میزان بی‌نظمی را نشان می‌دهد؛ بنابراین، اگر در یك واکنش، ماده از حالتی که بی‌نظمی آن کمتر است به حالتی برسد که بی‌نظمی آن بیشتر است، آنتروپی افزایش یافته است.

دستهٔ ۲

ـ آنتروپی برای اندازه‌گیری میزان بی‌نظمی یك سامانه است. پس هرچه بتوانیم دربارهٔ یك سامانه راحت‌تر اطلاعاتی به‌دست آوریم سامانهٔ منظم‌تری داریم. در واقع، افزایش بی‌نظمی باعث کاهش حدس‌های ما دربارهٔ سامانه می‌شود.

دستهٔ ۳

ـ آنتروپی معیاری از بی‌نظمی یك سامانه است؛ یعنی اگر آنتروپی زیاد شود احتمال وجود ذره‌ها در همهٔ فضای موجود افزایش می‌یابد و ذره‌ها آزادانه‌تر در فضای وسیع‌تری حرکت می‌کنند.

ـ میزان بی‌نظمی اتم‌ها را در مولکول، آنتروپی می‌گویند. بی‌نظمی یعنی هر مولکول احتمال‌های بسیار زیادی برای قرار گرفتن در هر جایی دارد. با باز شدن شیر ظرف، مولکول‌ها در جاهای مختلف بیشتری می‌توانند قرار گیرند. به این احتمال زیاد قرار گرفتن مولکول‌ها آنتروپی می‌گویند.

دستهٔ ۴

آنتروپی به احتمال بستگی دارد. هرچه احتمال بیشتر شود در واقع، مولکول‌ها پخش‌تر هستند و بی‌نظمی هم بیشتر می‌شود و پیدا کردن و بررسی تك‌تك ذره‌ها دشوارتر می‌شود.

ـ آنتروپی کمیتی است که میزان بی‌نظمی را نشان می‌دهد.

تعداد ریزحالت‌ها تعداد راه‌هایی را به ما نشان می‌دهند که مولکول، در اثر حرکت‌های مختلف از آن‌ها برخوردار است

اما نکتهٔ مهم این است که آنتروپی به احتمال بستگی دارد یعنی مربوط به آشفتگی نیست. به‌همین دلیل، توپ در هر بار برخورد به زمین، مقداری از انرژی خود را به مولکول‌های سطح زمین منتقل می‌کند و این کاهش انرژی باعث حرکت مولکول‌ها در جهت‌های مختلف می‌شود. در واقع، هرچه احتمال بیشتر باشد بی‌نظمی بیشتر است و انرژی بیشتر پخش می‌شود.

دستهٔ ۵

ـ آنتروپی معیاری از بی‌نظمی سامانه است که کمیتی مقداری و تابع حالت است. هرچه احتمال بیشتر باشد، آنتروپی بیشتر می‌شود. برای نمونه، هنگامی که یك توپ به زمین برخورد می‌کند سطوح انرژی آن پراکنده می‌شود و پس از چندبار برخورد، متوقف می‌شود. همچنین وقتی جسمی جامد را به مایع تبدیل می‌کنیم ذره‌ها آزادانه‌تر حرکت می‌کنند و فضای بیشتری برای حرکت دارند.

دیدگاه‌های معلمان

دربارهٔ افزوده شدن مطلب بیشتر بدانید به کتاب شیمی (۳) از ۲۰ معلم شیمی در استان البرز نظرخواهی به عمل آمد. هدف از این نظرخواهی که در آن معلمان به‌طور تصادفی انتخاب شدند، ارزیابی اثر این مطلب در کمك به افزایش درك مفهوم آنتروپی بود. در نظرخواهی دو پرسش مطرح شد:

ـ آیا در مورد کتاب شیمی (۳)، تشکیل جلسه با مؤلفان این کتاب را لازم می‌دانید؟

ـ آیا با آوردن مطلب بیشتر بدانید صفحه‌های ۶۸ و ۶۹ کتاب موافق هستید؟

در جدول ۲، دیدگاه برخی از معلمان در پاسخ به دو پرسش یاد شده دسته‌بندی شده است

نام	ناحیه	پرسش ۱	پرسش ۲
خانم نوروزی	۲	خیر	خیر، یا حذف شود یا باید به‌طور کامل مطرح شود.
خانم مجیدزاده	۲	خیر	مثال باید واضح‌تر باشد.
خانم صفارپور	۳	خیر	مطلب تا حد زیادی قابل درک و مناسب است.
خانم صادقیان	۳	خیر	برای مدارس خاص مانند تیزهوشان و نمونه مردمی مناسب است اما برای مدارس عادی سنگین است. به‌هر حال چون مطلب، در بیشتر بدانید آمده است، مشکلی ایجاد نمی‌کند.
خانم رحیمی	٤	بله	بله، به فهم بیشتر کمک می‌کند.
خانم کارگرزاده	۱	بله	بله، جالب است.
آقای ابراهیمی	اشتهارد	خیر	خیر، به فهم مطلب کمکی نمی‌کند.*

جدول ۲

* این مطلب، به‌تنهایی نمی‌تواند تصور درستی از آنتروپی در ذهن دانش‌آموز ایجاد کند. درک کامل آنتروپی برای دانش‌آموز دورهٔ دبیرستان امکان‌پذیر نیست و طرح چنین مطالبی موجب بروز ابهامات بیشتر می‌شود.