

# دما و قانون صفرم ترمودینامیک

وحید کریمی پور- دانشکده فیزیک - دانشگاه صنعتی شریف

۳ مهر ۱۳۹۸

## ۱ مقدمه

قرون هجدهم و نوزدهم شاهد انقلاب صنعتی و اختراع ماشین بخار و سپس انواعی از موتورها و ماشین های مختلف برای کاربردهای صنعتی بود. کاربردهایی در گستره گوناگونی از صنایع و حرفه ها، از صنایع نساجی و ذوب فلزات گرفته تا حمل و نقل و کشتی های بخار و لوکوموتیوها. این اختراعات بیش از آنکه مرهون تلاش دانشمندان باشد مرهون تجربه و ابداع صنعتگران و مهندسان بود که هر کدام اختراع صنعتگر قبلی را اندکی بهبود می بخشید. امروزه تنها به مدد نیروی تخیل می توان هیجانی را که این اختراعات یکی پس از دیگری پدید می آورده اند، دریافت. از دیگ بخاری که اب را از ته یک معدن به بالا می کشید تا موتورهای لوکوموتیوها و کشتی های بزرگ که همگی حرارت را به کار مکانیکی تبدیل می کردند راه خیلی درازی طی شد، و در طول این مسیر همواره یک سوال مشخص پیش روی مخترعان بود: چگونه می توان بازده این موتورها را افزایش داد؟ تاریخ تحول علم کار و گرما تاریخی طولانی است که به تحولات اجتماعی و اقتصادی و انقلاب صنعتی گره خورده است و از دانسته های کیفی در باره سرما و گرما و اثرات آن بر طبع آدمی و اندازه گیری کیفی آن توسط پزشکان شروع شده و به دقیق ترین اندازه گیری های امروزه می رسد. هم چنین در طول این مسیر تصویر ما از گرما از صورت یک سیال که از جسمی به جسم دیگر جریان می یابد آغاز شده و به صورت نوعی انرژی که قابل تبدیل به انواع دیگری از انرژی است تحول می یابد. در طول همین مسیر است که مهم ترین کشف قرن هجدهم یعنی قانون بقای انرژی رخ می دهد که بر مبنای آن گرما و کار مکانیکی و انرژی الکتریکی و شیمیایی همه به هم قابل تبدیل هستند. اما کشفی به همان اندازه مهم این بود که تبدیلات انرژی در هر جهتی رخ نمی دهد. همه کار به گرما تبدیل می شود اما همه گرما به کار تبدیل نمی شود. گرما از جسم گرم تر به

جسم سردتر منتقل می شود و نه بالعکس. تغییر و تبدیلات در جهان جهتی دارد که با افزایش بی نظمی سنجیده می شوند و نه با کاهش آن. شاید این جهت همان چیزی است که باعث فهم ما از زمان می شود.

داستان تطور و تحول ترمودینامیک به عنوان یکی از مهم ترین شاخه های فیزیک کلاسیک داستانی است پرکشش و پر از فراز و نشیب. برای یادگیری چگونگی تدوین ترمودینامیک می بایست به کتابهای تاریخ علم نگاه کرد. اما روش ما برای یادگیری ترمودینامیک و مکانیک آماری روشی تاریخی نیست اگرچه هر از گاهی سری به تاریخ می زنیم و چگونگی تکوین ایده های مهم را پی می گیریم. بجای روش تاریخی سعی می کنیم از منظر کسی که در پایان راه ایستاده است به راه طی شده نگاه کنیم و ببینیم تعاریف کلی ترمودینامیک چیستند، تجربه های اساسی ای که منجر به اصول اساسی این علم شده اند کدام اند و این علم بر مبنای چه اصولی بنا شده است. سپس یاد خواهیم گرفت که چگونه می توان از این اصول دیگر قواعد و قوانین این علم را نتیجه گرفت و برای تبیین و توصیف پدیده ها به کار بست. کار خود را از اصلی ترین تعاریف در این فصل شروع می کنیم و به تدریج پیش می رویم.

## ۱.۱ توصیف ترمودینامیکی یک دستگاه

یک دستگاه فیزیکی را با چه متغیرهایی می بایست توصیف کنیم؟ تعداد این متغیرها چندتا است؟ پاسخ این سوال بستگی به مقیاس مشاهده ما دارد. کره زمین در مقیاس کیهان شناسی یک نقطه بدون بعد و در مقیاس منظومه شمسی یک گوی کوچک صلب و بسیار صاف و در مقیاس زمین شناسی کره ای عظیم با رشته کوه ها و اقیانوس هاست. در مقیاس اتمی کره زمین انبوه سرگیجه آوری از مولکول ها و اتم هاست که همگی تابع قوانین مکانیک کوانتومی اند. واضح است که برای هیچ گونه توصیفی از کره زمین ساختار اتمی آن را در نظر نمی گیریم، نه به دلیل اینکه چنین ساختاری وجود ندارد، بلکه به این دلیل که آن همه متغیر برای توصیف تغییر و تحولات کره زمین مفید نیستند و به درد نمی خورند. اما تنها مقیاس مشاهده نیست که نوع متغیرها را تعیین می کند بلکه این که چه نوع تغییر و تحولاتی از دستگاه فیزیکی را در نظر داریم نیز در تعیین متغیرها نقش دارند. یک کپسول پر از آب را در نظر بگیرید. از دیدگاه مکانیکی تنها متغیرهای مرکز جرم و تکانه و هم چنین زاویه هایی که جهت قرار گرفتن این کپسول را در فضا تعیین می کنند مهم هستند. اما اگر به تبدیلات داخل کپسول توجه داشته باشیم و اینکه آیا آب درون آن یخ بسته یا به بخار تبدیل شده و فشار درون آن چقدر است این متغیرها کافی نیستند. این نوع متغیرها را متغیرهای ترمودینامیکی و چنین دستگاهی را یک دستگاه ترمودینامیکی می نامیم. چنین دستگاه هایی لزوما در چارچوب ماشین ها و موتورها و یخچال ها مطالعه نمی شوند بلکه مطالعه دستگاه های طبیعی نیز از نظر ترمودینامیکی مهم است. به عنوان مثال چنین دستگاهی می تواند یک دریاچه طبیعی باشد که تابش آفتاب آب درون آن را بخار می کند و بارش باران سطح آب درون آن را بالا می برد. متغیرهای ماکروسکوپی این چنین دستگاهی می توانند حجم آب درون دریاچه، دما

و فشار در سطح دریاچه و چگالی بخار در بالای دریاچه باشند. اگر به توصیف ماکروسکوپی کمی دقیق تری نیاز داشته باشیم می توانیم بسته به نیاز، توصیفی از چگونگی توزیع فشار در عمق دریاچه را نیز اضافه کنیم. به عنوان مثالی دیگر می توانیم به یک مخلوط شیمیایی توجه کنیم. برای توصیف این دستگاه کافی است علاوه بر مختصاتی نظیر فشار و حجم این را نیز اضافه کنیم که نوع مواد مخلوط شده چیست و درصد هر کدام چقدر است؟

این توصیف ها همگی چند خصلت مشترک دارند و آن اینکه متغیرهای ماکروسکوپی یا ترمودینامیکی عموماً:

- ۱ - تعدادشان کم است،
  - ۲ - به آسانی قابل اندازه گیری هستند،
  - ۳ - قابل لمس هستند،
  - ۴ - هیچ گونه ربطی به چگونگی ساختمان میکروسکوپی ماده ندارند.
- نقطه مقابل این نوع توصیف، توصیف میکروسکوپی است.

## ۲.۱ دیدگاه میکروسکوپی

از طرف دیگر توصیف میکروسکوپی یک دستگاه می بایست نشان دهنده جزئیات رفتاری تمام اجزای خرد و ریزمقیاس آن دستگاه باشد. اگر بخواهیم به صورت میکروسکوپی یک کپسول گاز را در آزمایشگاه توصیف کنیم می بایست نخست تعیین کنیم که چه تعداد مولکول گاز در کپسول وجود دارد که معمولاً از مرتبه عدد آووگادرو ست و سپس باید بگوییم که هر مولکول در هر لحظه در کجاست و چه سرعتی دارد. این توصیف یک توصیف بسیار جزئی و دقیق است. برای گازی با تعداد  $N$  مولکول می بایست حداقل  $6N$  مختصه مکان و سرعت را برای مولکول ها توصیف کنیم. (البته اگر بخواهیم از نحوه جهت گیری فضایی هر مولکول صرف نظر کنیم). متغیرهای میکروسکوپی هر چه که هستند خصلت هایی درست مقابل خصلت های متغیرهای ماکروسکوپی دارند به این معنا که :

- ۱ - تعداد آنها بسیار زیاد است،
  - ۲ - اندازه گیری آن ها آسان نیست،
  - ۳ - قابل لمس نیستند،
  - ۴ - یک فرض مشخص در باره جزئیات ساختاری ماده تشکیل دهنده آن دستگاه دارند.
- در نگاه اول به نظر می رسد که این دو نحوه توصیف با یکدیگر ارتباطی ندارند اما کمی بعد و در طول این درس ارتباط عمیق بین این دو توصیف

اشکار می شود. به طور خلاصه و نمادین می توان این ارتباط را به صورت زیر توصیف کرد:

$$\langle \text{Microscopic Variables} \rangle = \text{Macroscopic Observables.} \quad (1)$$

به عبارت دیگر متوسط کمیت ها و متغیرهای میکروسکوپی همان مشاهده پذیرهای ماکروسکوپی هستند. به عنوان مثال فشار ناشی از برخورد میلیون ها مولکول به دیواره ظرف است و متوسط نیروها و ضربه هایی که این مولکول ها به دیواره ظرف وارد می کنند به صورت فشار که یک مشاهده پذیر ماکروسکوپی است خود را نشان می دهد. به عنوان مثال دیگر می توان به قطبش الکتریکی ایجاد شده در یک تیغه دی الکتریک نگاه کرد که یک مشاهده پذیر ماکروسکوپی است و ناشی از هم راستا شدن تقریبی میلیون ها قطبش الکتریکی میکروسکوپی مربوط به اتم ها و مولکول ها در یک ماده است.

از نظر تاریخی نخست ترمودینامیک به عنوان علمی که رابطه کار و گرما یا به طور کلی تر علمی که رابطه مشخصه های ترمودینامیکی را به نحوی که در بالا توصیف کردیم توصیف می کند پدید آمده است. سپس مکانیک آماری به عنوان علمی که با استفاده دقیق از قوانین حاکم بر ذرات نظیر مکانیک کلاسیک و مکانیک کوانتومی و استفاده از آمار و احتمال رفتار سیستم های ماکروسکوپی را توصیف کرده تکوین یافته است.

## ۲ مثالهایی از مختصات ترمودینامیکی

در این مرحله که هستیم هنوز دما به عنوان یک مختصه ترمودینامیکی شناخته شده نیست. هدف این فصل این است که دما را تعریف کند. بنابراین وقتی از مختصات ترمودینامیکی یک دستگاه سخن می گوئیم منظور مختصات ماکروسکوپی یک دستگاه است که شامل دما نیست. در زیر نمونه هایی از دستگاه های مختلف و مختصات ترمودینامیکی آن را معرفی می کنیم.

### ■ گاز درون یک کپسول.

برای چنین سیستمی متغیرهای ترمودینامیکی عبارتند از فشار ( $P$ ) و حجم بر واحد مول یا حجم مولی  $^1 (v)$ . در دستگاه متریک حجم بر حسب متر مکعب و فشار بر حسب پاسکال (یک نیوتن بر متر مربع) سنجیده می شود. گاهی به جای پاسکال از واحد اتمسفر نیز استفاده می شود که برابر با  $10^5$  پاسکال است. علامتی که برای پاسکال به کار می رود  $Pa$  و علامتی که برای اتمسفر به کار می رود  $Atm$  است.

### ■ یک ماده دی الکتریک:

<sup>1</sup>Molar Volume

برای چنین دستگاهی متغیرهای مستقل عبارتند از میدان الکتریکی  $E$  و قطبش الکتریکی بر واحد حجم  $P$ . میدان الکتریکی بر حسب ولت بر متر و قطبش الکتریکی بر واحد حجم بر حسب  $\frac{Coulomb}{m^2}$  سنجیده می شود.

#### ■ یک ماده مغناطیسی :

برای چنین دستگاهی متغیرهای مستقل عبارتند از میدان مغناطیسی ( $H$ ) و قطبش مغناطیسی در واحد حجم : ( $M$ ).

#### ■ یک سیم کشان :

برای چنین دستگاهی متغیرهای مستقل عبارتند از طول ( $L$ ) و نیروی کشش سیم ( $T$ ) :

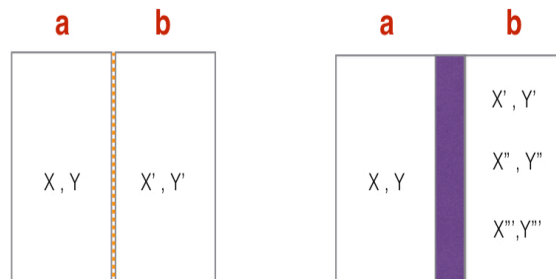
#### ■ یک غشای کشان :

برای چنین دستگاهی متغیرهای مستقل عبارتند از مساحت ( $A$ ) و نیروی کشش سطحی ( $\sigma$ ) .

باید دقت کنیم که این ها ساده ترین سیستم های ترمودینامیکی هستند که دو متغیر ماکروسکوپی مستقل دارند. براحتی می توان دستگاه های پیچیده تری را تصور کرد که بیش از دو متغیر مستقل ترمودینامیکی داشته باشند. برای یک گاز که مولکول های آن دو قطبی الکتریکی دائمی دارند و در میدان الکتریکی قرار گرفته است متغیرهای مستقل عبارتند از فشار، حجم، میدان الکتریکی و قطبش الکتریکی در واحد حجم یعنی  $V, P, E, P$ . برای مخلوط دو گاز که می توانند به یکدیگر نیز تبدیل شوند متغیرهای ترمودینامیکی عبارتند از :  $N_1, N_2, V, P_1, P_2$  که در آن  $N_i$  تعداد مولکول های گاز نوع  $i$  و  $P_i$  فشار ناشی از گاز نوع  $i$  است. می توان به جای متغیرهای بالا متغیرهای زیر را برای توصیف این مخلوط استفاده کرد:  $v_1, P_1, v_2, P_2$ .

## ۱.۲ دما و قانون صفرم ترمودینامیک

برای فرمول بندی قانون صفرم ترمودینامیک نخست می بایست مفهوم متغیرهای ترمودینامیکی مستقل را بشناسیم. متغیرهای ترمودینامیکی مستقل به آن هایی گفته می شوند که می توان با ثابت نگاه داشتن هر کدام از آنها دیگری را هر چقدر که می خواهیم تغییر دهیم. به عنوان مثال می توانیم بگوییم که اگر یک گاز با تعداد مول مشخص از ماده معینی را در نظر بگیریم آنگاه حجم و فشار دو متغیر مستقل از این گاز هستند چرا که می توانیم با ثابت نگاه داشتن حجم گاز، هر چقدر که می خواهیم فشار آن را تغییر دهیم و یا با ثابت نگاه داشتن فشار هر چقدر که می خواهیم حجم گاز را تغییر دهیم. شکل (؟؟) نشان می دهد که این امر چگونه ممکن است. همین کار را در مورد بقیه دستگاه هایی که در بالا نام بردیم نیز



شکل ۱: شکل سمت راست: دو دستگاه توسط یک دیواره بی در رو از یک دیگر جدا شده اند. در حالیکه متغیرهای ترمودینامیکی یک دستگاه ثابت است متغیرهای ترمودینامیکی دستگاه دیگر هر مقداری می تواند داشته باشد. به عبارت بهتر دو دستگاه با یکدیگر به حال تعادل نمی رسند. در شکل سمت چپ متغیرهای ترمودینامیکی دو دستگاه به هم وابسته هستند و با یکدیگر به حال تعادل رسیده اند.

می توان انجام داد. مثلاً می توانیم کاری کنیم که یک ماده مغناطیسی در یک میدان مغناطیسی مشخص هر مقداری از مغناطش در واحد حجم را اختیار کند یا اینکه یک دی الکتریک در یک میدان الکتریکی مشخص هر مقداری از قطبش الکتریکی در واحد حجم را اختیار کند. به این ترتیب این جفت متغیر به هم وابسته نیستند بلکه دو متغیر مستقل از دستگاه مورد نظر هستند. برای سادگی در بحث کنونی خود را محدود به سیستم هایی می کنیم که دو متغیر مستقل دارند و آن ها را با  $X$  و  $Y$  نشان می دهیم. نخست می بایست حالت تعادل<sup>۲</sup> را تعریف کنیم.

■ تعریف: حالتی از سیستم که در آن  $X$  و  $Y$  مقادیر معین دارند و با زمان تغییر نمی کنند یک حالت تعادل نامیده می شود. این که چه مقدار باید صبر کنیم تا یک دستگاه به حالت تعادل برسد بستگی به مشخصات خود آن دستگاه و محیط اطراف آن دارد. ولی مشاهدات تجربی فراوان نشان داده است که این حالت تعادل سرانجام فرا می رسد و متغیرهای مستقل دستگاه پس از تغییرات اولیه سرانجام از تغییر بازمی ایستند و ثابت می مانند.

■ مشاهدات تجربی: حالت تعادل یک سیستم بستگی به حضور یا نزدیکی سیستم های دیگر و نوع دیواره هایی دارد که آنها را از سیستم مورد نظر ما جدا می کند. به عبارت دیگر نوع مرز<sup>۳</sup> یک دستگاه فیزیکی تعیین کننده این است که آن دستگاه فیزیکی چه موقع به تعادل می رسد. در دیاگرام سمت راست از شکل (۱.۲) هر مقداری از  $(X, Y)$  با هر مقداری از  $(X', Y')$  ممکن است. در دیاگرام سمت چپ از همان شکل هر مقداری از  $(X, Y)$  با هر مقداری از  $(X', Y')$  ممکن نیست. به محض تماس این مقادیر تغییر کرده و به مقادیر می رسند که در معادله ای مثل  $f(X, Y, X', Y') = 0$  صدق می کنند. در این حالت می گوئیم که دو سیستم  $A$  و  $B$  با هم به تعادل گرمایی رسیده اند. اگر چه مفهوم گرما را هنوز تعریف نکرده ایم ولی با همان حس شهودی که از گرما داریم می توانیم بگوئیم که یک دیواره ی بی دررو<sup>۴</sup> گرما را از خود عبور نمی دهد ولی یک دیواره ی رسانا<sup>۵</sup> گرما را بخوبی از خود عبور می دهد. دیواره های بی دررو معمولاً ضخیم هستند و از موادی مثل پشم شیشه، چوب و نظایر آن ساخته می شوند و دیواره های رسانا معمولاً نازک اند و عموماً از فلزات ساخته می شوند.

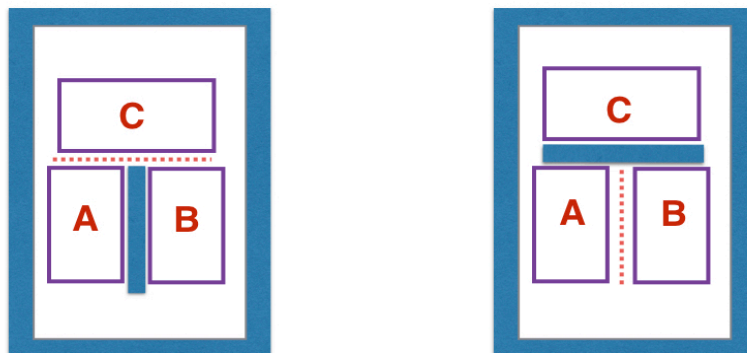
■ قانون صفرم ترمودینامیک: مشاهدات تجربی فراوان نشان داده است که اگر دو سیستم  $A$  و  $B$  به طور جداگانه با سیستم  $C$  به تعادل رسیده باشند، آنگاه اگر این دو سیستم را در تماس با هم قرار دهیم، با یکدیگر در تعادل خواهند بود، شکل (۱.۲). به عبارت دیگر وقتی دستگاه  $A$  و دستگاه  $B$  کنار هم قرار می گیرند و با یک دیواره رسانا از هم جدا می شوند، مشاهده می کنیم که متغیرهای ماکروسکوپی هیچکدام از آنها تغییر نمی کند. این وضعیت در شکل (۱.۲) نشان داده شده است.

## ۲.۲ مفهوم دما

اگر چه به لحاظ حسی و عملی درک نسبتاً روشنی از دما یا گرمی و سردی داریم ولی مفهوم دقیق و علمی دما تنها با اتکای بر قانون صفرم ترمودینامیک امکان پذیر است.

سیستمی مثل  $A$  را با مختصات ترمودینامیکی  $X$  و  $Y$  در نظر بگیرید که با سیستمی مثل  $B$  با مختصات ترمودینامیکی  $X'$  و  $Y'$  در حال تعادل است. شکل (۱.۲). آزمایش نشان می دهد که در حالت تعادل وقتی که سیستم  $A$  دارای مختصات ترمودینامیکی  $(X_1, Y_1)$  است، سیستم  $B$  می تواند دارای مختصات ترمودینامیکی  $(X'_1, Y'_1)$ ،  $(X'_2, Y'_2)$  یا  $(X'_3, Y'_3)$  و نظایر آن باشد. بنابراین سیستم  $B$  می تواند در بی نهایت وضعیت

Boundary<sup>۳</sup>  
Adiabatic Walls<sup>۴</sup>  
Diathermic Walls<sup>۵</sup>



شکل ۲: شکل سمت راست: قانون صفرم ترمودینامیک: شکل سمت چپ. دو سیستم A و B با دیواره های گرما بر از سیستم C جدا شده و با آن به حال تعادل رسیده اند. خود این دو سیستم با دیواره بی در رو از هم جدا شده اند. شکل سمت راست: وقتی تماس این دو سیستم را با C قطع می کنیم و آن دو را با دیواره های گرما بر در تماس قرار می دهیم، مشخصات ترمودینامیکی هیچکدام تغییر نمی کند زیرا از همان ابتدا با یک دیگر در حال تعادل قرار دارند.

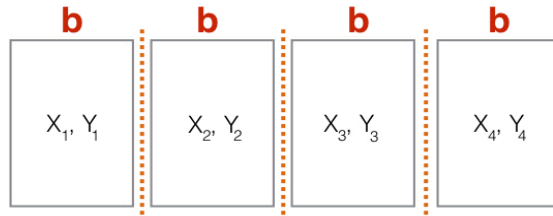
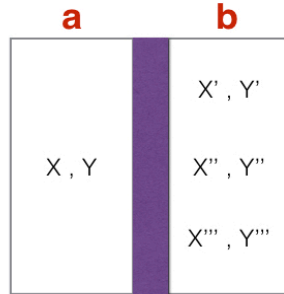
قرار گیرد که همگی با سیستم A در حال تعادل باشند. بنابر قانون صفرم ترمودینامیک خود این وضعیت های متفاوت از سیستم B با یکدیگر در حال تعادل خواهند بود، شکل (۲.۲).

از این به بعد بجای اینکه هربار بگوییم دو دستگاه به حال تعادل رسیده اند می توانیم برای سادگی بگوییم دو دستگاه همدمای شده اند، بدون اینکه در این مرحله منظور خاصی از کلمه دما داشته باشیم یا روشی برای اندازه گیری آن پیشنهاد کرده باشیم. بنابراین در اینجا همدمایی تنها یک لفظ است که به جای «به حال تعادل رسیدن» به کار می رود. این که چرا چنین مفهومی به اسم همدمایی را می توانیم ابداع کنیم در قانون صفرم ترمودینامیک نهفته است. در واقع مجموعه تمام نقاطی از سیستم B که با یک وضعیت از سیستم A و در نتیجه با یکدیگر در حال تعادل اند روی یک منحنی قرار می گیرند. به این منحنی یک منحنی همدمای<sup>۶</sup> می گوییم، شکل (۲.۲).

بنابراین یک منحنی همدمای مکان هندسی همه نقاطی از یک سیستم (در فضای مختصات ترمودینامیکی) است که با هم در حال تعادل خواهند

<sup>۶</sup>isotherm



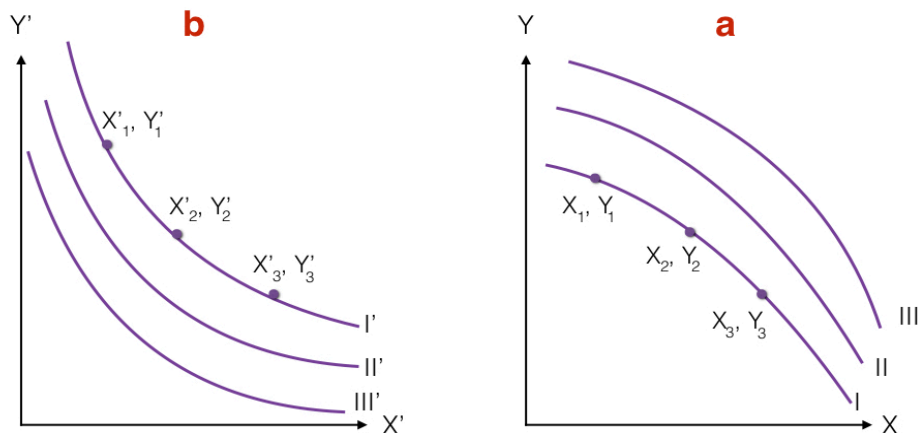


شکل ۳: دستگاه B در حالت های مختلفی که با جفت متغیرهای متنوعی مشخص می شوند در حال تعادل با دستگاه A قرار می گیرد. بنابر قانون صفرم ترمودینامیک که ناشی از تجربه است، تمامی این حالت های دستگاه B نیز باهم در حال تعادل هستند.

بود. عین وضعیت برای سیستم A نیز صادق است. منحنی های  $I$  و  $I'$  یا  $II$  و  $II'$  منحنی های همدمای متناظر خوانده می شوند. می توان به این ترتیب برای همه سیستم های ترمودینامیکی منحنی های همدمای متناظر را تعیین کرد. می گوییم سیستم هایی که روی منحنی های همدمای متناظر هستند، دارای یک دمای یکسان هستند. چنین سیستم هایی اگر در تماس گرمایی با یکدیگر قرار گیرند، در حال تعادل با یکدیگر خواهند بود. به این ترتیب قانون صفرم ترمودینامیک به ما امکان می دهد که بگوییم هر گاه دو دستگاه فیزیکی دمای یکسان داشته باشند آنگاه وقتی در تماس با یک دیگر قرار بگیرند حتما در حال تعادل باقی می ماندند و دستگاه های در حال تعادل نیز همگی یک دما دارند.

### ۳.۲ اندازه گیری دما

علی الاصول ما می توانیم به طور کاملا دلخواه به منحنی های همدمای متناظر در سیستم های متفاوت اعدادی نسبت دهیم و این اعداد را دما بخوانیم. می توانیم به منحنی های  $(I, I', I'', \dots)$  همگی مقدار 1 و به منحنی های  $(II, II', II'', \dots)$  همگی مقدار 0.5 و به منحنی های

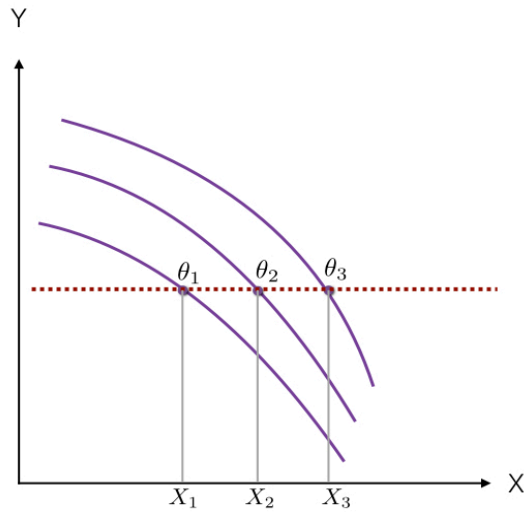


شکل ۴: منحنی های همدمای از دو دستگاه فیزیکی متفاوت. همه وضعیت هایی که روی منحنی های همدمای قرار دارند باهم در حال تعادل خواهند بود.

( $III, III', III'', \dots$ ) همگی مقدار ۳۷.۳ نسبت دهیم. به این روش کاملاً دلخواهی هیچ ایراد منطقی وارد نیست. ولی از لحاظ عملی بهتر است که یک روش منظم تر را برای نسبت دادن دما به منحنی های همدمای به کار ببریم. ساده ترین روش آن است که یک سیستم معین با مختصات  $X$  و  $Y$  که براحتی اندازه گیری می شوند اختیار کنیم و مطابق با یک قاعده به منحنی های همدمای آن اعدادی را نسبت دهیم و سپس همین اعداد را به منحنی های همدمای متناظر برای تمام سیستم های دیگر به کار ببریم. مثلاً می توانیم یک منحنی، معمولاً منحنی  $Y = constant$  را در صفحه  $XY$  مطابق شکل (۳.۲) در نظر بگیریم و برای دمای  $\Theta$  تابعی معین مثل  $\Theta = \Theta(X)$  اختیار کنیم. معمولاً این تابع یک تابع خطی اختیار می شود یعنی قرار می دهیم  $Y = constant, \Theta = aX$ . به سیستم مورد نظر ترمومتر یا دماسنج می گوئیم، به  $X$  مختصه دماسنجی یا ترمومتری می گوئیم. ثابت  $a$  و مقدار  $Y = constant$  کاملاً اختیاری هستند.

■ چند نکته:

یک - می توانیم به جای  $Y = constant$  یک منحنی دیگر را اختیار کنیم مادام که مطمئن باشیم این منحنی تمام منحنی های همدمای را قطع می کند.



شکل ۵: یک تابع  $\theta = \theta(X)$  در  $Y$  ثابت می تواند برای نسبت دادن دما به منحنی های همدمای یک دستگاه ترمودینامیکی به کار رود. تمام نقاط روی یک منحنی همدمای یک دما دارند.

دو - اگر دماسنج، خاصیت دماسنجی، منحنی  $Y = constant$  یا تابع  $\Theta = \Theta(X)$  و یا ثابت  $a$  را عوض کنیم، تمام مقادیر دما عوض خواهند شد ولی هم چنان به همه منحنی های همدمای متناظر یک عدد نسبت داده خواهند شد. مرحله بعدی آن است که ثابت تناسب  $a$  را تعیین کنیم. برای این کار یک نقطه مرجع انتخاب می کنیم و آن را  $X_0$  می نامیم. داریم:

$$\Theta(X_0) = \Theta_0, \rightarrow \Theta_0 = aX_0 \quad (۲)$$

و از آنجا

$$a = \frac{\Theta_0}{X_0}, \quad (۳)$$

و در نتیجه

$$\Theta = \Theta_0 \frac{X}{X_0}. \quad (۴)$$

بنابراین پس از انتخاب دماسنج با عمل بالا یعنی انتخاب  $X_0$  و  $\Theta_0$  دماسنج درجه بندی هم می شود.

■ مثال: می توانیم یک سیم تحت کشش برداریم و دو سر آن را تحت نیروی معین  $T_0$  قرار دهیم. در این صورت طول سیم مختصه دماسنجی ما خواهد بود. با درجه بندی طول سیم یک دماسنج خواهیم داشت. هرگاه طول سیم در تماس با یک محیط به مقدار معینی می رسد درجه روی سیم را می خوانیم و آن را به عنوان دمای محیط و دمای سیم اعلام می کنیم. این که چگونه سیم را درجه بندی می کنیم و دمای درجه بندی شده را چه می نامیم به خود ما بستگی دارد و از اعتبار این دماسنج چیزی کم نمی کند.

■ مثال: می توانیم یک تیغه دی الکتریک برداریم که درون یک خازن با مشخصات معین قرار گرفته و به یک باطری با ولتاژ معین وصل شده. در این حالت بار روی صفحات خازن نشان دهنده قطبش الکتریکی ایجاد شده در دی الکتریک است. می توانیم این بار را به عنوان مختصه دماسنجی این دماسنج به کار ببریم. مثلاً می توانیم بار روی صفحات خازن را با یک الکتروسکوپ اندازه بگیریم و صفحه نمایش الکتروسکوپ را درجه بندی کنیم. در این صورت یک دماسنج ساخته ایم که مثل دماسنج قبلی معتبر است اگر چه ممکن است کار کردن با آن سخت باشد و اندازه گیری مختصه دماسنجی آن نیز با تقریب بسیار ممکن باشد.

■ مثال: می توانیم یک مایع جیوه را در فشار ثابت اتمسفر درون یک لوله باریک بریزیم و از حجم مایع به عنوان مختصه دماسنجی استفاده کنیم. این همان نوع دماسنجی است که در اغلب خانه ها و در مطلب پزشکان لاقبل تا چندسال پیش یافت می شد.

از این مثال ها می توان فهمید که دماسنج خوب دماسنجی است که به آسانی به کار برده شود، مختصه دماسنجی آن به آسانی تغییر کند و با دقت اندازه گیری شود. با توجه به این نکات معلوم است که از مثال های سه گانه فوق دماسنج جیوه ای از همه مناسب تر است. البته همین دماسنج جیوه ای نیز می بایست ثابت و پایدار باشد و رفتار آن امروز و فردا تفاوت نکند. دماسنج های مختلف نمی بایست از نظر مقدار و نوع جیوه شان و قطر لوله و جنس لوله ای که در آن جیوه ریخته شده باهم متفاوت باشند وگرنه برای محیط های یکسان دماهای متفاوتی را نشان خواهند داد. درجه بندی مختصه دماسنجی نیز علاوه بر اینکه می بایست پیوسته باشد نمی بایست یک تابع خیلی غیرخطی باشد چرا که در این صورت دمایی که نشان خواهد داد اگر چه از نظر منطقی درست خواهد بود ولی با احساسی که ما از گرما و سرما داریم مطابقت نخواهد داشت. با توجه به این نوع ملاحظات در مثال بعدی دماسنجی را معرفی می کنیم که مشخصات فوق العاده ای از نظر پایداری و عمومیت دارد.

■ مثال: دماسنج گازی. دماسنجی که به کار می بریم یک گاز رقیق است که در حجم ثابت نگاه داشته می شود و مختصه دماسنجی نیز فشار است. شکل (؟؟).

برای چنین دماسنجی نقطه مرجعی انتخاب می کنیم که نقطه سه گانه آب است. به دلایل تاریخی دمایی که به این وضعیت نسبت می دهیم

برابر است با

$$\Theta_0 = 273.16 K. \quad (5)$$

در این جا  $K$  نمادی است که برای درجه بندی این نوع دماسنج به کار برده ایم و آن را کلونین می نامیم. در نتیجه دمای متناظر با هر فشار دیگری از رابطه زیر تعیین می شود.

$$\Theta = 273.16 \frac{P}{P_{TP}}. \quad (6)$$

به عبارت دیگر این دماسنج را در تماس با آبی که در نقطه سه گانه اش قرار دارد قرار می دهیم و فشار گاز درون آن را اندازه می گیریم. فرض کنید که نوع و حجم گاز درون ظرف چنان باشد که این فشار برابر با یک اتمسفر باشد. در این صورت اگر دماسنج در محیطی قرار گرفت که فشار دو اتمسفر را نشان داد، می گوئیم دمای آن محیط برابر با  $273.16 \times 2 = 546.32 K$ .

اگر این استاندارد به کار برده شود، همه دماسنج ها مستقل از نوع گازی که به کار برده شده به نقطه سه گانه آب دمای  $273.16$  درجه را نسبت خواهند داد. ولی دماسنج هایی که با گازهای مختلف کار می کنند به یک محیط یکسان ممکن است دماهای مختلفی نسبت دهند و البته این هیچ اشکالی ندارد. فعلا یک قدم در راه استاندارد سازی برداشته ایم و آن اینکه مطابق با قرارداد بالا تقاضا کرده ایم که همه دماسنج ها به نقطه سه گانه آب یک عدد معین یعنی عدد  $273.16$  را نسبت دهند. می توانیم در همه دماسنج های گازی از یک نوع گاز مثلا گاز آرگون استفاده کنیم. در این صورت دمایی که همه دماسنج های گازی نشان می دهند در همه شرایط با هم یکی خواهند بود. البته این وضع فقط تا وقتی برقرار است که همه دماسنج ها از همان گاز آرگون استفاده کنند. اگر تحت شرایطی مجبور شویم از یک نوع گاز دیگر استفاده کنیم می بایست درجه بندی این دماسنج جدید را از نو تعیین کنیم و آن را با دماسنج ارگونی از ابتدا کالیبره کنیم. در این جا یک مشاهده مهم به کمک ما می آید و آن اینکه آزمایش های بسیار نشان می دهند که اگر فشار گاز دماسنجی را به صفر میل دهیم (یعنی گاز درون دماسنج را فوق العاده رقیق بگیریم) در این صورت همه دماسنج هایی که با گازهای مختلف کار می کنند خود بخود باهم مطابقت دارند مستقل از اینکه از چه نوع گازی استفاده می کنند. این موضوع به خوبی در شکل (۳.۲) نشان داده شده است. به این ترتیب دماسنج گاز ایده آل را به شکل زیر تعریف می کنیم و آن را با  $T$  نشان می دهیم:

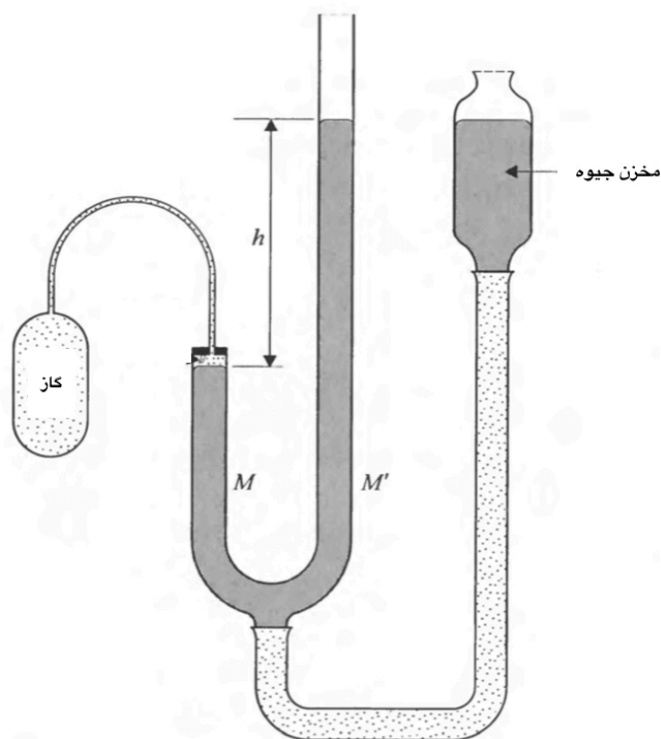
$$T = 273.16 \lim_{P \rightarrow 0} \frac{P}{P_{TP}}. \quad (7)$$

## ۴.۲ متغیرهای فزونور و نافزونور

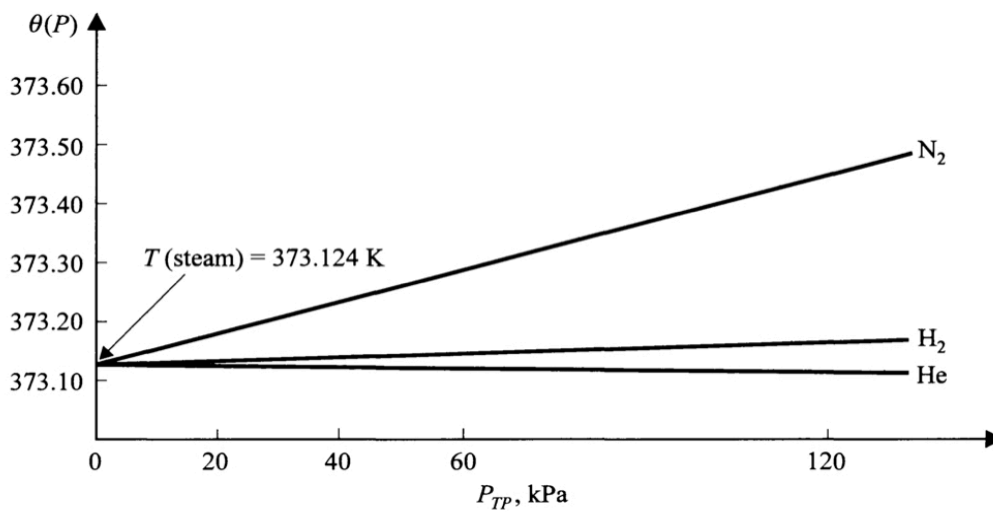
هرگاه دو نمونه یکسان از یک سیستم را کنار هم قرار دهیم و به آن دو مثل یک سیستم بزرگ نگاه کنیم درمی یابیم که بعضی از مختصات ترمودینامیکی دو برابر شده اند و بعضی دیگر ثابت مانده اند. به مختصه های نوع اول مختصه های فزونور<sup>۷</sup> و به مختصه های نوع دوم مختصه های نافزونور<sup>۸</sup> می گوئیم. به عنوان مثال برای یک سیستم هیدوردینامیک، حجم و تعداد ذرات مختصه های فزونور هستند و فشار و دما مختصه های نافزونور. هم چنین در فصل های بعد با مختصات دیگری نیز آشنا خواهیم شد، مثل انرژی درونی که طبیعتاً فزونور است.

---

Extensive<sup>۷</sup>  
Intensive<sup>۸</sup>



شکل ۶: شکل ساده یک دماسنج گازی. حباب گاز درون محیطی که قرار است دمای آن اندازه گیری شود قرار داده می شود. مخزن جیوه به آرامی بالا و پایین برده می شود تا اینکه سطح جیوه در لوله سمت چپ کاملاً به نقطه انتهایی بالا بچسبد. در این صورت فشار گاز برابر است با فشار اتمسفر بعلاوه فشار جیوه در ستون سمت راست که ارتفاع آن برابر است با  $h$ . از آنجا که فشار یک اتمسفر برابر با ۷۶۰ میلی متر جیوه، فشار گاز درون ظرف برابر است با  $(760 + h)$  میلی متر جیوه یا  $1 + \frac{h}{760}$  اتمسفر. ارتفاع  $h$  نیز بر حسب میلی متر باید اندازه گیری شود. (شکل از کتاب زیمانسکی گرفته شده است. Heat and Thermodynamics, Mark Zemansky, Richard Dittman).



شکل ۷: دماسنج های گازی ای که با گازهای مختلف کار می کنند، برای یک حالت (در اینجا نقطه جوش آب) دماهای مختلف نشان می دهند. اما وقتی که گاز درون دماسنج را رقیق می کنیم و فشار آن را به سمت صفر میل می دهیم همه این دما سنج ها مقدار عددی یکسانی یعنی  $373.124K$  را نشان می دهند. (شکل از کتاب زیمانسکی گرفته شده است. Heat and Thermodynamics, Mark Zemansky, Richard Dittman).