فصل نهم

حرارت

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود :
۱ــ دما (درجه حرارت) را تعریف کند.
۲ــ تبدیلات مربوط به واحدهای درجه حرارت را انجام دهد.
۳ــ مقدار گرما (حرارت) را تعریف کند.
۴ــ گرمای ویژه، گرمای نهان‌گداز، گرمای نهان تبخیر را تعریف کند.
۵ــ رابطه مقدار گرما را بنویسد.
۶ــ مقدار گرمای لازم برای ذوب فلزات و احتراق سوخت‌ها را محاسبه کند.
۷ــ راندمان حرارتی کوره را محاسبه کند.

۹ــ حرارت

۱ــ۹ــ ماهیت حرارت

حرارت یا گرما شکل خاصّی از انرژی است (انرژی به توانایی یا استعداد انجام کار می‌گویند). در حقیقت این انرژی به لرزش و جنبش اتم‌ها یا مولکول‌های تشکیل‌دهنده جسم مربوط است. در یک جسم، بر هر اتم یا ذره، از طرف مجموعه اتم‌ها و ذرات دیگر، نیروهای جاذبه و دافعه زیادی وارد می‌شود که ارتباط و استقرار آن‌ها، شکل و مجموعه اتمی جسم را مشخص و تعیین می‌کند. اگر براثر نیروی خارجی (اعمال حرارت، فشار، اصطکاک، ضربه و ...) دامنه نوسان‌ها و ارتعاشات درونی بین اتمی، افزایش یابد، نیروهای جاذبه و دافعه کاهش یافته و جسم ذوب می‌شود (اتم‌ها یا مجموعه‌ای از آن‌ها روی هم می‌لغزند). چنانچه تأثیر عوامل خارجی مذکور بیشتر شود، انرژی جنبشی و ارتعاشی ذرات افزایش یافته و جسم به حالت گاز درمی‌آید. بنابراین، «حرارت یا گرما براثر حرکت و جنبش نامنظم مولکول‌های جسم به‌وجود می‌آید».

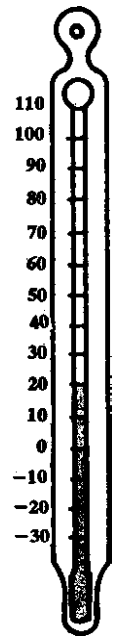
۲ــ۹ــ درجه حرارت

وقتی تحرّک و شدت ارتعاش اتم‌ها یا مولکول‌های یک جسم زیاد شود، گفته می‌شود که جسم گرمتر شده است. این حرکت گرمایی، در حقیقت مشخص کنندهٔ کمیّتی است که به آن درجه حرارت یا دما[1] می‌گویند. دمای یک جسم مربوط است به انرژی متوسط حرکت گرمایی مولکول‌های آن.

چنانچه دو جسم را که با درجه حرارت‌های مختلف گرم شده‌اند به‌هم تماس دهیم، نوعی انتقال انرژی یا مبادله گرما انجام می‌گیرد و آنکه گرمتر است سرد شده و دمای جسم دیگر را بالا می‌برد. چون اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات مولکول‌ها به سهولت و در شرایط غیرآزمایشگاهی ممکن نیست از این رو اندازه‌گیری حرارت درونی یا بیرونی یک جسم به‌وسیله مقایسه آن با حرارت یک جسم مشخص و در شرایط معینی به‌عمل می‌آید که در مجموع می‌توان گفت که نسبت گرمایی آن دو جسم تعیین می‌شود. به عبارت دیگر تعیین درجه حرارت بر پایه مقایسه و تأثیرپذیری و یا بی‌اثر بودن ارتعاش مولکولی یک جسم بر جسم دیگر بیان می‌شود. لذا بر این اساس، گرمی و سردی، یک امر نسبی است که با درجه حرارت مشخص می‌شود.

۳ــ۹ــ اساس و نحوهٔ اندازه‌گیری درجه حرارت

درجه حرارت عاملی است که احساس سردی یا گرمی را در انسان ایجاد می‌کند. ولی احساس انسان به‌طور دقیق قادر به تشخیص درجه حرارت اجسام نیست و به‌علاوه حدود درجه حرارت قابل اندازه‌گیری از این طریق، محدود است. از این رو باید متوسّل به تأثیر حرارت بر حساس‌ترین خاصیت اجسام شد. مهمترین این تأثیرات عبارتند از : انبساط حجمی مایعات (مخصوصاً جیوه و الکل)، انبساط طولی فلزات و آلیاژها، تغییر حالت اجسام (نقطه زینتر[2] و خمیری شدن، نقطه ذوب، نقطه جوش و ...)، ازدیاد فشار گازهای نزدیک به گاز ایده‌آل نظیر : هلیُم، ئیدروژن و ازت، تغییرات مقاومت و جریان الکتریکی در فلزات، تغییر ولتاژ و نیروی محرّکه الکتریکی، تغییرات رنگ و تشعشع اجسام گداخته و مُلتهب.



شکل ۱ــ۹ــ اندازه‌گیری درجه حرارت در یک دماسنج جیوه‌ای

۱ــ Temperature

۲ــ Sinter

براساس یکی از تأثیرات و شرایط مذکور، دماسنج یا ترمومتر[1]، طراحی و ساخته می‌شود که در موارد مختلف اندازه‌گیری، قابل استفاده است. درجه‌بندی دماسنج‌ها یکسان نیست ولی آنچه مشخص است تعیین دو نقطه اصلی ثابت مانند ذوب یخ و نقطه جوش آب (هم‌سطح دریای آزاد که فشار هوا ۱ آتمسفر است.) به‌عنوان مقیاس و مبنای اصلی است. شکل ۱ــ۹ تأثیر حرارت بر انبساط جیوه را در طول لوله باریک یک دماسنج که مقطع آن در تمام قسمت‌ها یکسان است، نشان داده است.

۴ــ۹ــ واحدهای درجه حرارت

درجه حرارت با واحدها و مقیاس‌های دمایی مختلف و براساس درجه‌بندی دماسنج‌ها بیان می‌شود که متداولترین و مشهورترین آن‌ها عبارتند از :

۱ــ۴ــ۹ــ درجه‌بندی سلسیوس[2]: این درجه‌بندی صد قسمتی (سانتیگراد) است. در این مقیاس نقطه ذوب یخ برابر صفر، و نقطه جوش آب در شرایط یک آتمسفر فشار، برابر ۱۰۰ تعیین شده است. این درجه‌بندی و مقیاس، در اکثر کشورهای جهان ازجمله ایران مورد استفاده است و با علامت $^{\circ}C$ مشخص می‌شود.

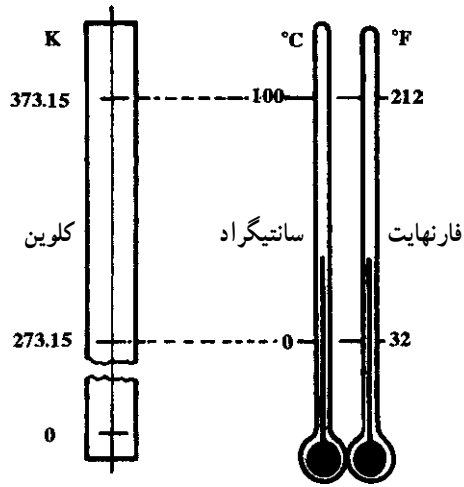
۲ــ۴ــ۹ــ درجه‌بندی فارنهایت[3]: در این مقیاس، دمای انجماد آب (که برابر است با نقطه ذوب یخ)، $0\ ^{\circ}C$ برابر ۳۲ درجه فارنهایت و نقطه جوش آب $100\ ^{\circ}C$ و معادل ۲۱۲ درجه فارنهایت درنظر گرفته شده است. در این‌صورت فاصله بین نقطه ذوب یخ و نقطه جوش آب ۱۸۰ قسمتی خواهد بود. زیرا :

درجه فارنهایت $۲۱۲ - ۳۲ = ۱۸۰$

این واحد در کشورهای انگلیسی زبان متداول است و با علامت $^{\circ}F$ مشخص می‌شود.

۳ــ۴ــ۹ــ درجه‌بندی کلوین[4]: واحد اندازه‌گیری درجه حرارت در سیستم SI، درجه کلوین است که آن را با علامت K مشخص می‌کنند. صفر این درجه‌بندی معادل ۲۷۳/۱۵- درجه سانتیگراد و فاصله درجات آن نیز به همان اندازه سانتیگراد است. این درجه حرارت پایین‌ترین حدّ دمای ممکن است (صفر مطلق). در این دما که برای تمام اجسام یکسان است، انرژی داخلی مادّه به حدّاقل ممکن می‌رسد. شکل ۲ــ۹ مقایسه درجه‌بندی‌های کلوین، سانتیگراد و فارنهایت را نشان می‌دهد.

۱ــ Thermometer
۲ــ Anders Celecius
۳ــ Gabriel Fahrenheit
۴ــ William Thomson Kelvin



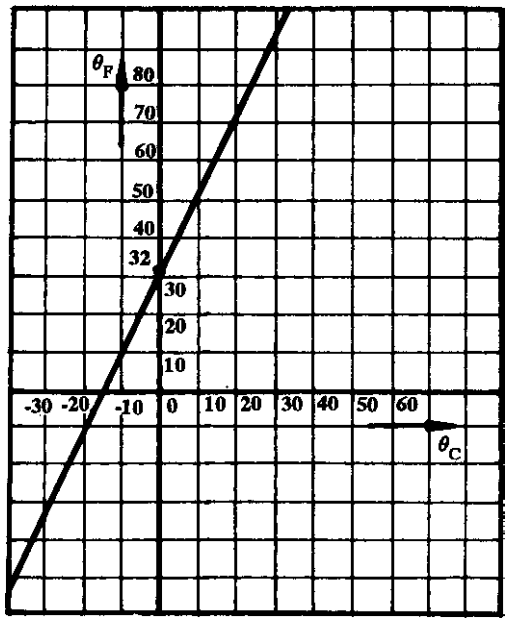
شکل ۲ــ۹ــ مقایسه درجه‌بندی‌های کلوین، سانتیگراد و فارنهایت

۵ ــ۹ــ رابطه تبدیل واحدهای درجه حرارت

به کمک این دو رابطه، می‌توان تمام واحدهای درجه حرارت را به یکدیگر تبدیل کرد :

$$\frac{\theta_F - ۳۲}{۱۸۰} = \frac{\theta_C}{۱۰۰} \qquad T_K = \theta_C + ۲۷۳/۱۵$$

که در آن‌ها θ_C درجه حرارت سانتیگراد، θ_F درجه حرارت فارنهایت (θ تِتا حرف یونانی است) و T_K درجه حرارت کلوین است. شکل ۳ــ۹ نمودار تغییرات تابع θ_F را نسبت به θ_C نشان می‌دهد. این نمودار، خطی است مستقیم که به کمک آن می‌توان درجه حرارت جسم را از سانتیگراد به فارنهایت (و بالعکس) تبدیل کرد.



شکل ۳ــ۹ــ نمودار تغییرات درجه حرارت فارنهایت نسبت به درجه حرارت سانتیگراد

مثال ۱: نقطه ذوب مس $^{\circ}C$ ۱۰۸۳ است. نقطه ذوب آن را برحسب درجه فارنهایت و درجه کلوین تعیین کنید.

حلّ:

$$\frac{\theta_F - ۳۲}{۱۸۰} = \frac{\theta_C}{۱۰۰}$$

$$\frac{\theta_F - ۳۲}{۱۸۰} = \frac{۱۰۸۳}{۱۰۰} \Rightarrow \theta_F - ۳۲ = \frac{۱۸۰ \times ۱۰۸۳}{۱۰۰} = ۱۹۴۹/۴ \Rightarrow$$

$$\theta_F = ۱۹۴۹/۴ + ۳۲ = ۱۹۸۱/۴^{\circ}F$$

$$T_K = \theta_C + ۲۷۳/۱۵$$

$$T_K = ۱۰۸۳ + ۲۷۳/۱۵ = ۱۳۵۶/۱۵K$$

مثال ۲: نقطه ذوب سرب ۶۰۰/۵ درجه کلوین و نقطه ذوب قلع ۴۴۹/۶ درجه فارنهایت است. کدام‌یک از آن‌ها دیر ذوب‌تر هستند؟ (نقطه ذوب کدام‌یک بیشتر است؟)

حلّ:

$$T_K = \theta_C + ۲۷۳/۱۵$$

نقطه ذوب سرب

$$۶۰۰/۵ = \theta_C + ۲۷۳/۱۵ \Rightarrow \theta_C = ۶۰۰/۵ - ۲۷۳/۱۵ = ۳۲۷/۳۵^{\circ}C$$

$$\frac{\theta_F - ۳۲}{۱۸۰} = \frac{\theta_C}{۱۰۰}$$

نقطه ذوب قلع $\frac{۴۴۹/۶ - ۳۲}{۱۸۰} = \frac{\theta_C}{۱۰۰} \Rightarrow \theta_C = \frac{۱۰۰(۴۴۹/۶ - ۳۲)}{۱۸۰} = ۲۳۲^{\circ}C$

چنانچه ملاحظه می‌شود، نقطه ذوب سرب بیشتر از نقطه ذوب قلع است که اختلاف آن‌ها برابر است با:

$$۳۲۷/۳۵ - ۲۳۲ = ۹۵/۳۵^{\circ}C$$

۶ــ۹ــ تعریف مقدار حرارت

تجربیات و شواهد متعددی وجود دارد که ثابت می‌کند هرگاه جسمی (جامد، مایع یا گاز) گرم شود، سرعت و شدت حرکت مولکول‌های آن زیاد شده و باعث تغییری در جسم می‌شود. ممکن است

این تغییر، با افزایش دما، یا تغییر حالت‌های فیزیکی جسم ظاهر شود. مثلاً وقتی به یک قطعه فلز، مقداری حرارت داده می‌شود، درجه حرارتش بالا می‌رود و چنانچه همین قطعه در نقطه ذوب فلز گرم شود، دمایش ثابت مانده و در عوض تغییر حالت می‌دهد به‌طوری که از وضعیت جامد خارج شده و به مذاب تبدیل می‌شود (تغییر فاز). ولی به‌هرحال قطعه فلزی مقداری حرارت گرفته و انرژی داخلی یا درونی آن بالا رفته است. به‌عبارت دیگر جنبش اتم‌های فلز (انرژی مکانیکی) بیشتر شده است. بنابراین هرچه سرعت اتم‌ها یا مولکول‌ها و تعداد آن‌ها بیشتر باشد، این انرژی نیز بیشتر خواهد بود (به همین علّت مقدار حرارت، با جرم جسم و ازدیاد دمای آن متناسب است). طبق تعریف می‌توان گفت که : «مقدار حرارت اندازه‌ای است از انرژی مکانیکی که می‌تواند باعث تغییرات دمایی یا حالت‌های فیزیکی مختلف در اجسام شده و انرژی داخلی آن‌ها را تغییر دهد».

مقدار حرارت نیز مانند انرژی مکانیکی دارای الگوی هندسی نبوده و برخلاف کمیت‌هایی نظیر طول و جرم، نمی‌توان از آن نمونه‌ای به‌عنوان واحد گرما ساخت و نگهداری کرد. مقدار حرارت را با حرف Q (یا H) نمایش می‌دهند.

۷ــ۹ــ واحدهای مقدار حرارت

چون حرارت نوعی انرژی است، لذا واحد آن نیز مانند واحد انرژی و کار در سیستم SI، ژول[۱] خواهد بود که عبارتست از کار نیروی یک نیوتن به اندازه یک متر. ولی قبل از آنکه مسلّم شود حرارت، انرژی مکانیکی مولکول‌های جسم است، ۳ واحد برای اندازه‌گیری آن متداول بوده که امروزه نیز هنوز معمول و رایج است. این واحدها عبارتند از :

کالری (cal)، کیلوکالری (kcal) و بی‌تی‌یو (B.T.U[۲])

۱ــ۷ــ۹ــ تعریف مقدار کالری: یک کالری مقدار حرارتی است که می‌تواند دمای یک گرم آب خالص را از $14/5^{\circ}C$ به $15/5^{\circ}C$ افزایش دهد. (مقدار گرمای لازم برای گرم‌کردن یک گرم آب به اندازه یک درجه سانتیگراد فقط در فاصله دمایی مذکور، برابر یک کالری است و هرچه این اختلاف در درجه حرارت‌های بالاتر انتخاب شود، کالری لازم کمی بیشتر خواهد بود).

۱ــ Joule

۲ــ علامت اختصاری British Thermal Unit (واحد حرارت بریتانیا)

۲ــ۷ــ۹ــ کیلوکالری: برابر ۱۰۰۰کالری و به‌عبارت دیگر گرمای لازم برای افزایش یک درجه سانتیگراد ($14/5^{\circ}C$ تا $15/5^{\circ}C$) برای یک کیلوگرم آب خالص است.

۳ــ۷ــ۹ــ بی‌تی‌یو: مقدار حرارتی است که می‌تواند درجه حرارت یک پوند (۴۵۳/۵۹ گرم) آب خالص را از $63^{\circ}F$ به $64^{\circ}F$ برساند. هر بی‌تی‌یو ۲۵۲ کالری است.

بنابراین :

$$1kcal = 1000cal = \frac{1000}{252} B.T.U. = 3/97 B.T.U$$

به‌طور تقریبی می‌توان نوشت : $1B.T.U \approx \frac{1}{4} kcal$

در ایران واحد مقدار حرارت کالری (و همچنین ژول) تعیین شده است و واحد B.T.U در بعضی محاسبات صنعتی نظیر مسایل حرارتی مربوط به شوفاژ و تأسیسات حرارت مرکزی و پالایشگاه‌ها به‌کار می‌رود.

۸ ــ۹ــ رابطه کالری و واحد مکانیکی کار و انرژی

همانطور که قبلاً گفته شد، گرما عبارتست از انرژی مکانیکی و جنبشی مولکول‌های جسم. ژول دانشمند انگلیسی با آزمایش‌های متعدد نشان داد که اگر انرژی یک کالری (مجموع انرژی‌های جنبشی مولکول‌های یک گرم آب در فاصله دمایی یک درجه سانتیگراد) توسط دستگاهی به کار تبدیل شود، این کار قادر خواهد بود یک وزنه ۴/۱۸۶۸ نیوتنی را به اندازه یک متر به‌طور قائم بالا ببرد و چون کار یک نیوتن به اندازه یک متر، ژول نامیده می‌شود، لذا می‌توان نوشت :

$$1 \text{ کالری} = 4/1868 \text{ ژول} \Rightarrow 1cal \approx 4/19J$$

بنابراین کار معادل Q کالری چنین خواهد بود :

$$\boxed{J = 4/1868 cal}$$

به کمک این رابطه می‌توان واحدهای مقدار گرما را برحسب ژول (واحد مقدار حرارت در سیستم SI) تبدیل کرد.

$$1 kcal = 1000cal = 4/1868 \times 1000J = 4186/8J \approx 4/19 kJ$$

$$1B.T.U. \approx \frac{1}{4} kcal \Rightarrow 1B.T.U \approx \frac{4/19kJ}{4} \approx 1/05 kJ$$

۹ــ۹ــ تعریف ظرفیت حرارتی

مقدار گرمای لازم برای افزایش یک درجه سانتیگراد از هر جسمی را ظرفیت حرارتی آن جسم نامیده و آن را با A نمایش می‌دهند. با این تعریف معلوم می‌شود که مقدار حرارت لازم برای آنکه درجه حرارت دو جسم با جرم‌های مساوی (ولی از دو جنس متفاوت) به یک اندازه افزوده شود، یکسان نیست. مثلاً برای آنکه ۳۰ کیلوگرم آلومینیم از $۲۰^\circ C$ به $۲۱^\circ C$ برسد، حدود $۶/۵ kcal$ حرارت لازم دارد. درحالی که افزایش همین درجه حرارت برای ۳۰ کیلوگرم آهن به $۳/۴ kcal$ حرارت نیازمند است. اگر Q مقدار گرمایی باشد که بتواند درجه حرارت جسم را به اندازه $\Delta\theta$ بالا ببرد، در این‌صورت می‌توان نوشت :

$$\boxed{A = \frac{Q}{\Delta\theta}} \qquad \boxed{\Delta\theta = \theta_۲ - \theta_۱}$$

مثال: گرمای لازم برای بالا بردن درجه حرارت یک قطعه مسی از $۲۵^\circ C$ تا $۴۰۰^\circ C$ ، $۱۳/۹ kcal$ است. ظرفیت حرارتی آن را برحسب کالری بر درجه سانتیگراد و همچنین ژول بر درجه کلوین تعیین کنید.

حلّ:

$$Q = ۱۳/۹ kcal = ۱۳۹۰۰ cal$$

$$A = \frac{Q}{\Delta\theta} \Rightarrow A = \frac{۱۳۹۰۰}{۴۰۰ - ۲۵} = ۳۷/۰۶۷ \frac{cal}{^\circ C}$$

چون اختلاف درجه حرارت کلوین و سانتیگراد برابر است $(\Delta T = \Delta\theta)$ لذا :

$$A = \frac{۱۳۹۰۰ \times ۴/۱۹}{۴۰۰ - ۲۵} \frac{J}{K} = ۱۵۵/۳ \frac{J}{K}$$

۱۰ــ۹ــ تعریف گرمای ویژه

برای تعیین ظرفیت حرارتی اجسام، از ظرفیت حرارتی واحد جرم تحت‌عنوان «گرمای ویژه» استفاده می‌کنند و آن عبارت است از : مقدار حرارت لازم برای افزایش یک درجه سانتیگراد برای هر گرم (یا کیلوگرم) از جسم. گرمای ویژه اجسام در درجه حرارت‌های مختلف، برابر نیست. به‌طوری که اندازه آن را تحت فشار ثابت و یا حجم ثابت در درجه حرارت‌های مختلف، و حالت‌های فیزیکی متفاوت تعیین کرده و در جداولی درج کرده‌اند. گرمای ویژه را با حرف c نمایش می‌دهند. چون گرمای ویژه اجسام در درجه حرارت‌های مختلف متفاوت است، لذا در محاسبات و حلّ مسایل، متوسط (یا میانگین) آن را منظور می‌کنند. گرمای ویژه متوسط به صورت $\bar{c}$ مشخص می‌شود.

۱ــ۱۰ــ۹ــ واحد گرمای ویژه: چون گرمای ویژه، مقدار حرارت لازم برای افزایش یک درجه سانتیگراد از جسمی به جرم واحد را مشخص می‌کند، لذا مقدار حرارت موردنیاز برای افزایش درجه حرارت جسمی به اندازه $\Delta\theta$ و به‌جرم m، برابر است با : $Q = mc\Delta\theta$ و با تعیین مقدار c خواهیم داشت : $c = \frac{Q}{m\Delta\theta}$ که به کمک آن می‌توان واحدهای گرمای ویژه را مشخص کرد که عبارتند از :

$$\frac{cal}{g.^{\circ}C} = \frac{kcal}{kg.^{\circ}C} \quad و \quad \frac{J}{kg.K} = \frac{J}{kg.^{\circ}C} \Rightarrow ۱\frac{cal}{g.^{\circ}C} = ۴۱۸۶/۸\frac{J}{kg.K}$$

یادآوری می‌شود که فاصله درجات حرارتی سانتیگراد و کلوین یکسان است. به همین دلیل در محاسبات، برای مشخص‌کردن مقدار گرمای ویژه به‌کار بُردن واحد $\frac{J}{kg.^{\circ}C}$ به‌جای $\frac{J}{kg.K}$ (واحد گرمای ویژه در سیستم SI) معمول بوده و صحیح است.

در سیستم انگلیسی، واحد گرمای ویژه برحسب بی‌تی‌یو بر پوند درجه فارنهایت $(\frac{B.T.U}{Ib.^{\circ}C})$ بیان می‌شود.

جدول ۱ــ۹ گرمای ویژه برخی ازفلزات و آلیاژها را نشان می‌دهد (همچنین گرمای ویژه آب که در $۲۵^{\circ}C$ برابر واحد فرض، شده است).

جدول ۱ــ۹ــ گرمای ویژه پاره‌ای از مواد

فلز	گرمای ویژه $cal/g.^{\circ}C$	گرمای ویژه $kJ/kg.K$	آلیاژ[۱]	گرمای ویژه $cal/g.^{\circ}C$	گرمای ویژه $kJ/kg.K$
آلومینیم	۰/۲۱۷	۰/۹۰۸	چدن	۰/۱۱۶	۰/۴۸۵
آهن	۰/۱۱۳	۰/۴۷۳	فولاد	۰/۱۱۵	۰/۴۸۱
مس	۰/۰۹۳	۰/۳۹۰	برنج	۰/۰۹۴	۰/۳۹۳
منیزیم	۰/۲۳۴	۰/۹۸۰	برنز	۰/۰۸۲	۰/۳۴۳
سرب	۰/۰۳۱	۰/۱۳۰	سرب خشک	۰/۰۳۵	۰/۱۴۶
روی	۰/۰۹۱	۰/۳۸۱	دور آلومین	۰/۲۱۱	۰/۸۸۳
قلع	۰/۰۵۴	۰/۲۲۶	آب	۱	۴/۱۸۶

۱ــ درمورد آلیاژها ترکیب آن‌ها حائز اهمیت است و در هر مورد با نسبت‌های ترکیبی، گرمای ویژه تغییر می‌کند.

۱۱ــ۹ــ تعریف نقطه ذوب

درجه حرارتی است که در فشار یک آتمسفر، جسم تغییر شکل ساختمانی از حالت جامد به مایع می‌دهد. نقطه انجماد نیز با نقطه ذوب برابر بوده و آن درجه حرارتی است که می‌تواند در همین فشار تغییر شکل ساختمانی از حالت مایع به جامد ایجاد کند و در طول مدت ذوب یا انجماد، همواره درجه حرارت ثابت است.

۱۲ــ۹ــ تعریف گرمای نهان‌گداز

مقدار حرارتی است که واحد جرم جسم در نقطه ذوب و در فشار یک آتمسفر می‌گیرد، تا به‌حالت مایع درآید. گرمای نهان‌گداز را با حرف λ (لاندا) نمایش می‌دهند.

۱ــ۱۲ــ۹ــ واحد گرمای نهان‌گداز: اگر جرم جسمی m و گرمای نهان‌گداز آن λ باشد، بدیهی است که گرمای لازم برای ذوب آن (در نقطه ذوب)، $Q_\lambda = m.\lambda$ خواهد بود. از این رابطه می‌توان λ را به‌دست آورده و واحدهای آن را بیان کرد :

$$\boxed{\lambda = \frac{Q_\lambda}{m}} \Rightarrow \lambda \text{ واحدهای : } \frac{cal}{g} = \frac{kcal}{kg} \text{ و } \frac{J}{kg} \text{ و } \frac{kJ}{kg} \text{ و } \frac{B.T.U}{Ib}$$

برای تبدیل واحد $\frac{cal}{g}$ به واحد سیستم SI($\frac{J}{kg}$) می‌توان از تساوی زیر استفاده کرد.

$$۱\frac{cal}{g} = ۴/۱۸۶۸\times۱۰^{۳}\frac{J}{kg} \approx ۴/۱۹\ \frac{kJ}{kg}$$

در جدول **۲ــ۹** گرمای نهان‌گداز تعدادی جسم جامد (در نقطه ذوب آن‌ها) درج شده است.

جدول ۲ــ۹ــ گرمای نهان‌گداز و نقطه ذوب پاره‌ای از مواد

جسم	نقطه ذوب $T_m[K]$	گرمای نهان‌گداز $\lambda[J/kg]$	جسم	نقطه ذوب $T_m[K]$	گرمای نهان‌گداز $\lambda[J/kg]$
آلومینیم	۹۳۲	$۳/۸\times۱۰^{۵}$	نقره	۱۲۳۳	$۸/۸\times۱۰^{۴}$
مس	۱۳۵۶	$۱/۸\times۱۰^{۵}$	فولاد	۱۶۷۳	$۲/۱\times۱۰^{۵}$
طلا	۱۳۳۷	$۶/۶\times۱۰^{۴}$	گوگرد	۳۸۵/۸	$۵/۵\times۱۰^{۴}$
آهن	۱۸۰۳	$۲/۷\times۱۰^{۵}$	قلع	۵۰۵	$۵/۸\times۱۰^{۴}$

چدن سفید	۱۴۷۳	$۱/۳\times۱۰^{۵}$	تنگستن	۳۶۸۳	$۲/۶\times۱۰^{۴}$
چدن خاکستری	۱۴۲۳	$۹/۷\times۱۰^{۴}$	یخ	۲۷۳	$۳/۳۵\times۱۰^{۵}$
سرب	۶۰۰	$۲/۵\times۱۰^{۴}$	روی	۶۹۲	$۱/۱۸\times۱۰^{۵}$
جیوه	۲۳۴	$۱/۲۵\times۱۰^{۴}$			

۱۳ــ۹ــ تعریف گرمای نهان تبخیر

مقدار حرارتی است که، واحد جرم جسم مذاب در نقطه جوش و در فشار یک آتمسفر می‌گیرد تا به حالت بخار درآید. این کمیت را با حرف L نشان می‌دهند.

لازم به توضیح است که نقطه ذوب، نقطه تبخیر، گرمای نهان‌گداز و گرمای نهان تبخیر با فشار محیط تبخیر می‌کند و این تغییرات درمورد نقطه تبخیر و گرمای نهان تبخیر بسیار زیاد است.

در اکثر موارد گرمای نهان تبخیر اجسام، فلزات و آلیاژها حدود ۴ تا ۵ برابر گرمای نهان ذوب آن‌ها است. به همین علت انرژی جنبشی گازها به مراتب بیشتر از مایعات و درنتیجه بیشتر از اجسام جامد است. از طرف دیگر شباهت ساختمانی مایعات به جامدات به مراتب بیشتر از شباهت ساختمانی مایعات به گازها است و به‌همین دلیل است که در مواردی ساختمان مایعات را تقریباً همان ساختمان جامدات می‌دانند.

۱ــ۱۳ــ۹ــ واحد گرمای نهان تبخیر: اگر جرم جسم مذابی در نقطه جوش، m و گرمای نهان تبخیر آن L باشد، در این‌صورت، گرمای لازم برای تبدیل مذاب به‌حالت بخار برابر است با : $Q_L = m.L$ که با تعیین L می‌توان نوشت :

$$\boxed{L = \frac{Q_L}{m}}$$

چنانچه ملاحظه می‌شود این رابطه نظیر رابطه گرمای نهان‌گداز است. به همین دلیل واحدهای گرمای نهان‌تبخیر همان واحدهای نهان‌گداز خواهد بود.

۱۴ــ۹ــ رابطه مقدار گرما

در ریخته‌گری فقط ذوب کردن جسم کافی نیست و برای ایجاد سیالیّت و روانی و همچنین جلوگیری از انجماد بی‌موقع فلز مذاب در راهگاه‌ها و محفظه قالب، باید درجه حرارت مذاب را نیز

معمولاً تا $۸۰^{\circ}C$ و در بعضی موارد تا $۲۰۰^{\circ}C$ بالاتر از نقطه ذوب رسانید. بنابراین، حرارت لازم در ریخته‌گری، علاوه بر حرارت موردنیاز تا ذوب جسم به حرارت لازم برای افزایش تا فوق ذوب نیز نیاز دارد. این حرارت به جرم مذاب و گرمای ویژه آن در حالت مایع مستقیماً مربوط می‌شود. به این ترتیب مقدار حرارت لازم ریختن، برای یک قطعه به جرم m مجموع سه مقدار حرارت خواهد بود :

$$Q = Q_۱ + Q_۲ + Q_۳$$

که در آن، مقادیر $Q_۱$ ، $Q_۲$ ، $Q_۳$ به ترتیب عبارتند از : گرمای لازم برای گرم شدن تا نقطه ذوب، گرمای نهان‌گداز و گرمای لازم برای گرم شدن تا نقطه فوق ذوب. مقدار هرکدام از حرارت‌های مذکور از رابطه‌های جداگانه‌ای محاسبه شده که با جمع آن‌ها می‌توان رابطه کلّی و مقدار گرمای لازم برای ذوب فلز یا آلیاژ را تعیین کرد.

$$Q = m\bar{c}(\theta_m - \theta_i) + m\lambda + m\overline{c'}(\theta_p - \theta_m)$$

که در آن : θ_m نقطه ذوب، θ_i درجه حرارت محیط (معمولاً $۲۵^{\circ}C$ انتخاب می‌شود) و θ_p درجه حرارت فوق ذوب (یا درجه حرارت مناسب ریختن) و $\bar{c}$ و $\overline{c'}$ به ترتیب گرمای ویژه متوسط فلز یا آلیاژ جامد در فاصله‌های دمایی مذکور هستند.

توضیح: درصورتی که میل ترکیبی جسمی با اکسیژن زیاد باشد، تبخیر و گاهی ذوب آن جسم در مجاورت هوا به سهولت ممکن نیست. مثلاً تبخیر و حتّی ذوب منیزیم خالص در محیط کارگاه و در تماس با هوا عملی نیست و به‌دلیل شدّت اکسیداسیون، آن را در غیاب هوا و یا تحت پوشش گاز $SO_۲$ ذوب می‌کنند. ازطرف دیگر برخی از اجسام (مواد شیمیایی مرکب) اصولاً نمی‌توانند به‌حالت بخار در شرایط فشار محیط وجود داشته باشند. زیرا براثر افزایش درجه حرارت قبل از رسیدن به نقطه تبخیر، تجزیه شده و به عناصر متشکّله خود تبدیل می‌شوند. مانند، آهک و اکسید جیوه که قبل از تبخیر، به کلسیم و اکسیژن و یا جیوه و اکسیژن تبدیل می‌شوند. موضوع اکسیده شدن فلزات و عناصر و همچنین تصعید (تبخیر شدن مستقیم جسم جامد براثر حرارت بدون آنکه ذوب شود مانند گرافیت) یا تبخیر آن‌ها یکی ازموضوع‌های بسیار مهم در زمینه ریخته‌گری و ذوب فلزات و آلیاژها است که همواره با شناخت کامل قوانین فیزیکی و شیمیایی حاکم بر شرایط ذوب آن‌ها، می‌توان چگونگی عملیات ذوب و ریخته‌گری آلیاژها را استنباط کرد.

مثال: برای ذوب ۷۵ کیلوگرم مس و رسانیدن درجه حرارت مذاب به $۱۳۰^{\circ}C$ فوق ذوب، چند کیلوژول و کیلوکالری حرارت مورد نیاز است؟ منحنی تغییرات درجه حرارت نسبت به گرما را

نیز رسم کنید.

درجه حرارت محیط $\theta_i = ۲۵^\circ C$، گرمای ویژه متوسط مس جامد $\bar{c} = ۴۰۰ \frac{J}{kg.K}$ (در فاصله دمایی محیط تا نقطه ذوب)، گرمای ویژه متوسط مذاب $\bar{c'} = ۴۴۰ \frac{J}{kg.K}$ (در فاصله دمایی نقطه ذوب تا نقطه فوق ذوب) گرمای نهان‌گداز مس $\lambda = ۱/۸ \times ۱۰^۵ \frac{J}{kg}$ و نقطه ذوب مس $\theta_m = ۱۰۸۳^\circ C$ است.

حلّ: به‌کمک رابطه مقدار گرما می‌توان حرارت خواسته شده را محاسبه و تعیین کرد :

$$Q = Q_۱ + Q_۲ + Q_۳$$

$$Q = m\bar{c}(\theta_m - \theta_i) + m\lambda + m\bar{c'}(\theta_p - \theta_m)$$

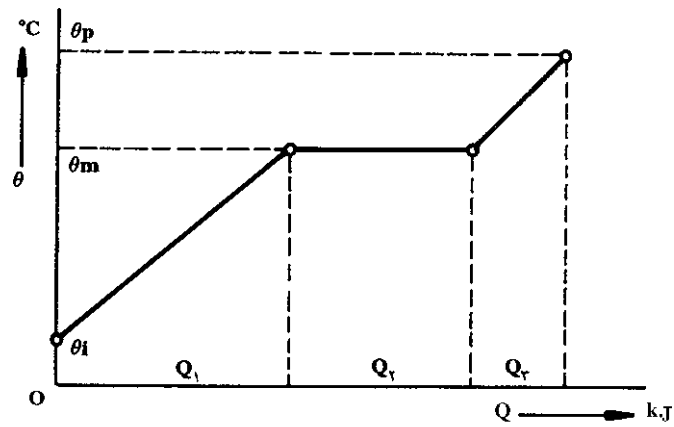
$$Q = ۷۵ \times ۴۰۰(۱۰۸۳ - ۲۵) + ۷۵ \times ۱/۸ \times ۱۰^۵ + ۷۵ \times ۴۴۰ \times ۱۳۰$$

$$Q = ۳/۱۷۴ \times ۱۰^۷ + ۱/۳۵ \times ۱۰^۷ + ۴/۲۹ \times ۱۰^۶ = ۴/۹۵۳ \times ۱۰^۷ J$$

$$Q = ۴۹۵۳۰ kJ \Rightarrow$$

$$Q = \frac{۴۹۵۳۰}{۴/۱۸۶۸} = ۱۱۸۳۰/۰۴ kcal$$

منحنی نمایش تغییرات درجه حرارت مس نسبت به گرمای داده شده مطابق شکل زیر می‌باشد.



۱۵ــ۹ــ قدرت حرارتی (ارزش گرمایی)

برای تعیین مقدار حرارتی که از احتراق سوخت‌ها آزاد می‌شود از قدرت حرارتی یا ارزش گرمایی آن‌ها استفاده می‌کنند که عبارت است از : مقدار حرارتی که واحد جرم یا واحد حجم یک

سوخت هنگام احتراق کامل ایجاد می‌کند. برای سوخت‌های جامد و مایع، ارزش گرمایی را برحسب واحد جرم (cal/g و یا kcal/kg) و برای سوخت‌های گازی برحسب واحد حجم (cal/lit و یا $kcal/m^3$) تعیین می‌کنند. در سیستم اندازه‌گیری بین‌المللی SI که واحد مقدار حرارت ژول است و هرکیلوکالری برابر ۴/۱۸۶۸ کیلوژول است، می‌توان نوشت :

$$۱\frac{kcal}{kg}=۴/۱۸۶۸\frac{kJ}{kg}\Rightarrow ۱\frac{kJ}{kg}=\frac{۱}{۴/۱۸۶۸}\frac{kcal}{kg}\approx ۰/۲۴\frac{kcal}{kg}$$

قدرت حرارتی سوخت‌ها را با روش کالریمتری تعیین می‌کنند که در محاسبات مربوط به راندمان کوره‌ها و مصرف مقدار سوخت، اهمیت زیادی دارند.

اگر M کیلوگرم سوخت هنگام احتراق کامل Q' کیلوکالری گرما آزاد کند و ارزش گرمایی آن q_m باشد در این صورت خواهیم داشت :

$$\boxed{Q'=M.q_m}$$

برای سوخت‌های گازی، رابطه ارزش حرارتی چنین است :

$$\boxed{Q'=V.q_v}$$

که در آن V حجم سوخت مصرفی برحسب مترمکعب و q_v ارزش گرمایی سوخت برحسب کیلوکالری بر مترمکعب (یا کالری بر لیتر) است. در سیستم بین‌المللی SI واحد q_v برابر است با : J/m^3 که در این‌صورت :

$$۱\frac{kJ}{m^3}\approx ۰/۲۴\frac{kcal}{m^3}$$

۱۶ــ۹ــ راندمان حرارتی کوره

راندمان حرارتی کوره عبارت است از نسبت گرمای گرفته شده از کوره (گرمای مفید) به گرمای داده شده به کوره که با درصد بیان می‌گردد.

$$R=\frac{\text{گرمای گرفته شده (مفید)}}{\text{گرمای داده شده}}\times ۱۰۰$$

$$R=\frac{Q}{M.q_m}\times ۱۰۰$$

$$R=\frac{Q}{V.q_v}\times ۱۰۰$$

مثال: برای ذوب $m=۱۰۰$ کیلوگرم آلومینیم و رساندن آن به ۵۵ درجه سانتیگراد فوق ذوب

$(\theta_p - \theta_m = ۵۵)$ چه مقدار حرارت موردنیاز است؟ چنانچه برای این مقدار آلومینیم از یک نوع سوخت با قدرت حرارتی $q_m = ۹۰۰۰ kcal/kg$ استفاده شود و راندمان حرارتی کوره $R = ۲۰$ درصد منظور شود، چه مقدار سوخت (M) لازم است؟

$\theta_m = ۶۶۰^\circ C$ نقطه ذوب آلومینیم

$\overline{C} = ۰/۲۴ kcal/kg^\circ C$ گرمای ویژه متوسط آلومینیم جامد

$\overline{C}' = ۰/۲۷ kcal/kg^\circ C$ گرمای ویژه متوسط آلومینیم مذاب

$\lambda = ۹۲ kcal/kg$ گرمای نهان گداز آلومینیم

$\theta_i = ۲۵^\circ C$ درجه حرارت محیط

حل: گرمای لازم، برای رسیدن دمای آلومینیم به نقطه ذوب $(Q_۱)$ برابر است با :

$$Q_۱ = m\overline{C}(\theta_m - \theta_i)$$

$$Q_۱ = ۱۰۰ \times ۰/۲۴(۶۶۰ - ۲۵) = ۱۵۲۴۰ kcal$$

$Q_۲ = m\lambda = ۱۰۰ \times ۹۲ = ۹۲۰۰ kcal$ گرمای نهان گداز ۱۰۰kg آلومینیم

$Q_۳ = m\overline{C}'(\theta_p - \theta_m)$ گرمای لازم برای فوق ذوب

$$Q_۳ = ۱۰۰ \times ۰/۲۷ \times ۵۵ = ۱۴۸۵ kcal$$

$$Q = Q_۱ + Q_۲ + Q_۳$$

$Q = ۱۵۲۴۰ + ۹۲۰۰ + ۱۴۸۵ = ۲۵۹۲۵ kcal$ کل گرمای لازم

این گرما باید توسط سوخت تأمین شود که با توجه به راندمان کوره می‌توان نوشت :

$$\boxed{R = \frac{Q}{M.q_m}} \Rightarrow M = \frac{Q}{R.q_m} \Rightarrow M = \frac{۲۵۹۲۵}{\frac{۲۰}{۱۰۰} \times ۹۰۰۰} = ۱۴/۴ kg$$ جرم سوخت مصرفی

چنانچه چگالی این سوخت $\rho = ۰/۸۵ \frac{kg}{lit}$ باشد حجم سوخت مصرفی چنین خواهد بود :

$$V = \frac{M}{\rho} \Rightarrow V = \frac{۱۴/۴}{۰/۸۵} = ۱۶/۹۴۱ lit \approx ۱۷ lit$$

در جدول **۳ــ۹** ارزش گرمایی بعضی از سوخت‌ها درج شده است.

واحد ارزش گرمایی در سیستم انگلیسی برابر است با : بی‌تی‌یو بر پوند (Btu/lb) که معادل آن برای واحدهای kcal/kg و kJ/kg چنین است :

$$۱Btu/lb = ۰/۵۵۶ kcal/kg = ۲/۳۲۶ kJ/kg$$

جدول ۳ــ۹ــ ارزش حرارتی بعضی از سوخت‌ها (تقریبی)

سوخت	kcal/kg	kJ/kg (۱cal ≈ ۴/۲J)
جامد		
چوب با رطوبت کمتر از ۵٪	۱۴۰۰ــ۲۴۰۰	۵۸۸۰ــ۱۰۰۸۰
تورب (زغال‌سنگ نارس)	۱۶۰۰	۶۷۰۰
لینیت (زغال‌سنگ قهوه‌ای)	۲۰۰۰	۸۴۰۰
زغال‌سنگ قیردار	۷۵۰۰ــ۹۰۰۰	۳۱۵۰۰ــ۳۷۸۰۰
آنتراسیت (زغال‌سنگ درخشان)	۹۰۰۰	۳۷۸۰۰
زغال چوب	۷۰۰۰	۲۹۴۰۰
کک	۷۵۰۰	۳۱۵۰۰
بریکت (خاکه زغال‌سنگ و ۵٪ قطران)	۶۰۰۰	۲۵۲۰۰
مایع		
بنزین	۱۰۶۰۰	۴۴۵۰۰
گازوئیل (نفت گاز)	۹۰۰۰	۳۱۵۰۰
مازوت	۹۴۰۰	۳۹۵۰۰
نفت سفید	۹۲۰۰	۳۸۶۵۰
الکل‌ها	۶۰۰۰ــ۷۰۰۰	۲۵۲۰۰ــ۲۹۴۰۰
گاز	**kcal / m³**	**kJ / m³**
منوکسیدکربن CO	۳۱۰۰	۱۳۰۰۰
ئیدروژن H^2	۲۶۰۰	۱۱۰۰۰
متان CH_4	۹۵۰۰	۴۰۰۰۰
اتان C_2H_6	۱۶۸۰۰	۷۰۵۰۰
بوتان C_4H_{10}	۳۲۰۰۰	۱۳۴۵۰۰
بنزن C_6H_6	۳۳۰۰۰	۱۳۸۵۰۰
گاز طبیعی	۸۵۰۰	۳۵۷۰۰
گاز کوره ککسازی	۴۰۰۰	۱۶۸۰۰