

فصل نهم

اندازه‌گیری دما

۹-۱ استانداردها و درجه‌بندی

سیستم‌های اندازه‌گیری بین‌المللی شامل چهار کمیت مستقل از هم می‌باشند که عبارتند از: طول، زمان، جرم و دما. استانداردهای کمیت‌های ددیگر از این کمیات اصلی حاصل می‌شوند. در فصل‌های قبل استانداردهای موجود برای جرم، طول و زمان را بیان کردیم. در اینجا به بیان استانداردهای موجود برای دما می‌پردازیم. بایستی توجه داشت که کمیت دما در طبیعی خود با کمیت‌های طول، زمان و جرم اختلافات اساسی دارد. بدین معنی که اگر دو جسم با طول مساوی با هم ترکیب شوند طول کل آنها دو برابر می‌شود. این مطلب در مورد دو وقفه زمانی و یا دو جرم نیز صادق می‌باشد اما با ترکیب دو جسم با دمای یکسان جسمی دقیقاً با همان دمای اولیه جسم‌ها حاصل می‌شود. با این مقدمه می‌توان فهمید که نمی‌توان از ترکیب کمیت‌های جرم و طول و زمان برای بدست آوردن استانداردهای دما استفاده کرد. حتی امروزه نیز که با مکانیک آماری می‌توان رابطه‌ای بین دما و انرژی جنبشی مولکولهای جسم برقرار کرد باز هم نمی‌توان دما را بدست آورد زیرا انرژی جنبشی مولکولها را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد. همه این موارد باعث می‌شود که ما احتیاج به یک استاندارد مستقل برای دما داشته باشیم.

برخلاف سایر قوانین فیزیکی مفهوم کلی در مورد دما به راحتی قابل تصور نیست. برای بیشتر کاربردها، قانون صفرم ترمودینامیک مفهوم مفیدی از دما را در اختیار ما قرار می‌دهد: جسمی را دارای دمای یکسان گویند که در تعادل گرمایی^۱ با هم باشند و این هنگامی قابل حصول است که در اثر ارتباط حرارتی بین دو جسم خواص ترمودینامیکی آنها تغییر نکند. قانون صفرم می‌گوید هنگامی که دو جسم در تعادل گرمایی با جسم سوم باشند آن دو جسم در تعادل گرمایی با هم هستند و بنا به تعریف دمای آنها یکی می‌باشد.

براساس توضیح بالا اگر بتوان به وسیله‌ای یک محدوده دمایی را تولید نمود می‌توان دماهای مجهول اجسام دیگر را با مقایسه با دماهای معلوم استاندارد اندازه‌گیری کرد. برای این کار کافیهست که از یک ترمومتر به روش صحیح استفاده شود. برای مثال طول یک میله فلزی با تغییرات دما تغییر می‌کند برای بدست آوردن یک مقیاس دمایی بایستی یک دما را به عنوان دمای مرجع انتخاب کرده و از یک خط‌کش هم برای تشخیص تفاوت بین دمای

مرجع و سایر دماها استفاده کنیم. فرض کنید برای این کار از یک میله مسی به طول ۱ متر استفاده کنیم و آن را درون یک طشت مخلوط آب و یخ قرار دهیم که دمای آب و یخ به عنوان دمای مرجع ما می‌باشد. طول میله مسی را اندازه می‌گیریم. اجازه دهید که دمای آب و یخ را C^0 بنامیم. حال به سادگی می‌توان با تعریف قانونی همه دماهای بالا و پایین این دما (دمای مرجع) را اندازه‌گیری کرد. (فرض می‌کنیم که هر 0.1mm از دیاد طول میله معادل با $C^0 + 1$ و هر 0.1mm کاهش طول میله هم معادل با $C^0 - 1$ در مقیاس دمایی ما باشد).

در ادامه به بررسی روشهای مختلف اندازه‌گیری دما می‌پردازیم.

۹-۲ روش‌های اندازه‌گیری دما با استفاده از انبساط حرارتی^۲

تعدادی از وسایل حس کننده دما براساس اثر طبیعی انبساط حرارتی در یک جهت یا چند جهت کار می‌کنند. از انبساط مواد جامد اساساً در عناصر دو فلزی^۳ استفاده می‌شود. در این وسایل از اختلاف ضریب انبساط حرارتی دو نوار از دو جنس متفاوت که به هم متصل شده‌اند استفاده می‌شود. از انبساط مایعات در فشار ثابت برای ترمومترهایی که درون شیشه آنها مایع وجود دارد استفاده می‌شود.

در ترمومترهای نوع فشاری با جلوگیری از انبساط مایع یا گاز یا بخار موجود در مخزن ترمومتر فشار سیال بالا رفته و می‌توان از این راه دما را بدست آورد.

۹-۲-۱ دماسنج‌های دو فلزی^۴

اگر دو نوار فلزی از جنس A و B را که دارای ضرایب انبساط حرارتی متفاوتی می‌باشند و در دمای یکسانی هستند، به خوبی به هم متصل کنیم هرگونه اختلاف دمایی باعث می‌شود که در دو نوار تغییر طولهای متفاوتی ایجاد شود شکل (۹-۱-الف). اگر که نوارها بتوانند به راحتی تغییر طول بدهند به شکل یک کمانی از دایره در می‌آیند. می‌توان رابطه زیر را برای شکل کمان بیان کرد.

$$\rho = \frac{t \left\{ 3(1+m)^2 + (1+mn) \left[m^2 + \frac{1}{mn} \right] \right\}}{6(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)(1+m)^2} \quad (9-1)$$

که در آن :

ρ : شعاع انحناء

t : پهنای نوار فلزی (در عمل $0.125 \text{ in} < T > 0.0005 \text{ in}$)

$n = \frac{E_B}{E_A}$: نسبت مدول‌های الاستیک دوفلز

$m \triangleq \frac{t_B}{t_A}$

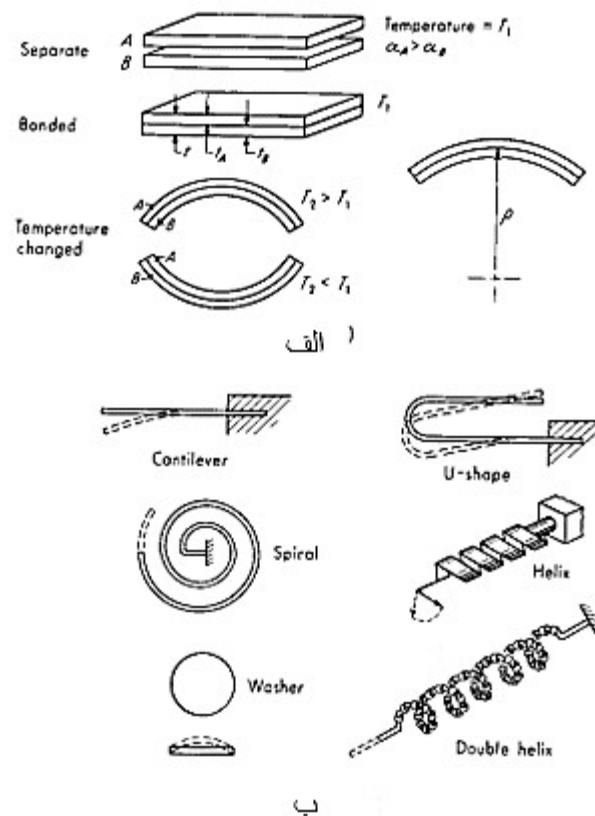
$T_2 - T_1$: افزایش دما

در بیشتر کاربردهای عملی $\frac{t_B}{t_A} \cong 1$ و $n + 1/n = 2$ که در این صورت معادله ۹-۱ به صورت زیر در می‌آید.

$$\rho = \frac{2t}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)} \quad (9-2)$$

از آنجا که فلزی با ضریب انبساط حرارتی منفی وجود ندارد، معمولاً جنس فلز B را از Invar یا فولاد نیکل در Nickel steel که دارای ضریب انبساط تقریباً صفر می‌باشد $\left(1.7 \times 10^{-6} \frac{\text{in}}{\text{in}^\circ\text{C}}\right)$ می‌سازند. هنگامی که برنج در ساخت دماسنج‌های دوفلزی استفاده می‌شود، از آلیاژهای مختلفی می‌توان برای قسمت با ضریب انبساط حرارتی بیشتر استفاده کرد. آلیاژهای مورد نظر بسته به خواص مکانیکی و الکتریکی لازم انتخاب می‌شوند.

اگر چه جزییات آلیاژهای استفاده شده در دماسنج‌های دوفلزی در بعضی موارد ناشناخته می‌باشند اما بعضی از اشکال آن در شکل (۹-۱-ب) آمده‌اند. از دماسنج‌های دوميله‌ای در وسایل اندازه‌گیری دما و وسایلی که ترکیبی از سیستم‌های حس کننده می‌باشند استفاده می‌شود. سیستم کنترل این دماسنج‌ها از نوع on-off می‌باشد.



شکل (۹-۱) سنجه نوار دوفلزی

یکی از کاربردهای مهم دماسنج‌های دوفلزی در سوئیچهای قطع کننده جریان اضافی در مدارهای الکتریکی می‌باشد. در این وسایل اجازه داده می‌شود که جریان الکتریکی از دماسنج دوميله‌ای بگذرد. عبور جریان از نوار فلزی باعث گرم شدن آن شده و دماسنج دوفلزی منبسط می‌شود. در نتیجه سوئیچ در مواقعی که جریان اضافه در شبکه باشد قطع می‌کند.

یکی دیگر از کاربردهای دماسنج دوفلزی به عنوان وسیله تنظیم کننده دما می‌باشد که در آن دما به عنوان یک ورودی معلوم به سیستم کنترل به حساب می‌آید. در این وسایل از تناسب موجود بین جابجایی فیزیکی دو میله و دما می‌توان برای تنظیم دما استفاده کرد. دقت دماسنج‌های دوفلزی بسته به نوع کاربرد آنها تغییر می‌کند اما از آنجا که این نوع کنترل در مواردی بکار می‌رود که حساسیت زیادی لازم نیست، سعی می‌شود که از وسایل ساده با قیمت کم استفاده شود. محدوده عملکرد این دماسنج‌ها از 100°F تا 1000°F می‌باشد. به تازگی در ساخت دماسنج‌های دوميله‌ای از پتانسیومترهای پلاستیکی هادی استفاده می‌شود.

۹-۲-۲ دماسنج‌های شیشه‌ای محتوی سیال

دماسنج‌های شیشه‌ای محتوی سیال را می‌توان با تغییر در مواد ساختمانی یا تغییر در شکل و فرم ساختمانی آنها در محدوده وسیعی بکار برد. در بیشتر دماسنج‌ها برای اندازه‌گیری دماهای متوسط و دماهای بالا از جیوه استفاده می‌شود. از آنجا که دمای انجماد جیوه 38°F - می‌باشد این دما به عنوان حد پایین این نوع دماسنج‌ها به حساب می‌آید و حد بالای آنها در حدود 1000°F می‌باشد. لازم است که از شیشه‌های مخصوص و از گاز بی‌اثری که فضای خالی بالای جیوه را پر می‌کند استفاده شود. با متراکم شدن گاز موجود در فضای آزاد بالای جیوه از جدا شدن مولکولهای جیوه^(۱) جلوگیری می‌شود. همچنین این کار باعث می‌شود نقطه جوش مایع بالاتر برود. برای اندازه‌گیری دماهای خیلی کم می‌توان از مایعات مانند الکل (80°F -)، تولوئن (130°F -)، پنتان (330°F -) و ترکیبی از پروپان و پروپیلن (برای دمای زیر 360°F -) استفاده کرد.

دماسنج‌ها معمولاً در دو نوع ساخته می‌شوند: کاملاً شناور^(۲) و نیمه‌شناور^(۳) دماسنج‌های کاملاً شناور به نحوی درجه‌بندی می‌شوند که در هنگام اندازه‌گیری دما ستون مایع کاملاً درون مایعی که دمای آن اندازه‌گیری می‌شود قرار گیرد. در این صورت است که دماسنج مقدار صحیحی از دمای مایع را نشان می‌دهد. از آنجا که خواندن دما در این حالت شاید کمی مشکل شود می‌توان با پذیرش مقداری خطا به قسمتی از ستون مایع درون دماسنج اجازه داد که بالای سطح مایع درون ظرف قرار گیرد و از این راه خواندن دمای آن آسانتر شود.

دماسنج‌های نوع نیمه‌شناور لازم است که تنها قسمتی از ستون مایع شناور بماند و باقی ستون مایع (exposed portion) در معرض دمای معینی (دمای محیط اطراف) قرار گیرد. این نوع دماسنج‌ها از نظر دقت در اندازه‌گیری کم دقت‌تر از نوع کاملاً شناور می‌باشند. اگر قسمتی از ستون مایع که در معرض محیط قرار می‌گیرد (portion exposed) در محیطی با دمای غیر از دمای درجه‌بندی قرار گیرد بایستی تصحیح در مقدار قرائت شده انجام شود. در مواردی که شرایط محیطی با شرایط درجه‌بندی تفاوت داشته باشد می‌توان با بکارگیری یک دماسنج کمکی^(۴) در نزدیکی میله دماسنج تصحیحات لازم را انجام داد. این دماسنج دمای هوا را در هنگام کار اندازه‌گیری می‌کند و می‌توان مقدار تصحیحات را از رابطه زیر بدست آورد. (این فرمول برای زمانی که جیوه درون لوله دماسنج باشد).

$$0.00009n(t_{cal} - t_{act})^0 F = \text{تصحیحات} \quad (9-3)$$

t_{cal} : دمای هوا در هنگام درجه‌بندی دماسنج

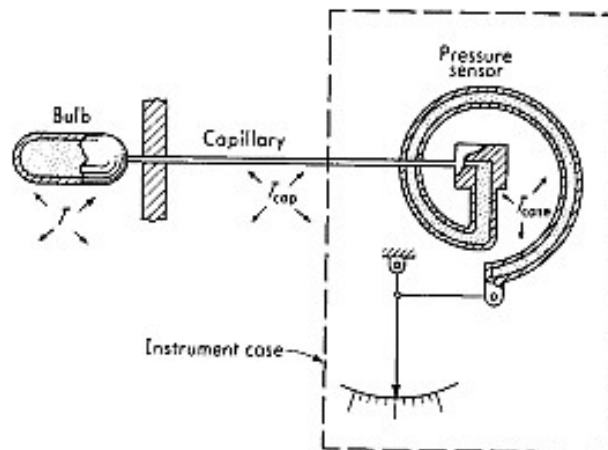
t_{act} : دمای هوا در هنگام استفاده از دماسنج (دمایی که دماسنج کمکی خوانده)
 n : تعداد درجه‌های مقیاس دما هم‌ارز با مقداری از ستون مایع که از ظرف بیرون می‌باشد.

هنگامی که از یک دماسنج کاملاً شناور به جای یک دماسنج شناور استفاده می‌شود جهت تصحیحات همان فرمول بکار می‌رود اما به جای مقدار $t_{act} - t_{cal}$ از (مقدار خوانده شده توسط دماسنج کمکی - مقدار خوانده شده توسط دماسنج اصلی) استفاده می‌شود. همچنین در فرمول بالا اگر مقیاس ما از F^3 به C^3 تغییر پیدا کند، مقدار ثابت از $0/00009$ به $0/00016$ تغییر پیدا می‌کند.

دقتی را که می‌توان از دماسنج‌های شیشه‌ای محتوی سیال (دماسنج‌های معمولی) به دست آورد به کیفیت وسایل، محدوده دمایی قابل اندازه‌گیری توسط دماسنج و نوع دماسنج از نظر شناوری بستگی دارد. برای دماسنج‌های کاملاً شناور که در آن از بهترین وسایل استفاده شده و درجه‌بندی شده باشد مقدار خطا برای محدوده دمایی ($32F^3$ تا $-328F^3$) در حدود $0/4F^3$ و در محدوده دمایی ($950F^3$ تا $600F^3$) در حدود $0/8F^3$ می‌باشد. اما مقدار خطا در مورد دماسنج‌های قسمتی شناور ممکن است چند بار بزرگتر باشد (حتی با تصحیحات مربوط به تغییرات دمای محیط اطراف دماسنج).

۳-۹ ترمومترهای فشاری^(۱)

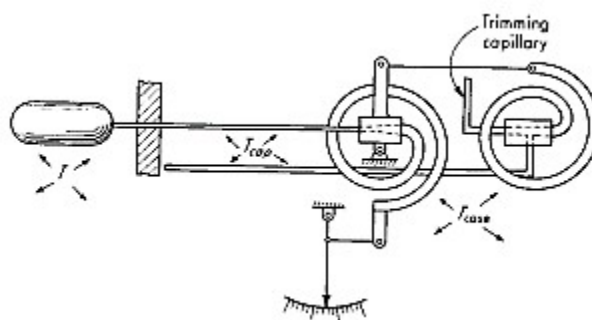
دماسنج‌های فشاری تشکیل شده‌اند از: یک کپسول حس کننده^(۲)، لوله رابط موئین^(۳) و یک وسیله برای اندازه‌گیری فشار همانند لوله بوردن^(۴) یا bellow و یا دیافراگم شکل (۹-۲). هنگامی که سیستم کاملاً از مایع پر شد، مقدار تراکم مایع در اثر فشار وارد بر مایع بسیار کوچک می‌باشد. به طوری که در اندازه‌گیری فشار از روی تغییرات حجم مایع مقدار تراکم اولیه مایع به حساب نمی‌آید.



شکل (۹-۲) دماسنج فشاری

در مورد وسایلی که به جای مایع از بخار یا گاز استفاده می‌کنند عکس روش بالا انجام می‌شود. در این موارد از اثر تغییرات دما بر روی تغییرات فشار در حجم ثابت استفاده می‌شود.

در بعضی موارد که اندازه‌گیری از راه دور انجام می‌گیرد ممکن است از لوله موئینی تا طول 200 ft هم استفاده شود. لازم است که تغییرات دما در طول لوله موئین و همچنین در وسیله حس کننده فشار به حساب آید. اما در وسایل اندازه‌گیری دما که با گاز و براساس تغییرات فشار کار می‌کنند، فشار تنها به دمای سیال در تماس با سطح آزاد در مخزن بستگی دارد. در شکل (۹-۳) یک نوع از وسایل اندازه‌گیری دما که تصحیحات در دما را هم به حساب می‌آورد نشان داده شده است. حرکت سیستم تصحیح کننده همانند یک ورودی فراهم برای سیستم می‌باشد که از حرکت کل سیستم اصلی کم شده و در نتیجه خروجی تنها به دمای مخزن بستگی پیدا می‌کند. با کم و زیاد کردن طول لوله موئین *triming* که در شکل به آن اشاره شده است، می‌توان حجم محفظه تصحیح کننده^(۵) را تغییر داده و آن را به دقت تنظیم نمود. معمولاً در ساخت محفظه و اجزاء لوله موئین تصحیح کننده از دماسنج‌های دوميله‌ای^(۶) استفاده می‌شود. مایعی که درون این نوع سیستمها بکار می‌رود اگر اگزیلین^(۷) باشد محدوده دمایی 150°F تا 750°F و اگر جیوه باشد محدوده 38°F تا 1100°F را پوشش می‌دهد. اگزیلین فقط تا دمای 300°F و جیوه تا 1000°F از خود رفتارهای خطی نشان می‌دهند.

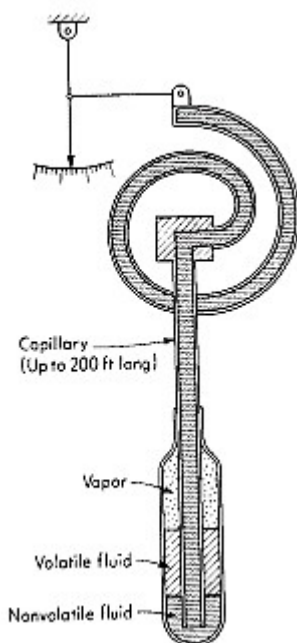


شکل (۹-۳) روش جبران اثر دمای محیط

سیستمهایی که درون آنها از گاز پر شده است در محدوده دمایی 400°F تا 1200°F بکار می‌روند و رفتار آنها فقط تا 1000°F خطی می‌ماند. در این وسایل تغییرات دما در طول لوله موئین به قدری ناچیز است که احتیاجی به تصحیح ندارد. دماسنج‌های نوع فشاری که در آنها از بخار استفاده شده است را می‌توان در محدوده

$40\text{ }^{\circ}\text{F}$ تا $600\text{ }^{\circ}\text{F}$ بکار برد. درجه‌بندی این نوع دماسنج‌ها غیرخطی است اما در مواقعی که لازم باشد خروجی به صورت خطی باشد، می‌توان با مکانیزمهای مخصوص خروجی را خطی کرد.

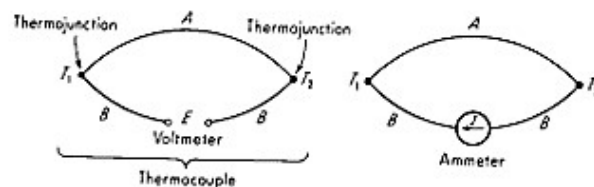
با توجه به اینکه مخزن گرمتر از سایر قسمت‌های دستگاه و یا سردتر و یا در تعادل دمایی با سایر قسمت‌ها باشد، خصوصیات سیستم به شدت تغییر می‌کند. زیرا این ویژگی تعیین می‌کند در کجای سیستم بخار و در کجا مایع وجود دارد. در شکل (۹-۴) یک نوع از این دماسنج‌ها نشان داده شده است. در این نوع دماسنج‌ها دیگر تصحیحات مربوط به لوله موئزن و محفظه لازم نیست، زیرا فشار بخار مایع تنها به دمای سطح آزاد بستگی دارد و سطح آزاد مایع همواره درون مخزن قرار می‌گیرد. در این نوع دماسنج‌ها از مایعات فرار استفاده می‌کنند که این مایعات معمولاً ترکیباتی از اتان یا کلروبنزن می‌باشند.



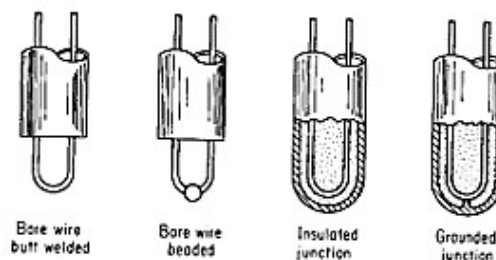
شکل (۹-۴) دماسنج فشار بخار

۹-۴ ترموکوپل‌ها (حس‌گرهای ترموالکتریکی) ^(۱)

اگر دو سیم از دو فلز متفاوت به صورت مدار نشان داده شده در شکل (۹-۵-الف) به هم متصل شوند به طوری که یک نقطه اتصال آنها در دمای T_1 و نقطه اتصال دیگر در دمای T_2 باشد، در این صورت با یک ولتمتر و یا آمپرتر می‌توان دید که در مدار حاصله اختلاف پتانسیل E و یا جریان I وجود دارد.



الف



ب

شکل (۹-۵) ترموکوپل‌های اساسی و انواع پیوند آن‌ها

مقدار اختلاف پتانسیل الکتریکی E ایجاد شده به جنس فلزات و دماهای T_1 و T_2 بستگی دارد. مقدار جریان I را می‌توان به سادگی از تقسیم E بر مقاومت الکتریکی کل مدار به دست آورد. توان الکتریکی در اثر انتقال گرما از محیط به سیم‌ها ایجاد می‌شود. بنابراین می‌توان قانون بقای انرژی را برای تبدیل انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی نوشت. عکس این کار نیز صادق است یعنی اگر با یک منبع خارجی جریان الکتریکی در مدار ترموکوپل ایجاد کنیم، باعث خواهد شد که گرما از مدار به محیط انتقال یابد. رابطه بین ولتاژ E ایجاد شده و دماهای T_1 و T_2 توسط اثر Seeback بیان می‌شود. دماهای T_1 و T_2 به خود اتصالات بستگی دارند. برای اینکه دمای جسمی را به وسیله ترموکوپل اندازه بگیریم بایستی جسم را در تماس با نقطه ترموکوپل^(۲) قرار دهیم. با این کار گرما از نقطه اتصال و یا به نقطه اتصال انتقال می‌یابد. بنابراین دمای نقطه اتصال به ترتیب بایستی بیشتر و یا کمتر از دمای جسم باشد. این عملیات انتقال گرما و سرما را اثر peltier می‌نامند.

اگر بخواهیم ولتاژ ترموکوپل را توسط یک پتانسیومتر اندازه بگیریم هیچ جریانی در ترموکوپل ایجاد نمی‌شود و اثر peliter هم در نقطه اتصال به وجود نمی‌آید. اما وقتی که از یک میلی ولت‌متر استفاده می‌شود، جریان برقرار شده و گرما در نقطه اتصال جذب می‌شود (برای جذب شدن گرما در نقطه اتصال بایستی نقطه اتصال سردتر از محیط باشد). اما وقتی گرما در نقطه اتصال آزاد شود باعث می‌شود که نقطه اتصال از محیط اطراف گرم‌تر شود.

مقدار گرمای آزاد شده در نقطه اتصال به جریان گذرنده از این نقطه بستگی دارد اما خوشبختانه در مورد جریانهای به وجود آمده در ترموکوپل ها این اثرات گرمایی ناچیز می باشد.

یکی دیگر از اثرات انتقال گرمای برگشت پذیر اثر Thomson می باشد. اثر Thomson علاوه بر دمای خود اتصالات بر روی دمای هادیهای بین اتصالات نیز تأثیر می گذارد.

هنگامی که جریان از هادی می گذرد باعث ایجاد یک گرادیان دما در هادی می شود و بنابراین گرما در طول هادی انتقال می یابد. در حالتی که انتقال گرما در جهت جریان الکتریکی باشد گرما در هر نقطه آزاد می شود اما در مواردی که انتقال گرما در جهت خلاف جریان الکتریکی باشد گرما در هر نقطه جذب می شود. از آنجا که اثر Thomson به جریان الکتریکی ربط دارد اگر از پتانسیومتر استفاده شود این اثر ایجاد نمی شود. حتی اگر از یک میلی ولت متر هم استفاده شود اثر انتقال گرما در دمای هادیها کاملاً قابل صرف نظر کردن است. در نهایت بایستی گفت که مقدار گرمای ایجاد شده در یک هادی که جریان از درون آن می گذرد RI^2 می باشد که این گرما باعث افزایش دمای مدار می شود. مقدار خطا در مدارهایی که از میلی ولت متر استفاده می کنند معمولاً قابل صرف نظر کردن می باشد، اما اگر شرایط انتقال گرما معلوم باشد مقدار خطا را می توان بدست آورد.

اثرات فیزیکی گفته شده را می توان در مقیاس ماکروسکوپی با ترمودینامیک کلاسیک تحلیل کرد. فرض می شود که اثر peltier با دمای نقطه اتصال متناسب باشد و اثر Thomson با اختلاف مربعات دمای اتصال ربط داشته باشد، مقدار پتانسیل کل از رابطه زیر بدست می آید.

$$E = C_1(T_1 - T_2) - C_2(T_1^2 - T_2^2) \quad (3-9)$$

به طور مثال برای ترموکوپل مس کنستانتین ضرایب ثابت به صورت زیر در می آیند.

$$E = 62.1 (T_1 - T_2) + 0.45 (T_1^2 - T_2^2) \quad (4-9)$$

که در آن :

E : تمامی ولتاژ (mn)

T_1 و T_2 : (K) دمای مطلق نقطه اتصال

اما متأسفانه فرضیاتی که برای رسیدن به معادلات ۳-۹ و ۴-۹ انجام داده‌ایم در عمل دقیقاً رعایت نمی‌شوند. بنابراین برای بدست آوردن دمای دقیق از روی مقدار ولتاژ اندازه‌گیری شده در مسائل عملی نمی‌توان از معادلات ۳-۹ و ۴-۹ استفاده کرد. کاری که در عمل انجام می‌شود این است که مواد ترموکوپل بایستی در محدوده کامل کاربرد دمایی ترموکوپل درجه‌بندی شوند. در این درجه‌بندی تنها مقدار ولتاژ کل مورد توجه قرار می‌گیرد و به مقادیر ولتاژ اثرات Thomson و peltier توجهی نمی‌شود. اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپلها تماماً با استفاده از نتایج درجه‌بندی تجربی و بکار گرفتن قوانین ترموکوپلها انجام می‌گیرد. قوانین ترموکوپلها که در زیر آورده شده است برای بررسی مدارهای ترموکوپلها که در عمل استفاده می‌شوند بکار می‌آیند. قوانین ترموکوپلها را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد.

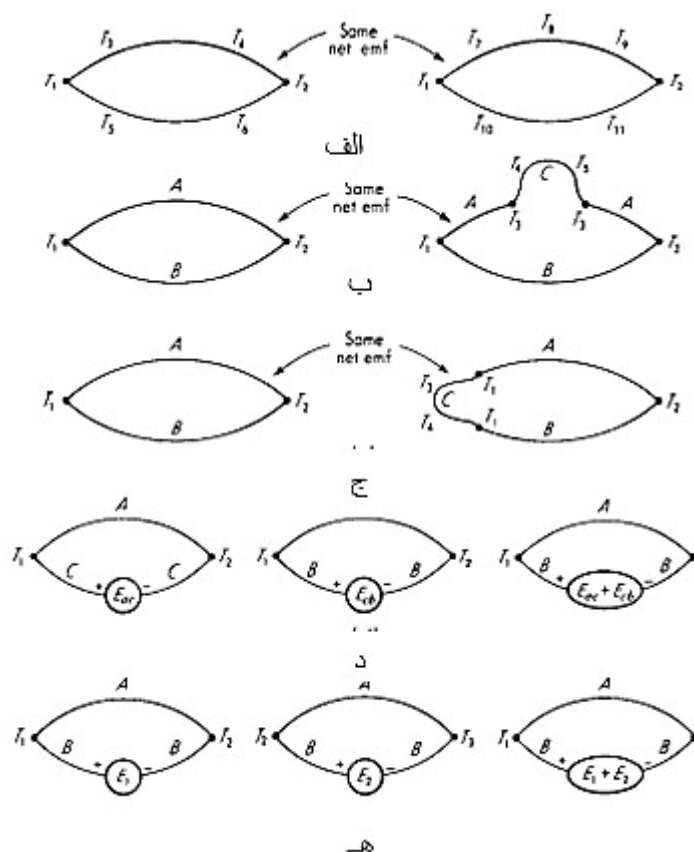
۱- مقدار دمای نقاط مختلف مدار ترموکوپلها که نقاط اتصال آنها در دمای T_1 و T_2 می‌باشند هیچ تأثیری بر نیروی الکتروموتوری (emf) حرارتی ترموکوپل ندارد به شرط اینکه دوفلز بکار رفته در ترموکوپل همسان باشند شکل (۹-۶-الف).

۲- اگر فلز همسان مشابه A یا B اضافه شود شکل (۹-۶-ب) به نحوی که طول فلز C آنقدر باشد که دو نقطه اتصال حرارتی جدید دارای دمای یکسانی باشند مقدار emf بدون توجه به دمای C تغییری نمی‌کند.

۳- اگر فلز C بین دو فلز A و B در یکی از نقاط اتصال اضافه شود مطابق شکل (۹-۶-ج) مقدار دمای فلز C هر چه می‌تواند باشد بدون اینکه تأثیری بر emf داشته باشد (به شرط اینکه دمای نقطه اتصال بین CA و CB یکی باشد).

۴- اگر emf حرارتی بین فلزات A و C برابر EAC و بین فلزات B و C برابر EBC باشد آنگاه emf حرارتی بین A و B برابر $E_{AC} + E_{CB}$ می‌باشد شکل (۹-۶-ج).

۵- اگر یک ترموکوپل بین دماهای T_1 و T_2 ، emf برابر با E_1 را ایجاد کند و بین دماهای T_2 و T_3 ، emf برابر E_2 را ایجاد کند، بین دماهای T_1 و T_3 ولتاژ $E_1 + E_2$ را ایجاد می‌کند شکل (۹-۶-ه).



در شکل (۹-۶) ترموکوپل‌های مشابه

قوانین بالا در کاربردهای عملی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. با توجه به قانون اول می‌توان گفت اگر سیمی که دو نقطه اتصال را به هم متصل می‌کند از محیطی با دمای t مشخص و یا متغیر عبور کند، دمای آن محیط بر روی ولتاژ خروجی تأثیری ندارد. به واسطه قانون دوم و سوم به استفاده کننده این اجازه داده می‌شود که با اضافه کردن یک وسیله اندازه‌گیری در مدار مقدار emf را اندازه بگیرد. وسیله اندازه‌گیری می‌تواند به دو طریق در مدار قرار گیرد شکل (۹-۶-ب) و (۹-۶-ج). همچنین به واسطه قانون سوم می‌توان برای اتصال در ترموکوپل از لحیم کردن و اضافه کردن ماده مومی، استفاده کرد بدون اینکه در مقدار اندازه‌گیری تأثیری داشته باشد. قانون چهارم برای درجه‌بندی ترموکوپلها بکار می‌رود. به واسطه این قانون لازم نیست که هر جفت فلز را که در ساختن ترموکوپل استفاده می‌شود جداگانه درجه‌بندی نمود. زیرا هر کدام از آنها را می‌توان با یک فلز استاندارد (پلاتینیوم) مقایسه کرده و به صورت جداگانه درجه‌بندی نمود و بعد هر ترکیبی از دو فلز را مورد استفاده قرار داد.

در مورد قانون پنجم بایستی توجه داشت که در بکار بردن ترموکوپل برای اندازه‌گیری یک دمای نامعین بایستی دمای یکی از نقاط اتصال معلوم باشد. در این صورت با داشتن مقدار ولتاژ می‌توانیم دمای نقطه اتصال دیگر را که

نامعلوم است از جدول درجه‌بندی بدست آورد. برای درجه‌بندی ترموکوپلها دمای یکی از نقاط اتصال را در دمای مرجع (۳۲f) ثابت نگه داشته، دمای نقطه اتصال دیگر را در محدوده کاربرد ترموکوپل تغییر می‌دهند و مقدار ولتاژ را اندازه می‌گیرند. بنابراین بیشتر جداول درجه‌بندی براساس دمای مرجع معین ۳۲f بدست آمده‌اند در حالی که هنگامی که از یک ترموکوپل استفاده می‌شود نقطه اتصال مرجع لزوماً در دمای ۳۲f نمی‌باشد. اگر نقطه مرجع در دمای استاندارد نباشد قانون پنجم به ما این امکان را می‌دهد که از جداول استاندارد بتوانیم استفاده کنیم. برای روشن شدن مطلب به مثال زیر توجه کنید:

فرض کنید اتصال مرجع در دمای ۷۰f قرار دارد و مقدار ولتاژ خوانده شده هم ۱/۲۳mV می‌باشد. از شکل (۹-۶) مقدار $T_1=32f$ و $T_2=70f$ را می‌گیریم. T_3 هم دمای مجهول ما می‌باشد. با انتخاب مقادیر T_1 و T_2 می‌توانیم مقدار E_1 را از جدول استاندارد بخوانیم و مقدار E_2 هم ۱/۲۳mV اندازه گرفته شده پس $E_1+E_2=1/94mV$ خواهد بود. مقدار دمای مجهول با مراجعه به جدول و جستجوی دمای متناظر با $E=1/94mV$ به راحتی قابل محاسبه است. با این کار مقدار دما ۱۰۰f بدست می‌آید.

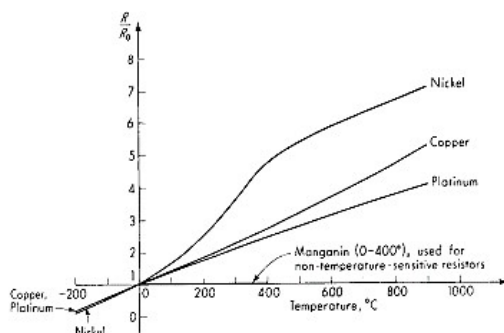
۹-۵ ترمومترهای مقاومتی^(۱)

تغییرات مقاومت الکتریکی R با دما برای بیشتر مواد فلزی به صورت زیر می‌باشد:

$$R = R_0(1 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n) \quad (9-5)$$

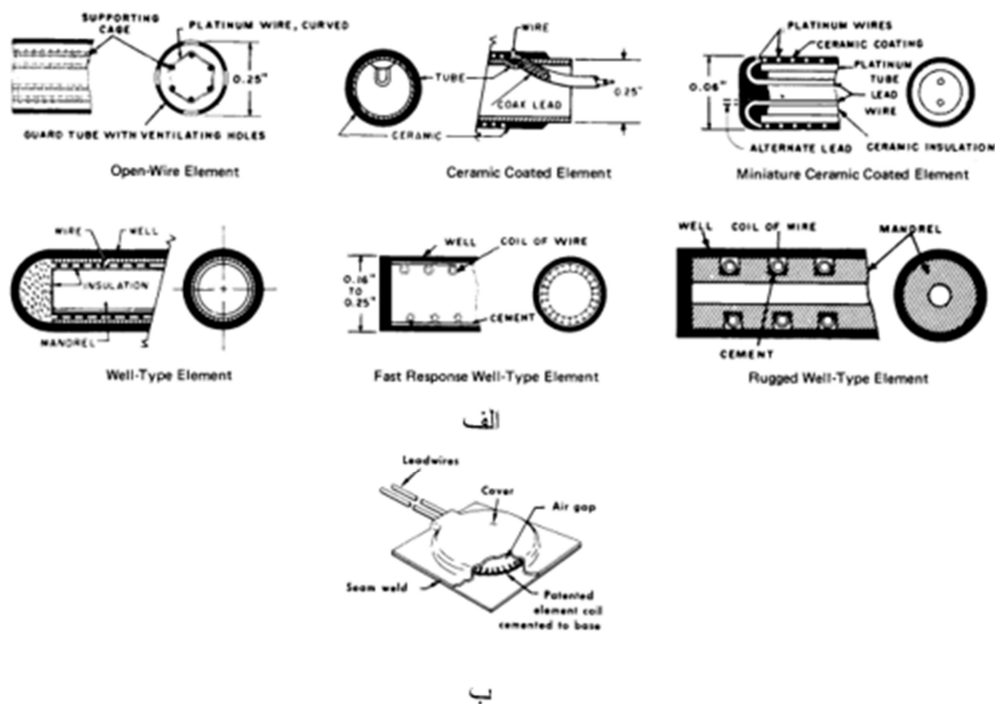
که R^3 مقدار مقاومت الکتریکی در دمای $T=0$ می‌باشد شکل (۹-۷). تعداد عبارات در معادله فوق بستگی به جنس فلز، مقدار دقت مورد نظر و محدوده دمایی که بایستی پوشش دهد دارد. پلاتینیوم، نیکل و مس موادی هستند که بیشتر استفاده می‌شوند اما از آلیاژهای تنگستن و نیکل هم استفاده می‌کنند. معمولاً از میان عبارتهای بالا فقط تا $a_n = 1$ استفاده می‌شود زیرا در محدوده تغییرات دمایی کم، تغییرات R با T به صورت خطی می‌باشد. به طور مثال پلاتینیوم با دقت ۰/۴٪ در محدوده ۱۰۰f- تا ۳۰۰f- و از ۱۰۰f- تا ۳۰۰f خطی عمل می‌کند. همچنین برای محدوده ۳۰۰f تا ۰f³ با دقت ۰/۳٪ خطی عمل می‌کند و با دقت ۱/۲f³± برای محدوده ۵۰۰f، ۱۵۰۰f خطی عمل می‌کند. اجزایی که تغییرات دمایی را حس می‌کنند به شکلهای مختلفی ساخته می‌شوند شکل (۹-۹). برای اندازه‌گیری دمای سیالات ممکن است از یک سیم‌پیچ که درون یک مخزن از جنس فولاد ضدزنگ^(۲) قرار گرفته، برای جلوگیری از خوردگی استفاده شود. انواعی که سیم‌پیچ را مستقیماً در معرض سیال قرار می‌دهند هم وجود دارند ولی در این نوع بایستی مسائل خوردگی مورد توجه قرار گیرند. نوع اخیر نسبت

به قبلی از سرعت پاسخ بیشتری برخوردار است. برای اندازه‌گیری دمای جامدات انواع مختلف سیم‌پیچ‌ها با سرهای پهن موجود می‌باشند که ممکن است به سطح ماده جامد جوش شوند و یا توسط قید و بست متصل شوند و یا اینکه به سطح جسم چسبانده شوند. معمولاً از ورقهای نازک پلاتینیوم که از هم جدا شده‌اند به جای سیم‌پیچ استفاده می‌شود.



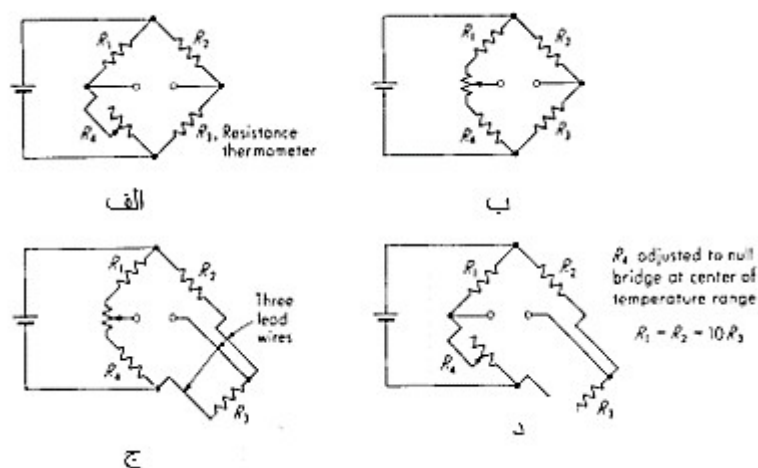
شکل (۷-۹) منحنی‌های مختلف مقاومت بر حسب دما برای مواد مختلف

ترانسدیوسرهای اندازه‌گیری که به سطح جسم چسبانده می‌شوند دارای مقداری خطای ناشی از ورودیهای تداخلی از نوع کرنش می‌باشند. این کرنشها می‌توانند ناشی از بارگذاری موجود بر روی سازه و یا ناشی از کرنشهای انبساطی و انقباضی جسم باشند. با این همه می‌توان با یک طراحی دقیق اثرات این کرنشها را کاهش داد شکل (۸-۹-ب).



شکل (۸-۹) سنجه‌های دمای مقاومتی (RTD)

مدارات پل الکتریکی را که در ترمومترهای مقاومتی استفاده می‌شوند می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول آن مداراتی هستند که براساس مقدار تغییر ایجاد شده در سیستم اندازه‌گیری نسبت به حالت خنثی می‌توانند دما را اندازه بگیرند. (operation deflection mode of). دسته دوم مداراتی هستند که از نوع بالانس شونده می‌باشند و می‌توان آنها را به صورت دستی و یا به صورت اتوماتیک بالانس کرد و وقتی مدار در حالت بالانس قرار گرفت درجه حرارت را خواند به شکل (۹-۹) توجه شود. شکل (۹-۹-الف) یک مدار پلی شکل از نوع بالانس شونده را نشان می‌دهد. در اینجا با تغییر مقاومت R_f می‌توان سیستم را به حالت بالانس رساند. وقتی وقت خیلی زیادی مورد نیاز باشد می‌توان از سیستم شکل (۹-۹-ب) استفاده کرد. اگر طول زیادی سیمهای هادی که در مدار پل الکتریکی قرار می‌گیرند به صورت اجتناب ناپذیر در معرض تغییرات دمایی باشد، خطای ناشی از تغییر در مقاومت الکتریکی آنها را می‌توان با مدار سه پایه (سه سیم) siemens از بین برد شکل (۹-۹-ج).



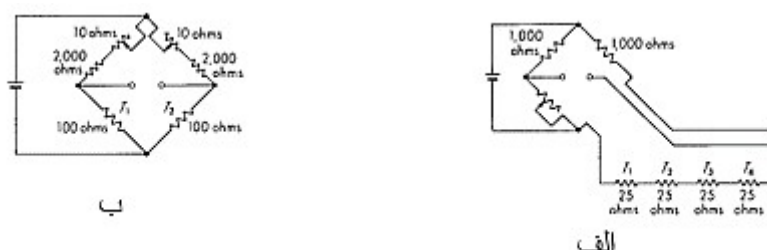
شکل (۹-۹) مدارهای پل دماسنج مقاومتی

پلهای ترمومترهای مقاومتی ممکن است با ولتاژ ac یا Dc کار کنند. مقدار جریان مستقیم و یا مقدار مؤثر جریان متناوبی که از ترمومتر می‌گذرد می‌تواند بین ۲mA تا ۲۰mA باشد. این جریان باعث اتلاف گرمایی RI^2 در ترمومتر می‌شود و در نتیجه دمای ترمومتر دمای اطراف کمی بیشتر خواهد شد. این عمل باعث ایجاد خطای خود گرمایش^(۱) می‌شود. مقدار این خط بستگی به شرایط انتقال گرما بین ترمومتر و محیط اطراف آن دارد و معمولاً به اندازه کافی کوچک می‌باشد. به طور مثال برای یک ترمومتر پلاتینیوم ۴۵۰W که جریان ۲۵mA در آن جریان دارد وقتی که درون اکسیژن مایع غوطه‌ور است مقدار خطای خود گرمایش $0.2^{\circ}F$ می‌باشد.

مقدار مقاومت الکتریکی ترمومترها از ۱۰W تا ۲۵۰۰۰W تغییر می‌کند. هرچه مقدار مقاومت الکتریکی ترمومتر بیشتر باشد مقدار تأثیر خطاهایی چون خطای سیم هادی در مدار پل الکتریکی و مقدار تغییرات مقاومت تماسی کمتر می‌شود. همچنین چون ولتاژ ایجاد شده با بالا رفتن مقاومت الکتریکی بیشتر می‌شود خطای ناشی از اتصال دوفلز غیریکسان^(۲) قابل صرف نظر کردن می‌شود.

پلاتینیوم برای محدوده دمایی ۱۹۵۰f تا ۴۵۰f-، مس برای محدوده ۵۰۰f تا ۳۲۰f-، نیکل برای ۸۰۰f تا ۳۲۰f- و تنگستن برای ۲۰۰۰f تا ۴۵۰f- استفاده می‌شوند.

اگر ساختمان ترمومتر و مدار پل آنرا مانند شکل (۹-۱۰-الف) بسازیم می‌توانیم مقدار متوسط دمایی را به کمک آن اندازه بگیریم. همچنین توسط مدار شکل (۹-۱۰-ب) می‌توانیم چند دما را حس (کنترل) کنیم. اندازه‌گیری دمای چند نقطه با دقت 0.05°F در راکتورهای هسته‌ای و سیستمهای خنک کننده آن بکار می‌رود.



شکل (۹-۱۰) مدارهای سنحه دمای میانگین و تفاضل دما

۹-۶ ترمیستور^(۳)

انواع قدیمی ترمیستورها از منگنز، نیکل و اکسید کبالت ساخته شده‌اند. این مواد ذوب شده، با نسبت صحیحی با هم مخلوط شده و به شکل مناسب در می‌آمدند و در پایان Sintered می‌شدند. در مقایسه با سنسورهای دمایی از نوع مقاومتی که براساس هدایت الکتریکی مواد کار می‌کنند و دارای ضریب دمایی مثبت و کوچکی هستند، ترمیستورها دارای ضریب دمایی منفی هستند که مقدار آن هم زیاد است. همچنین برخلاف بعضی از هادیها مانند مس - پلاتینیوم و تنگستن که کاملاً خطی هستند ترمیستورها کاملاً غیرخطی هستند. مقاومت الکتریکی آنها برحسب دما دارای فرم کلی زیر می‌باشد.

$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (۹-۵)$$

که در آن :

R : مقدار مقاومت برحسب اهم در دمای T

R_0 : مقدار مقاومت برحسب اهم در T^3

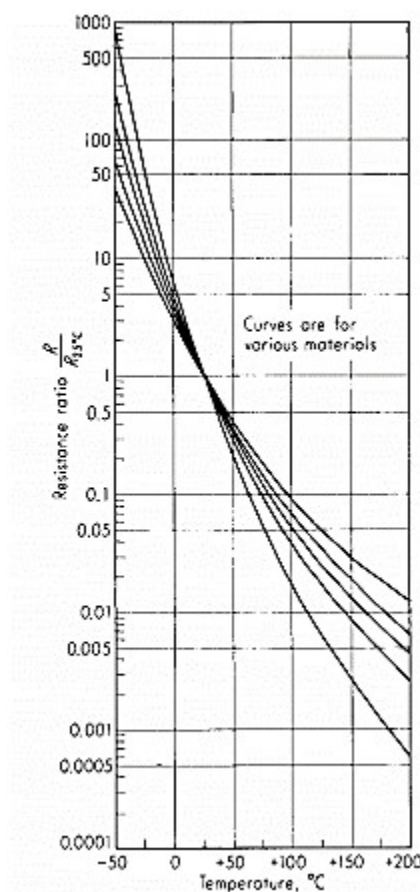
β : از خواص ماده : ثابت

e : عدد نپر

T_0 و T : دمای مطلق برحسب K

مقدار دمای T_0 معمولاً ۲۹۸ K انتخاب می‌شود و مقدار ثابت β هم در حدود ۴۰۰۰ می‌باشد. با محاسبه مقدار $\frac{dR/dT}{R}$ می‌بینیم که این مقدار با $-\beta/T^2$ مساوی است که این مقدار را ضریب دمایی مقاومت الکتریکی می‌نامیم. (Coefficient of resistance temperature). اگر مقدار $\beta=4000$ باشد مقدار ثابت دمایی مقاومت الکتریکی در دمای اتاق ($+25^\circ\text{C}$) برابر -0.0045 می‌باشد.

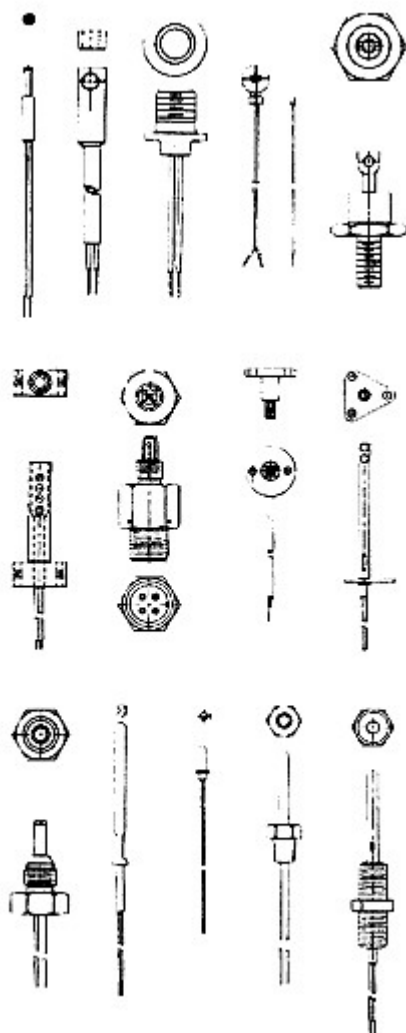
مقدار دقیق (دما/مقاومت الکتریکی) با جنس مواد و شکل اجزاء حس کننده تغییر می‌کند اما شکل (۹-۱۱) شکل کلی منحنی‌هایی که برای مواد مختلف صادق است را نشان می‌دهد.



شکل (۹-۱۱) منحنی‌های مقاومت بر حسب دمای ترمیستور

ترمیستورها در اشکال گوناگون مهره‌ای^(۱)، پهن^(۲)، میله‌ای^(۳) و دیسکی شکل موجودند. اما بیشتر حس کننده های دمایی را به صورت پره‌های آماده^(۴) می‌سازند. بعضی از انواع این پره‌ها در شکل (۹-۱۲) نشان داده شده است. مقدار مقاومت در دمای 25°C می‌تواند در محدوده وسیعی از ۵۰۰W تا چندین مگا اهم تغییر کند. همچنین

محدوده دمایی که می‌توان به وسیله ترمیستور اندازه گرفت -200°C تا $+1000^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. اما یک ترمیستور را نمی‌توان به تنهایی در تمام این محدوده دمایی بکار برد.



شکل (۹-۱۲) انواع ترمیستورها

هنگامی که یک ترمیستور را با سیستم داده کامپیوتری ترکیب می‌کنیم مقدار دمای مطلق (K) را می‌توان از فرمول زیر حساب کرد.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + (C \ln R)^3 \quad (9-6)$$

که R مقدار مقاومت برحسب اهم می‌باشد. مقادیر ثابت A, B, C را می‌توان با حل سه معادله بدست آمده در سه نقطه مجزا که R و T آن معلوم است بدست آورد. این سه نقطه را ترجیحا در پایین‌ترین محدوده دما، وسط و بالاترین حد آن اندازه می‌گیریم. نوعی دیگر از حس کننده‌های ترمیستور^(۱) شامل اجزاء مقاومتی از کریستالهای کربنی و سیلیکانی و ژرمانیوم می‌باشند.

مقاومتهای کربنی همان ترکیبات تجاری کربنی می‌باشند که معمولاً به عنوان اجزاء مقاومتی در رادیوها و در سایر مدارهای الکترونیکی بکار می‌روند. از مقاومتهای با نسبت توان $1W$ تا $0.1W$ با مقاومت الکتریکی 2 تا $150W$ (در دمای اتاق) به طور وسیعی برای اندازه‌گیری دماهای Cryogenic در محدوده $1K$ تا $20K$ استفاده می‌شود. از دمای حدود $20K$ به پایین با کاهش دما مقدار مقاومت الکتریکی به شدت افزایش می‌یابد که رابطه آن در زیر بیان شده است.

$$\log R + \frac{K}{\log R} = A + \frac{B}{T} \quad (9-7)$$

که T برحسب K می‌باشد و مقادیر A و B و K ثابت هستند که در درجه‌بندی بدست می‌آیند.

۹-۷ دماسنج‌های دیجیتالی^(۲)

در بیشتر کاربردها خاصیت غیرخطی ترموکوپلها و RTD ها را مجبور به استفاده از جدول درجه‌بندی (و یا منحنی و یا فرمول به دست آمده و منطبق بر منحنی‌ها) می‌کند تا بدین وسیله بتوانیم از روی مقدار ولتاژ و یا مقاومت اندازه گرفته شده دما را بدست آوریم. در مواردی که اندازه‌گیریهای زیادی را می‌خواهیم انجام دهیم این عمل (مراجعه به منحنی) علاوه بر گرفتن وقت زیاد می‌تواند احتمال اشتباه را هم بیشتر کند. همچنین در ترموکوپلها (TCS) دمای نقطه اتصال مرجع بایستی محاسبه شود. مشکلات ذکر شده در بالا از یک طرف و از طرف دیگر نیاز شدید به اندازه‌گیری دما در صنایع باعث شده که ولتمترهای دیجیتالی که دماسنج‌های دیجیتالی خوانده می‌شوند ساخته شده و به بازار بیایند.

۹-۸ روشهای اندازه‌گیری دما با استفاده از تشعشع^(۳)

در تمام روشهای اندازه‌گیری دما که تاکنون بیان شد لازم است که دماسنج در تماس فیزیکی با سطح جسم قرار گیرد. این بدان معنی است که دماسنج بایستی قابلیت تحمل آن دما را داشته باشد اما در مواردی که دمای سطح جسم خیلی بالا باشد این کار امکان‌پذیر نیست، زیرا باعث ذوب شدن دماسنج می‌شود.

در مورد اندازه‌گیری دمای اجسام متحرک نیز احتیاج است که از وسایل اندازه‌گیری بدون تماس استفاده شود. علاوه بر آن اگر بخواهیم تغییرات دما را بر روی سطح یک جسم بررسی کنیم احتیاج است که از وسایل اندازه‌گیری بدون تماس استفاده کنیم.

حس‌کننده‌های تابشی براساس تابش الکترومغناطیسی که طول موجهای منطقه مرئی و پایین‌تر از آنرا شامل می‌شود کار می‌کنند. محدوده طیف منطقه مرئی بسیار نازک می‌باشد ($0/3$ تا $0/72\text{mm}$) و طول موجهای ماورای آن در محدوده $0/72$ تا 1000mm می‌افتند. بایستی توجه داشت که همه اجسام اعم از گازها، مایعات و جامدات بنا به دلایل مختلفی از خود تشعشع الکترومغناطیسی دارند. اما در حس‌کننده‌های دما نقطه با آن قسمتی از تشعشعات سروکار داریم که به دمای جسم بر می‌گردند. هر جسمی که در دمای بالاتر از صفر مطلق قرار دارد بسته به دمای خود از خود تابش می‌کند. جسم ایده‌آل از نظر تشعشع گرمایی، به جسم سیاه معروف است. جسم سیاه می‌تواند تمام انرژی ورودی به خود را جذب کند. این جسم برای یک دمای معین، ماکزیمم مقدار تشعشع از خود را دارا می‌باشد. مقدار تشعشع برای یک جسم سیاه را می‌توان از قانون پلانک بدست آورد.

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (8-9)$$

W_{λ} : مقدار تشعشع به ازای واحد طول موج در طول موج مشخص به ازای واحد سطح جسم

$$37.413 \left(W \cdot \frac{\mu m^*}{em^2} \right) : C_1$$

$$14.388 (\mu m \cdot K) : C_2$$

$$\lambda : \text{طول موج تابش (mm)}$$

$$T : \text{دما بر حسب درجه کلوین}$$

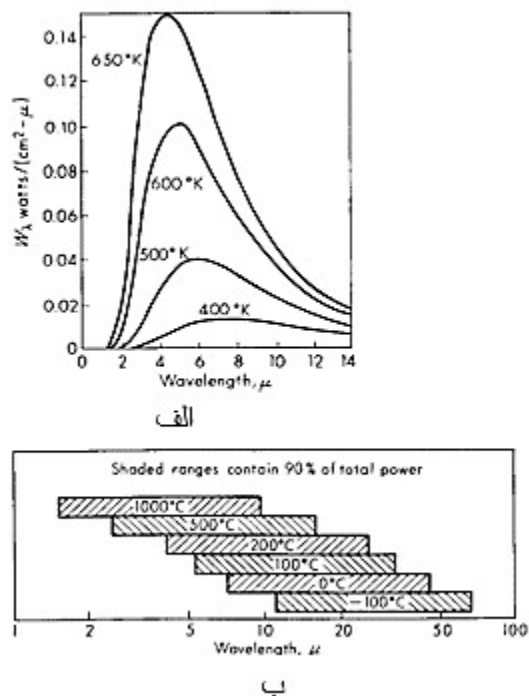
شکل (۹-۱۳ الف) منحنی بدست آمده از فرمول ۸-۹ را نشان می‌دهد در این شکل مقادیر بر حسب طول موج در دماهای مشخص رسم شده است. سطح زیر هر منحنی مقدار انرژی جذب شده توسط جسم را بیان می‌کند

که با افزایش دما این انرژی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دما نقاط ماکزیمم منحنی در طول موجهای کمتری اتفاق می‌افتد. این قوانین را می‌توان در فرمولهای زیر نوشت :

$$\lambda_p = \frac{2891}{T} (\mu m) \quad (9-9)$$

$$W_t = 5.67 \times 10^{-12} T^4 \left(\frac{W}{cm^2} \right) \quad (10-9)$$

همچنین شکل (۹-۱۳ ب) محدوده طول موجهایی را که در آن ۹۰٪ انرژی تابشی کل صورت می‌گیرد نشان می‌دهد. همان‌طور که از روی شکل هم مشاهده می‌کنید هرچه مواد سردتر می‌شوند طول موجهای بلندتری را از خود تابش می‌کنند. بنابراین در اندازه‌گیری دمای اجسام می‌توان دریافت طول موجهای بلندتر نشان دهنده دمای پایین‌تر جسم می‌باشند.



شکل (۹-۱۳) تشعشع جسم سیاه

گرچه تعریف جسم سیاه فقط از لحاظ ریاضی صورت می‌گیرد اما با ترکیب اجسام موجود هم می‌توان به رفتار جسم سیاه نزدیک شد و از این اجسام موجود در جهان خارج برای درجه‌بندی دماسنج‌های تابشی (تشعشعی)

استفاده کرد. شکل این اجسام معمولاً یک چاه مخروطی شکل سیاه با زاویه رأس 15° می باشد که دمای آن در مقدار معینی ثابت نگه داشته می شود. این دما با وسایل دقیقی از قبیل دماسنج مقاومتی پلاتینیوم دقیقاً اندازه گرفته می شود. دماسنج تشعشعی می تواند محدوده دمایی 500 K تا 1000 K را تولید کند (با فواصل 1 K).