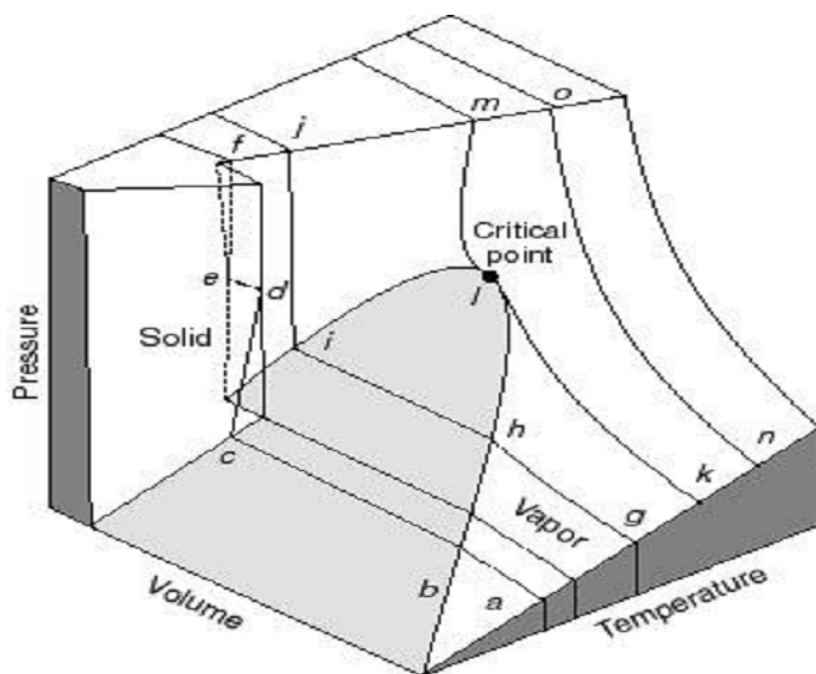


وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دانشکده فنی کشاورزی مراغه

ترمودینامیک



کردآوری و تنظیم: بهمن رحمتی نژاد

فهرست

نه	پیشگفتار نویسنده
۱	فصل اول. ترمودینامیک و مفاهیم اولیه
۱	اهداف
۱	مقدمه
۲	۱-۱ تعاریف واژه‌های متداول ترمودینامیکی
۳	۱-۱-۱ نظریه ماکروسکوپی در ترمودینامیک
۳	۲-۱-۱ سیستم ترمودینامیکی
۵	۳-۱-۱ سیستم مرز بسته
۵	۴-۱-۱ سیستم مرز باز
۵	۵-۱-۱ سیستم ایزوله (عایق حرارتی)
۵	۶-۱-۱ حالت ترمودینامیکی
۵	۷-۱-۱ تعادل ترمودینامیکی
۶	۸-۱-۱ فرآیند (تحول) ترمودینامیکی
۷	۹-۱-۱ سیکل در فرآیندهای ترمودینامیکی
۸	۱۰-۱-۱ خواص و حالت یک ماده
۸	۲-۱ دما و معیارهای دمایی در ترمودینامیک
۹	۱-۲-۱ تعادل دمایی
۹	۲-۲-۱ معیار سلسیوس ($^{\circ}\text{C}$)
۱۰	۳-۲-۱ معیار کلونین (K)
۱۰	۴-۲-۱ معیار فارنهایت (F)
۱۰	۵-۲-۱ تبدیل واحدهای دمایی
۱۲	۳-۱ آحاد جرم، طول، زمان، نیرو
۱۲	۱-۳-۱ انرژی
۱۳	۲-۳-۱ حجم مخصوص
۱۳	۳-۳-۱ فشار
۱۴	۴-۱ گرما
۱۶	۱-۴-۱ انتقال گرما

۱۷	۲-۴-۱ گرمای نهان (Latent heat)
۱۸	۳-۴-۱ گرمای نهان تبخیر (Latent heat of vaporization)
۲۰	۴-۴-۱ گرمای نهان ذوب
۲۱	۵-۴-۱ گرمای نهان ویژه میعان
۲۱	۵-۱ مسائل فصل اول
۲۳	۶-۱ پاسخ مسائل فصل اول
۲۵	فصل دوم. ماده خالص
۲۵	اهداف
۲۵	ماده خالص و ویژگی‌های آن
۲۶	۱-۲ فازها
۲۸	۲-۲ تعادل در فازها
۳۲	۳-۲ کیفیت بخار در ناحیه دوفازی
۳۳	۴-۲ حجم مخصوص در ناحیه دوفازی
۳۸	۵-۲ نقطه سه گانه
۴۰	۶-۲ تبدیل آلوتروپیک
۴۱	۷-۲ مسائل فصل دوم
۴۳	۸-۲ پاسخ مسائل فصل دوم
۴۵	فصل سوم. گازها و قوانین و معادلات مربوطه
۴۵	اهداف
۴۵	۱-۳ معادلات گاز ایده‌آل
۴۹	۲-۳ تفاوت گاز ایده‌آل و گاز حقیقی
۵۰	۳-۳ قانون دالتون
۵۱	۴-۳ قانون بویل - چارلز
۵۲	۵-۳ معادله حالت برای فاز بخار یک ماده تراکم‌پذیر
۵۲	۳-۶ شرایط متعارفی
۵۳	۷-۳ تراکم‌پذیری
۵۵	۳-۸ مسائل فصل سوم
۵۶	۳-۹ پاسخ مسائل فصل سوم
۵۷	فصل چهارم. کار و گرما و فرآیندهای مرتبط
۵۷	اهداف
۵۷	۱-۴ کار در فرآیندهای ترمودینامیکی
۶۲	۲-۴ فرآیندهای خاص ترمودینامیکی
۶۷	۳-۴ انرژی گرمایی
۶۸	۴-۴ روش‌های انتقال گرما
۶۸	۱-۴-۴ انتقال حرارت هدایتی (Conduction)
۷۱	۲-۴-۴ انتقال حرارت جابه‌جایی (Convection)
۷۲	۳-۴-۴ تشعشع یا تابش (Radation)
۷۴	۵-۴ مقایسه گرما (Q) و کار (W)
۷۵	۶-۴ محاسبه کار در فشار و حجم متغیر

۷۶	۷-۴ مسائل فصل چهارم
۷۷	۷-۴ پاسخ مسائل فصل چهارم

۷۹ فصل پنجم. قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص

۷۹	اهداف
۷۹	مقدمه
۸۱	۱-۵ قانون اول ترمودینامیک برای سیستم بسته
۸۲	۲-۵ کار و حرارت در سیستم جرم کنترل
۸۸	۳-۵ قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص
۸۸	۱-۳-۵ کار در فرآیند هم حجم (Iso- volume)
۸۹	۲-۳-۵ قانون اول و فرآیند هم دما (Isotherm)
۹۱	۳-۳-۵ قانون اول و فرآیند هم فشار (Iso-bar)
۹۳	۴-۳-۵ قانون اول و فرآیند بی دررو (Adiabatic)
۹۴	۵-۳-۵ قانون اول و فرآیند پلی تروپیک
۹۶	۴-۵ آنتالپی سیستم و مفهوم آن
۱۰۰	۵-۵ گرمای نهان
۱۰۲	۶-۵ ظرفیت گرمایی ویژه
۱۰۵	چند نکته از ظرفیت گرمایی ویژه
۱۰۶	۷-۵ ضریب اتمسیتی
۱۰۸	۸-۵ قانون اول به صورت معادله آهنگی
۱۰۹	۹-۵ مسائل فصل پنجم
۱۱۱	۱۰-۵ پاسخ مسائل فصل پنجم

۱۱۳ فصل ششم. فرآیند خاص حجم کنترل

۱۱۳	اهداف
۱۱۳	۱-۶ قانون اول ترمودینامیک در حجم کنترل
۱۱۷	۲-۶ حالات در فرآیند حجم کنترل
۱۱۷	۱-۲-۶ فرآیند حالت پایدار- جریان پایدار - SSSF
۱۲۳	۲-۲-۶ فرآیند حالت یکنواخت - جریان یکنواخت (USUF)
۱۲۴	۳-۶ تبادل گرما و قانون اول ترمودینامیک
۱۲۷	۴-۶ مسائل فصل ششم
۱۲۸	۵-۶ پاسخ مسائل فصل ششم

۱۲۹ فصل هفتم. قانون دوم ترمودینامیک

۱۲۹	اهداف
۱۳۰	۱-۷ بیان کلونین - پلانک
۱۳۲	۲-۷ بیان کلاسیوس
۱۳۴	۳-۷ فرآیند برگشت پذیر
۱۳۵	۱-۳-۷ عوامل برگشت ناپذیری
۱۳۷	۴-۷ آنتروپی
۱۴۱	۱-۴-۷ تغییر آنتروپی در فرآیندهای بازگشت پذیر
۱۴۲	۲-۴-۷ فرآیند بازگشت پذیر و ارتباط آنتالپی، آنتروپی و انرژی داخلی

۱۴۳	۳-۷-۷ تغییر آنتروپی در جامدات و مایعات
۱۴۴	۴-۴-۷ آنتروپی در فرآیند پلی تروپیک
۱۴۴	۵-۴-۷ تغییر آنتروپی در فرآیند بازگشت ناپذیر
۱۴۵	۶-۴-۷ تغییر آنتروپی سیستم و محیط
۱۴۶	۵-۷ مسائل فصل هفتم
۱۴۷	۶-۷ مسائل فصل هفتم
۱۴۹	فصل هشتم. سیکل ها
۱۴۹	اهداف
۱۴۹	مقدمه
۱۵۰	۱-۸ سیکل موتور حرارتی
۱۵۹	۱-۱-۸ سیکل کارنو
۱۶۱	۴-۱-۸ سیکل اتو
۱۶۳	۵-۱-۸ سیکل دیزل
۱۶۵	۲-۸ سیکل تبرید تراکمی
۱۶۹	۳-۸ مسائل فصل هشتم
۱۷۰	۴-۸ پاسخ مسائل فصل هشتم
۱۷۳	فصل نهم. محلول ها و مخلوط ها در ترمودینامیک
۱۷۳	اهداف
۱۷۳	مقدمه
۱۷۳	۱-۹ مخلوط گازهای ایده آل
۱۷۴	۱-۱-۹ جزء مولی
۱۷۴	۲-۱-۹ جزء جرمی
۱۷۵	۳-۱-۹ انرژی داخلی مخلوط
۱۷۵	۴-۱-۹ آنتالپی مخلوط
۱۷۵	۵-۱-۹ آنتروپی مخلوط
۱۷۶	۶-۱-۹ ظرفیت های گرمایی مخلوط
۱۷۷	۲-۹ مدل های اختلاط
۱۷۷	۱-۲-۹ قانون دالتون
۱۷۸	۲-۲-۹ قانون آماگات
۱۷۹	۳-۹ قانون اول برای مخلوط گاز و بخار
۱۸۱	۴-۹ مسائل فصل نهم
۱۸۱	۵-۹ مسائل فصل نهم
۱۸۳	منابع
۱۸۵	جداول ترمودینامیکی

پیشگفتار نویسنده

یکی از پارامترهای مهم در علوم مهندسی آشنایی با اصول ترمودینامیک، درک مفاهیم اصلی و استفاده موثر از آن در موضوعاتی نظیر مکانیک سیالات و انتقال حرارت و همچنین دیگر کاربردهای مهندسی می باشد. تجهیزاتی نظیر تأسیسات نیروگاه‌های بخار، پیل‌های سوختی، یخچال‌ها و سیستم‌های تراکمی، سردکننده‌های ترموالکتریک، موتورهای راکت و تأسیسات جداسازی هوا نیاز به آگاهی ما از مفاهیم و قوانین ترمودینامیک دارد.

فصل اول

ترمودینامیک و مفاهیم اولیه

اهداف

در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:

۱. آشنایی با واژه‌های ترمودینامیکی
۲. آشنایی با معیارهای دمایی و معادلات تبدیل
۳. گرما و ویژگی‌های آن در مواد

مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در ترمودینامیک درک مفاهیم اصلی و کاربرد آن در موضوعاتی نظیر مکانیک سیالات، انتقال حرارت و ترمودینامیک آماری و همچنین استفاده مؤثر از ترمودینامیک در کاربردهای مهندسی می‌باشد. در این میان انتقال حرارت و تغییرات دما حائز اهمیت فراوان است. دمای یک سیستم ویژگی است که تعیین می‌کند آیا یک سیستم با سیستم‌های دیگر در تعادل گرمایی قرار دارد یا خیر. مفاهیم داغ و سرد برای انسان، مانند هر موجود زنده دیگر ذاتی است و دمای محیط مجاور را بلیون‌ها عصبی که به سطح پوسته می‌رسند، به مغز خبر می‌دهند. اما پاسخ فیزیولوژیکی به دما اغلب گمراه کننده است و کسی که چشمش بسته است نمی‌تواند بگوید که آیا دستش با اتوی بسیار داغ، سوخته یا به وسیله یک تکه یخ خشک شده است. همچنین گرما نوعی انرژی است که از اجسام گرم به اجسام سرد منتقل می‌شود. اهمیت آگاهی از گرما و معادلات مربوطه در زندگی روزمره ما کاملاً عجین شده است به طوری که در تولید برق و

نیروگاه‌ها، ماشین‌های سواری و موتور کشتی‌ها در سطح وسیع استفاده می‌شود. در جهت مطالعه بر روی این شاخص‌ها و افزایش راندمان در این وسایل، می‌بایست از اصول اولیه ترمودینامیک و سیستم‌های مربوطه آشنایی کامل داشته باشیم.

۱-۱ تعاریف واژه‌های متداول ترمودینامیکی

همان‌طور که می‌دانیم عامل حرکت جامعه انرژی است و این انرژی از طرق مختلف قابل تأمین است. انرژی عضلانی دسترس پذیرترین و ارزان‌ترین انرژی در طبیعت بوده و بشر در تلاش است همواره جانشینی مناسب برای این نیرو بیابد.

در تعریف ترمودینامیک بر اساس انرژی می‌توان چنین بیان نمود که ترمودینامیک یعنی مطالعه انرژی و تبدیل آن به انواع دیگر انرژی به واسطه بالا بودن هزینه تولید انرژی می‌باشد بنابراین در جهت تبدیل و بهینه کردن انرژی می‌بایست اثرات آن را به صورت ذیل بررسی نمود.

- بررسی روش‌های تبدیل و اثرات محیطی

- توجه به بازده استفاده از انرژی

- راه‌های مصرف

دو شکل انرژی در ترمودینامیک به صورت بنیادی عبارت از حرارت و کار می‌باشد. در یک تعریف کلی، ترمودینامیک با حرارت و کار و آن گروه از خواص مواد که مرتبط با کار و حرارت است سرو کار دارد. وابستگی به نیازهای اجتماعی (افزایش نیاز به انرژی برای تولید) از ضروریات توجه به علم ترمودینامیک می‌باشد. در یک نگاه کلی، انواع انرژی عبارتند از:

۱. حرارتی

۲. مکانیکی

۳. الکتریکی

۴. مغناطیسی

۵. شیمیایی

۶. هسته‌ای

۷. کوانتوم

۳ ترمودینامیک و مفاهیم اولیه

با توجه به موارد بیان شده ترمودینامیک را می‌توان علم انرژی و تبدیل انرژی نامید به عبارتی دیگر علمی است که با حرارت و کار و آن گروه از خواص مواد که مرتبط با کار و حرارت هستند سر و کار دارد.

همانند تمام علوم، علم ترمودینامیک بر پایه مشاهدات تجربی بنا شده است و تمام یافته‌های تجربی در غالب قوانین بنیادی به صورت روابط ریاضی مشخص در آمده اند و این روابط شناخته شده موسوم به قوانین صفرم، اول، دوم، و سوم ترمودینامیک جهت تعیین محدودیت برای مقدار انرژی دسترس پذیر برای کار مفید و استفاده در آنالیزهای مهندسی می‌باشد.

۱-۱-۱ نظریه ماکروسکوپیک در ترمودینامیک

بر اساس دیدگاه ماکروسکوپیک حالت‌های خاص از یک ماده در یک فاز معین که دارای فشار (P)، درجه حرارت (T)، و چگالی (ρ) مشخصی باشد را حالت‌های مختلف یک ماده گویند. چگونگی رسیدن به آن نقطه مهم نیست، بلکه خود آن نقطه و مشخصات آن مهم است. و این حالت مستقل از مسیر می‌باشد.

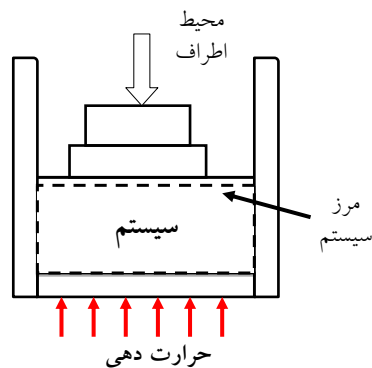
برای تشریح رفتار کامل در یک سیستم از دیدگاه ماکروسکوپیک ما با جزئیات درونی یک ماده کاری نداریم و دیدگاه و بررسی ما مستقل از فرضیات ما در مورد ماهیت مواد است. از دید ماکروسکوپیک ما همواره با حجم‌هایی سرو کار داریم که در مقایسه با ابعاد مولکولی بسیار بزرگ هستند.

پایه‌های علم ترمودینامیک بر اساس مشاهدات تجربی بنا شده است و یافته‌ها در این مشاهدات تجربی به صورت قوانین بنیادی قابل استناد از قبیل قوانین اول، دوم، سوم ترمودینامیک به علاوه قانون صفرم که به صورت ساده و قابل ملموس تر تعریف شده، در آمده است.

۱-۱-۲ سیستم ترمودینامیکی

سیستم ترمودینامیکی عبارت است از محدوده‌ای از فضا که حاوی مقداری ماده و یا حتی تهی می‌باشد و به وسیله مرز از محیط اطرافش جدا گردد و تحولات ترمودینامیکی در داخل آن مرز بررسی می‌گردد. مرز سیستم همان مسیر جدایش سیستم با محیط

اطرافش می‌باشد [شکل (۱-۱)]. حدود مرز در یک سیستم ترمودینامیکی قابل تغییر است. بنابراین برای تحلیل و آنالیز بهتر یک سیستم ترمودینامیکی می‌بایست از پارامترهایی از قبیل مرز سیستم، سطح کنترل، و حجم کنترل شناخت دقیق و کافی داشته باشیم. یک سیستم ترمودینامیکی به‌عنوان وسیله یا ترکیبی از وسایل است که شامل مقدار ماده مورد بررسی می‌باشد.



شکل ۱-۱. مثالی از یک مرز سیستم

در مجموع یک سیستم را در سه حالت می‌توان توصیف کرد:

- حجم کنترل که نمونه بارز آن کمپرسورها می‌باشند
- جریان جرم بسته که در مخازن با ورودی یک‌طرفه صدق می‌کند
- جریان انرژی که به‌صورت انتقال حرارت Q و کار W می‌باشد.

مرز یک سیستم به دو صورت است مرز متحرک و مرز ثابت. در سیستم مرز متحرک، با افزایش درجه حرارت و انتقال آن به گاز داخل مخزن، حجم گاز افزایش یافته و منجر به افزایش فشار داخل مخزن می‌شود. این افزایش فشار منجر به بالا رفتن پیستون می‌شود در نتیجه مرز سیستمی که جرم آن تحت کنترل است دائماً در حال تغییر است. کار و حرارت (Q, W) به‌عنوان جریان انرژی می‌تواند از مرز سیستم عبور کند ولی مقدار ماده درون سیستم ثابت باقی می‌ماند.

۳-۱-۱ سیستم مرز بسته

سیستمی که هیچ تبادل گرمی (m) با محیط اطراف ندارد و جرم ماده در این سیستم تحت کنترل می‌باشد. به عبارتی در این سیستم هیچ جرمی عبور نمی‌کند ولی امکان عبور انرژی هست. در سیستم بسته (جرم ثابت) قوانین اول و دوم برای جرم کنترل است و با این قوانین می‌توان حجم کنترل را نیز تحلیل نمود.

۴-۱-۱ سیستم مرز باز

سیستم مرز باز به سیستمی گویند که با محیط اطرافش تبادل جرم داشته باشد ولی حجم سیستم ثابت است. جرم از مجاری خاص وارد سیستم شده و از مجاری دیگر می‌تواند خارج شود. بنابراین به این سیستم حجم کنترل هم گویند.

۵-۱-۱ سیستم ایزوله (عایق حرارتی)

در این سیستم، تبادل انرژی از طریق انتقال حرارت غیرممکن است و ورود و خروج انرژی از طریق انتقال حرارت وجود ندارد. یک سیستم ایزوله حرارتی می‌تواند به صورت سیستم باز هم باشد. در سیستم عایق معمولاً مجموعه سیستم تحت تأثیر محیط نیست و به عبارتی کار و حرارت از مرز آن عبور نمی‌کند.

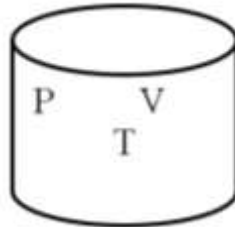
۶-۱-۱ حالت ترمودینامیکی

هر سیستم ترمودینامیکی دارای پارامترهای مشخصی مانند دما (T)، فشار (P)، و حجم (V) می‌باشد که برای همان ماده در همان وضعیت مشخص تعریف می‌شود. در یک حالت مشخص تمام خواص سیستم دارای مقداری ثابتند. چنین وضعیت مشخص برای یک ماده در داخل یک سیستم را حالت ترمودینامیکی آن سیستم گویند.

۷-۱-۱ تعادل ترمودینامیکی

اگر مقدار یک خاصیت سیستم تغییر کند، حالت جدید و متفاوتی ایجاد خواهد شد. وضعیت تثبیت شده یک حالت (T, P, V) را تعادل ترمودینامیکی آن گویند. ترمودینامیک با حالت تعادل سرکار دارد و در این حالت پتانسیل‌های نامتعادل در درون

سیستم وجود ندارد. سیستمی که در حالت تعادل است چنانچه از محیط خود منزوی (ایزوله) و جدا شده باشد، هیچ تغییری نخواهد کرد.



شکل ۱-۲. حالت ترمودینامیکی در یک سیستم

۱-۱-۸ فرآیند (تحول) ترمودینامیکی

معمولاً با تغییر اندکی در هر یک از پارامترهای فشار، دما، و حجم مابقی حالات نیز تغییر می‌کنند. اگر حالت ترمودینامیکی یک سیستم تغییر کند، تحول در آن سیستم صورت می‌گیرد که به آن تحول ترمودینامیکی گویند. به عبارتی دیگر هر گونه تغییری که یک سیستم را از حالت تعادل به حالت دیگر انتقال دهد را فرآیند نامیده می‌شود. این تحول ترمودینامیکی می‌تواند با حفظ تعادل سیستم باشد که در این حالت مسیر تحول مشخص است. تحول هر سیستم در تعادل انجام نمی‌شود. همیشه شرط انجام یک فرآیند عدم وجود تعادل در سیستم می‌باشد. مخزن گازی را در نظر بگیریم که فشار داخل آن با قرارگیری وزنه بر روی آن در حد مشخصی ثابت باقی مانده است. اگر وزنه را از روی این مخزن گاز برداریم فشار سیستم کاهش یافته و در نتیجه آن وزنه بسمت بالا حرکت نموده و حجم سیستم افزایش می‌یابد. وقتی یک یا چند خاصیت سیستم تغییر کند، تغییر حالت رخ می‌دهد که به آن فرآیند گویند. به عبارتی دیگر، مسیری از حالات متوالی که سیستم از آن می‌گذرد را فرآیند گویند مثل برداشتن وزنه که سبب ایجاد عدم تعادل مکانیکی در سیستم شده و منجر به بالا رفتن پیستون می‌شود این حالت تا ایجاد تعادل مکانیکی در سیستم ادامه پیدا می‌کند.

فرآیند ایده‌آل (شبه تعادلی) به فرآیندی که انحراف از حالت تعادل ترمودینامیکی در آن بسیار کوچک (بی نهایت کوچک) است. و این حالت‌ها را می‌توان تعادلی فرض

کرد. فرایندها را می‌توان به صورت هم دما، هم فشار، و هم حجم تعریف نمود در طی هر فرآیند یک خاصیت ماده در طی فرآیند ثابت می‌ماند. در فرآیند هم دما، دمای سیستم ثابت است و در فرآیند هم حجم، فرآیند در یک حجم مشخص و ثابت انجام می‌گیرد.

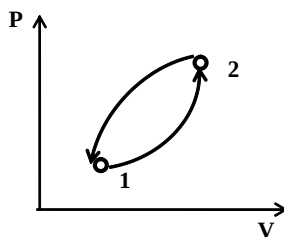
در یک فرآیند ترمودینامیکی دو مورد باید مورد توجه قرار گیرد.

- تشخیص نقطه شروع و انتهای فرآیند در دیاگرام مناسب

- تشخیص مسیر فرآیند در دیاگرام مناسب.

۹-۱-۱ سیکل در فرایندهای ترمودینامیکی

معمولاً دو سیکل در فرایندهای ترمودینامیکی تعریف می‌شود که عبارتند از سیکل ترمودینامیکی و سیکل مکانیکی.



شکل ۱-۳. مسیر یک سیکل ترمودینامیکی

سیکل ترمودینامیکی به حالتی که بعد از طی فرآیند کامل به حالت اولیه برگردد و تمام خواص آغازین ماده را داشته باشد. در یک سیکل نیروگاه، آب تبدیل به بخار شده و با گردش در سیکل و تولید قدرت دوباره به صورت آب یعنی همان ماده اولیه در می‌آید.

سیکل مکانیکی برعکس سیکل ترمودینامیکی است و فرآیند نهایی ماده با آغازین آن متفاوت است. در یک موتور چهار زمانه با چهار سیکل، که در هر دوران یک سیکل انجام می‌شود و در آن هوا و سوخت می‌سوزند و تبدیل به محصولات احتراق شده و به اتمسفر برمی‌گردد.

۱-۱-۱۰ خواص و حالت یک ماده

جرم معینی از یک ماده دارای اشکال مختلفی می‌باشد که به آن فاز گویند. فاز معمولاً کمیتی همگن از یک ماده با فشار و درجه حرارت معین تعریف می‌شود. مثل آب که در یک جرم مشخص ممکن است به حالت‌های جامد، مایع و گاز وجود داشته باشد. اصولاً فازهای یک ماده با مرز از هم جدا می‌شوند.

مواد را در ترمودینامیک از نظر خواص به دو بخش تقسیم می‌کنند
خواص شدتی: به خواصی همانند فشار، درجه حرارت، و چگالی ماده که مستقل از جرم ماده باشد را شدتی گویند.

خواص مقداری: به خواصی مانند وزن، حجم کل ... که دارای رابطه مستقیم با جرم داشته باشد را خواص مقداری گویند به عبارتی اگر ما مقداری از یک ماده را نصف کنیم خواص مقداری آن ماده نصف حالت اولیه می‌شود ولی هر بخش دارای خواص شدتی است که برابر با خواص شدتی ماده اولیه قبل از نصف کردن است.

۱-۲ دما و معیارهای دمایی در ترمودینامیک

همان‌طور که می‌دانیم حس لامسه وسیله خوبی برای تشخیص گرمی و سردی اجسام نیست و از طرفی حس لامسه در بعضی مناطق قابل استفاده نیست و همچنین در بعضی مناطق حساسیت کافی را ندارد. دما از احساس سردی و گرمی سرچشمه می‌گیرد بدین معنی که وقتی اشیاء مختلف را احساس می‌کنیم که به گرمی و سردی تعبیر می‌شود و به اصطلاح می‌گوییم دمای جسمی بالاتر از دمای جسم دیگر است یا دمای یک جسم با دمای جسم دیگر مساوی است. این یک تعریف مقدماتی از دما می‌باشد. در تعریف اولیه از دما می‌توان آن را به عنوان شاخصی از انرژی مولکول‌های یک ماده قلمداد نمود. هرچه دمای جسمی بالاتر باشد، ذرات جسم دارای انرژی، ارتعاش و جنبش بیشتری هستند. اگر دمای جسمی طی فرآیندی تغییر نکند این می‌تواند بدین معنی باشد که میزان خالص انرژی دریافتی توسط جسم صفر است.

$$T = \text{cte} \rightarrow Q = 0$$

این حالت را می‌توان بر اساس قوانین ترمودینامیک که در فصول بعد اشاره

خواهد شد بحث کرد. برای تعریف دقیق و فیزیکی دما باید توجه داشت که هیچگاه با یک ذره تنها و منفرد سروکار نداریم بلکه موضوع دما با موضوع تعادل دمایی کاملاً مرتبط می‌باشد.

۱-۲-۱ تعادل دمایی

وقتی دو جسم گرم و سرد در مجاورت همدیگر قرار می‌گیرد، جسم گرم سردتر و جسم سرد گرم‌تر می‌شود. بررسی دقیق‌تر نشان داد که وقتی جسمی گرم می‌شود در آن انبساط رخ می‌دهد و در حالت سرد شدن منقبض می‌شود. درحالی‌که دو جسم با هم تماس دمایی دارند پس از مدتی تغییرات حجم در این دو وضعیت جسمی متوقف می‌شود به عبارتی اگر تغییری در دو جسم در تماس حرارتی مشاهده نشود. در این صورت می‌توان گفت که آن دو جسم حرارتی مساوی دارند و یا تعادل دمایی به وجود آمده است.

تجربه نشان می‌دهد که اگر دو جسم با جسم سومی در حال تعادل دمایی باشد. آن دو جسم در حال تعادل دمای با هم هستند. این قانون اساس اندازه‌گیری درجه حرارت است و به قانون صفرم ترمودینامیک معروف گردید و به شکل زیر بیان گردید.

وقتی دو جسم مدت زیادی با هم در تماس باشد بین آن‌ها تعادل دمایی ایجاد می‌شود و در این حالت جسم A را به دماسنج نزدیک می‌کنیم و همچنین جسم B را نیز به دماسنج نزدیک می‌کنیم هر دو یک دما را نشان دهد دو جسم A و B با هم در تعادل دمایی هستند.

در مسائل مختلف ترمودینامیک از معیارها و شاخص‌های مختلف دمایی استفاده می‌کنیم که مهم‌ترین این شاخص‌ها که جنبه کاربری بیشتری دارند عبارتند از شاخص سلسیوس، کلوین، و فارنهایت می‌باشند.

۱-۲-۲ معیار سلسیوس ($^{\circ}\text{C}$)

در این معیار جهت تعیین دو مبناء ابتدایی و انتهایی مشخص ما از نقطه ذوب یخ در فشار اتمسفر صفر، و نقطه جوش آب را در ۱۰۰ درجه لحاظ می‌کنیم و این فاصله

ابتدایی و انتهایی را به نسبت مساوی به یک صد قسمت تقسیم شده است. در این دما نقطه سه گانه آب $0/01$ درجه سلسیوس است.

۱-۲-۳ معیار کلوین (K)

در معیار کلوین نقطه پایه زیرین یا همان صفر، به نقطه‌ای اطلاق می‌شود که انرژی درونی ماده صفر باشد و ذرات هیچ جنبشی نداشته باشند به عبارتی انرژی درونی مولکول‌های یک گاز به پایتترین مقدار خود می‌رسد. صفر کلوین پایین ترین دمای ممکن با معنا است و کمتر از آن مفهوم خاص ندارد. برای کاربردی کردن این معیار در مسائل ترمودینامیکی، درجه حرارت پایه اولیه را همان نقطه ذوب یخ به حساب می‌آوریم که حدود $273/15$ درجه کلوین میباشد و نقطه فوقانی همان نقطه جوش آب است که حدود $273/15$ درجه کلوین می‌باشد و همانند درجه سلسیوس به یک‌صد قسمت مساوی تقسیم شده است. درجه حرارت‌های فوق در فشار 76 mm-Hg یا یک اتمسفر سنجش گردید.

۱-۲-۴ معیار فارنهایت (F)

در این معیار که در سیستم انگلیسی در فشار اتمسفر تعریف گردید، نقطه انجماد آب برابر است با 32 درجه و نقطه جوش آب 212 درجه می‌باشد و فاصله بین دو دما به‌طور مساوی به 180 قسمت شده است. درجه حرارت بدن در این معیار دمایی $98/6$ انتخاب گردید.

۱-۲-۵ تبدیل واحدهای دمایی

برای تحلیل بهتر و دست‌یابی به روش مناسب‌تر برای حل مسائل ترمودینامیک نیاز است که معیارهای دمایی شرح داده شده را به یکدیگر تبدیل نمود. بنابراین بر اساس نقطه‌ای مشخص برای هر معیار و اختلاف میان دو نقطه این تبدیل انجام می‌شود. فرمول کلی برای این تبدیل واحدها عبارتست از:

$$\frac{x - x_1}{\Delta x} = \frac{y - y_1}{\Delta y} \quad (1-1)$$

x = معیار دمایی اول

x_1 = معیار دمایی اول در نقطه انجماد

Δx = تغییرات در معیار دمایی اول

y = معیار دمایی دوم

y_1 = معیار دمایی دوم در نقطه انجماد

Δy = تغییرات در معیار دمایی دوم y

اختلاف بین دو نقطه می تواند براساس اختلاف بین نقطه پایه اولیه (انجماد آب) و نقطه فوقانی (جوش آب) باشد که در معیار سلسیوس ۱۰۰، معیار کلونین نیز ۱۰۰، و در معیار فارنهایت ۱۸۰ می باشد.

بنابراین برای تبدیل کلونین به سلسیوس از فرمول (۲-۱) استفاده می شود.

$$\frac{K - 273.15}{373.15 - 273.15} \Rightarrow K = 273.15 + C \quad (2-1)$$

برای تبدیل سلسیوس به فارنهایت از فرمول (۳-۱) استفاده می شود.

$$\frac{C - 0}{100} = \frac{F - 32}{180} \Rightarrow F = 32 + 1.8C \quad (3-1)$$

برای تبدیل کلونین به فارنهایت از فرمول (۴-۱) استفاده می شود.

$$\frac{F - 32}{180} = \frac{K - 273.15}{100} \Rightarrow F = 1.8K - 459.67 \quad (4-1)$$

مثال (۱-۱): در دمای ۴۰- درجه، فارنهایت و سلسیوس یک دما را نشان می دهند.

$$F = 32 + 1.8C \quad F = C$$

$$C = \frac{-32}{0.8} = -40$$

مثال (۳-۱): در یک معیار دمایی محدوده ذوب یخ و جوش آب در فشار اتمسفر به ۱۵۰ قسمت تقسیم شده است اگر نقطه ذوب یخ در این معیار 20°C ، دمای 40°C در این معیار معادل چند درجه فارنهایت و سانتیگراد و کلین است.

$$x_o = 20^{\circ}\text{C}$$

$$x = 40^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta x = 150 \qquad \frac{x - x_o}{\Delta x} = \frac{y - y_o}{\Delta y}$$

$$\frac{40 - 20}{150} = \frac{F - 32}{180} \Rightarrow F = 56^{\circ}\text{F}$$

$$\frac{40 - 20}{150} = \frac{C - 32}{100} \Rightarrow C = 13,33 \rightarrow ^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{40 - 20}{150} = \frac{K - 273,15}{100} \Rightarrow K = 286,5^{\circ}\text{K}$$

۳-۱ آحاد جرم، طول، زمان، نیرو

۱-۳-۱ انرژی

انرژی از مهم ترین مفاهیم در ترمودینامیک است. به عبارتی انرژی همان قابلیت ایجاد یک اثر می باشد. انرژی قابل ذخیره در یک سیستم است و یا قابلیت انتقال از یک سیستم به سیستم دیگر را دارد.

سه شکل انرژی از نظر مولکولی عبارتند از:

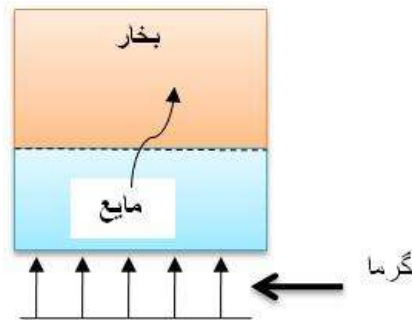
الف) انرژی پتانسیل بین مولکولی: این انرژی همراه با نیروی بین مولکولی است که به موقعیت مولکول ها نسبت به یکدیگر در هر لحظه وابسته است. با افزایش فاصله بین مولکول ها مقدار انرژی پتانسیل به سمت صفر میل می کند.

ب) انرژی جنبشی مولکولی:

ج) انرژی بین مولکولی: این انرژی ناشی از ساختمان مولکولی و اتمی و نیروهای مرتبط است. تعیین این انرژی کمی سخت می باشد.

جهت درک بیشتر از انرژی بین مولکولی می توان به انتقال حرارت به آب را

به عنوان مثال ذکر نمود. در این حالت حرارت به آب منتقل می شود و به واسطه این افزایش درجه حرارت، مایع به بخار تبدیل می شود.



شکل ۱-۳. انرژی بین مولکولی در انتقال حرارت به آب

موقعی که تمام آب به بخار تبدیل شد دو دیدگاه مطرح می باشد. یکی دیدگاه ماکروسکوپی است که در اثر انتقال انرژی حرارتی خواص آب از قبیل فشار درجه حرارت و انرژی کل سیستم تغییر می کند و دیگری دیدگاه میکروسکوپی است. در این دیدگاه نحوه ذخیره انرژی در مولکول های آب و نحوه رفتار آن بررسی می شود که این حالت همان بررسی انرژی بین مولکولی می باشد. انتقال انرژی به طور معمول به جرم و سرعت مولکول ها بستگی دارد (با معادلات مکانیک کوانتوم محاسبه می شود).

۲-۳-۱ حجم مخصوص

حجم یک ماده به ازای جرم می باشد و از نقطه ای به نقطه دیگر تغییر می کند. حجم مخصوص یک ماده در یک نقطه از سیستم عبارت است از:

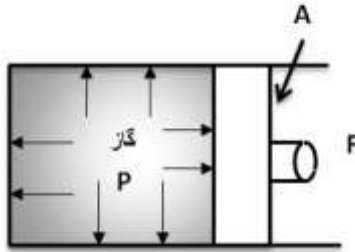
$$v = \frac{V}{m} \quad (۵-۱)$$

۳-۳-۱ فشار

نیروی وارده بر واحد سطح را در مایعات فشار و در جامدات تنش می نامیم. فشار عبارت از نیرویی معادل یک نیوتن وارد بر سطحی معادل یک متر مربع می باشد.

$$P = \frac{F}{A} \quad (۶-۱)$$

با گرم شدن گاز فشار افزایش می‌یابد که در نتیجه آن پیستون حرکت می‌کند و فشار به تعادل با نیرو می‌رسد. وسیله‌ای که برای سنجش اختلاف فشار، در اختلاف سطحی معادل L استفاده می‌شود، مانومتر نامیده می‌شود. فشار نسبی عبارت است از تفاضل فشار مطلق با فشار اتمسفر (اندازه‌گیری با مانومتر). اختلاف فشار اندازه‌گیری شده به علاوه فشار اتمسفر را فشار مطلق گویند



شکل ۴-۱. گرم شدن گاز و افزایش فشار در دیواره سیلندر

۴-۱ گرما

در زمان‌های قدیم، اعتقاد مردم بر این بود که گرما یک ماده یا جسمی نامرئی است که می‌تواند از ماده‌ی گرم خارج شود و به ماده سرد منتقل گردد. در سال ۱۷۹۸ یک دانشمند آمریکایی به نام «کنت رامفورد» ادعا کرد که حرارت جسم نیست بلکه پدیده‌ای است که از طبیعت حرکت ایجاد می‌شود و در آن سال عقیده قبلی که حرارت را جسم می‌دانست مردود اعلام گردید. رامفورد درست می‌گفت، اما نظریه واضح‌تری در مورد طبیعت حرارت ابراز نشد تا اینکه دانشمندان حالت اتمی بودن ماده را کشف کردند و به این نتیجه رسیدند که هر ماده از ذراتی به نام اتم تشکیل شده است. اکنون می‌دانیم که آنچه به نام حرارت یا گرما می‌شناسیم حرکت الکترون‌ها، اتم‌ها و ملکول‌هاست که هر یک از آن‌ها در جهات مختلف به حرکت درآمده و بهم برخورد می‌کنند. بدیهی است درجه حرارت نیز مشخص می‌سازد این ذرات با چه سرعتی به حرکت در آیند.

امروزه می‌دانیم که گرما ماده نیست بلکه یکی از صوت‌های انرژی است. همان‌طور که انرژی مکانیکی، الکتریکی و انرژی شیمیایی نیز صورت‌های دیگری از انرژی هستند و می‌توانند به هم تبدیل شوند. بنابراین گرما مقدار انرژی است که به دلیل اختلاف دما بین یک جسم و جسم دیگری که با آن در تماس است، مبادله می‌شود.

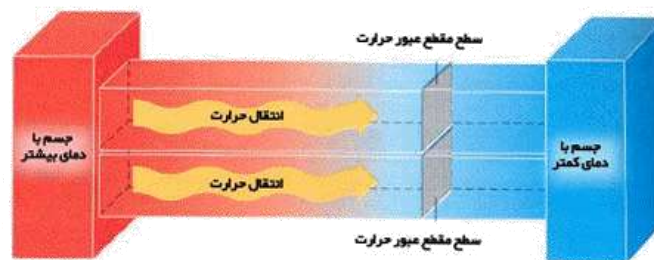
مثلاً اگر جسم داغی را در داخل یک ظرف آب بیاندازیم دمای آب بالا می‌رود ولی دمای جسم کاهش می‌یابد. در اینجا انرژی درونی آب افزایش یافته ولی انرژی درونی جسم کاهش پیدا کرده است. یعنی مقداری از انرژی جسم به آب منتقل شده است.

اگر به جای یک جسم با دمای بالا، جسمی با دمای پایین‌تر از دمای آب را به درون آن بیاندازیم، آیا تغییری در انرژی درونی آب و انرژی درونی جسم صورت می‌گیرد؟ انرژی از کدام یک به دیگری منتقل می‌شود؟

برای پاسخ به این سؤال می‌توان گفت که با انداختن جسم سردتر از آب به درون آن، دمای جسم بالا می‌رود و دمای آب کاهش پیدا می‌کند. در اینجا انرژی از آب به جسم منتقل می‌شود و به همان اندازه که از انرژی درونی آب کاسته می‌شود به انرژی درونی جسم اضافه می‌گردد.

دو پارامتر در مبحث دما بسیار مهم می‌باشد.

۱. در تماس دو جسم و انتقال گرمابین آن‌ها، تغییر انرژی جسم‌ها یکی است. یعنی همانقدر که جسم اول انرژی می‌دهد، جسم دوم به همان اندازه انرژی به دست می‌آورد. اما در این مورد تغییر دمای جسم‌ها لزوماً یکی نیست یعنی مثلاً اگر دمای جسم گرم در حین تماس 50°C کاهش یابد دمای جسم سرد ممکن است 10°C افزایش پیدا بکند.



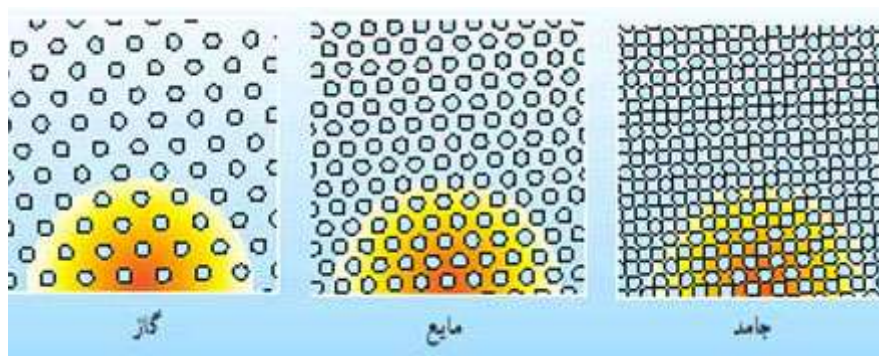
شکل ۱-۴. نحوه انتقال حرارت از جسم با دمای بالا به جسم با دمای پایین

۲. در انتقال گرما بین دو جسم اختلاف دما بین آن دو مهم است نه اختلاف بین انرژی‌های درونی آن‌ها. یعنی گرما می‌تواند از جسمی که دمای بیشتر اما انرژی درونی کمتری دارد به جسمی که دمای کمتر ولی انرژی درونی بیشتری دارد منتقل شود. مثلاً اگر یک میله داغ را وارد آب یک استخر بکنیم با آنکه انرژی درونی آب استخر به دلیل جرم زیاد آن خیلی بیشتر از انرژی درونی میله است، اما گرما از میله به آب استخر منتقل می‌شود.

اگر بین دو نقطه از یک جسم، اختلاف دمایی به وجود آید، گرمای درون جسم از بخش با دمای بالاتر به بخش با دمای پایین‌تر شارش می‌شود. این نوع شارش یا انتقال گرما را رسانش می‌گوییم. مثلاً اگر یک سر میله‌ای فلزی را بر روی شعله بگیریم، بزودی انرژی گرمایی از طریق مولکول‌های میله به انتهای دیگر آن نیز منتقل می‌شود و آنرا گرم می‌کند. رسانش گرما معمولاً در جامدات و به خصوص در فلزات صورت می‌گیرد.

۱-۴-۱ انتقال گرما

گرما به روش‌های مختلفی از یک جسم به جسم دیگر منتقل می‌شود. یکی از راه‌های انتقال گرما، رسانایی است. ذره‌های تشکیل دهنده‌ی هر ماده دائماً در حال جنبش و نوسان هستند و هر چه ماده بیشتر باشد سرعت نوسان مولکول‌های آن بیشتر است.



شکل ۱-۵. وضعیت رسانایی مواد

گرما به روش رسانایی در جامدات بهتر منتقل می‌شود زیرا فاصله ذره‌های جسم کمتر است. در جامد ذره‌ها به هم نزدیک‌ترند و گرما بهتر و زودتر منتقل می‌شود. در انتقال گرما به روش رسانایی، انرژی گرمایی از طریق جنبش مولکول‌های ماده و ضربه زدن هر مولکول به مولکول‌های مجاور خود، به تدریج به تمام ماده منتقل می‌شود. روشن است که هر چه فاصله‌های مولکول‌ها از هم کمتر باشد، یعنی مولکول‌ها به هم نزدیک‌تر باشند گرما با سرعت بیشتری در ماده منتقل می‌شود. به همین دلیل است که رسانایی گرمایی جامدات بیش از مایعات و مایعات بیش از گازها است. در بین مواد جامد، رسانایی گرمایی فلزات از دیگر مواد جامد چون شیشه، لاستیک و چوب بیشتر است. در بین فلزات نیز رسانایی گرمایی بعضی از فلزات از بعضی دیگر بیشتر است. یکی دیگر از راه‌های انتقال گرما همرفت یا جا به جایی است. در انتقال گرما به روش همرفت قسمتی از ماده که گرم شده است به طرف بالا حرکت می‌کند و قسمت‌های اطراف آن که هنوز گرم نشده اند جای آن را می‌گیرند. به این ترتیب انرژی گرمایی از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل شده و به تدریج تمام ماده گرم می‌شود.

۱-۴-۲ گرمای نهان (Latent heat)

گرمایی که ماده در هنگام تبدیل از حالتی به حالت دیگر از دست داده و یا جذب می‌کند، در سال ۱۷۵۰ میلادی توسط ژوزف بلک گرمای نهان نامیده شد. این کلمه از لفظ لاتین (Latere) به معنای پنهان کردن گرفته شده است. اکنون این لغت به آنتالپی

تبدیل نیز تعبیر شده است.

جدول ۱-۱. گرماهای نهان و تغییر فاز دمای شاردهای عمومی و گازها

ماده	نهان گرمای ذوب J/g	نقطه ذوب (°C)	نهان گرمای تبخیر J/g	نقطه جوش °C
الکل اتیلیک	۱۰۸	-۱۱۴	۸۵۵	۷۸/۳
امونیاک بخار	۳۳۹	-۷۵	۱۳۶۹	-۳۳/۳۴
کربن دی اکسید	۱۸۴	-۵۷	۵۷۴	-۷۸
هلیوم			۲۱	۲۶/۹۳
هیدروژن	۵۸	-۲۵۹	۴۵۵	-۲۵۳
سرب	۲۴/۵	۳۷۲/۳	۸۷۱	۱۷۵۰
نیتروژن	۲۵/۷	-۲۱۰	۲۰۰	-۱۹۶
اکسیژن	۱۳/۹	-۲۱۹	۲۱۳	-۱۸۳
تولون		-۹۳	۳۵۱	۱۱۰/۶
آب	۳۳۴	۰	۲۲۶۰	۱۰۰
آلومینیم	۳۲۱	۶۵۹	-	-
سرب	۲۵	۳۲۷	۸۷۱	-
پارافین	۲۲۰	۵۲/۴	-	-

گرمای جذب شده توسط یک جسم جامد در هنگام مایع شدن در نقطه ذوب را گرمای نهان ذوب و گرمای جذب شده توسط یک مایع برای تبدیل شدن به بخار در فشار یک اتمسفر و در نقطه جوش را گرمای نهان تبخیر می گویند. این تغییر زمانی که تغییر فاز جامد به مایع داریم گرماگیر و در جهت عکس گرماده می باشد. برای مثال در اتمسفر زمانی که یک مولکول آب از سطح آب بخار می شود انرژی توسط مولکول های آب به بسته هوایی با دمای کمتر منتقل می شود. این بسته هوایی آب بخار شده بیشتری نسبت به اطراف خود دارد. از آنجایی که باید بر نیروهای جاذب بین ذرات آب غلبه کنیم مرحله تبدیل یک بسته آبی به یک بسته بخاری نیازمند گرفتن انرژی است.

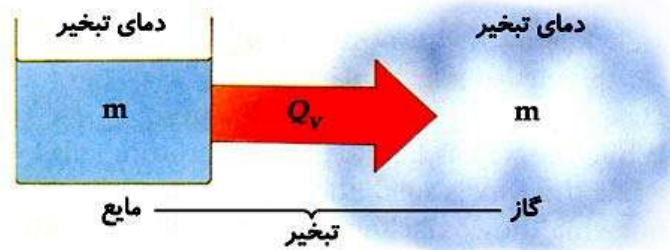
۳-۴-۱ گرمای نهان تبخیر (Latent heat of vaporization)

گرمایی که به مایع در نقطه جوش می دهیم تا بخار شود گرمای نهان تبخیر (Q_v) نام دارد لذا برای تبخیر یک گرم آب در دمای صفر درجه سانتیگراد ششصد کالری گرما و

در دمای صد درجه سانتیگراد پانصد و چهل کالری از گرما مورد نیاز است و چون دما عبارت است از «میانگین انرژی حرکت مولکولی یک جسم» زمانی که آب تبخیر می شود فقط ذراتی قادرند سطح آب را ترک کرده و به اتمسفر وارد شوند که دارای سرعت فوق میانگین انرژی یاد شده باشند. از این رو حرکت مولکولی کند شده و دمای سطح آب در حال تبخیر پایین می آید.

انرژی گرمایی اضافی که با ذرات تبخیر حمل می گردند به عنوان (گرمای نهان تبخیر) نامیده می شود. این گرما در زمان تراکم رطوبت، از طریق توده آب متراکم و یا تشکیل ابرها به اتمسفر پس داده می شود. اهمیت جذب گرمای نهان در فرآیند مهمی چون گرم شدن اتمسفر و نقش آن در بیلان گرمای اتمسفر روشن است. معمولاً بخار آب موجود در اتمسفر به عنوان رطوبت هوا نامیده می شود. حداکثر بخار آبی که هوا در دمای معینی می تواند دارا باشد به عنوان ظرفیت هوا نامیده می شود .

اگر بخار آبی فشرده شده و به شکل مایع یا جامد تبدیل گردد انرژی ای که قبلاً برای تبخیر شدن گرفته شده بود به صورت گرمایی محسوس آزاد می شود. انرژی زیاد آنتالپی انقباض بخار آب موجب می گردد که بخار آب از آب جوش در گرمادهی بهتر باشد.



شکل ۱-۶. گرمای نهان ویژه تبخیر

گرمای مورد نیاز برای تبخیر یک مایع به جرم و جنس جسم بستگی دارد و با انجام آزمایش دقیق مشاهده می کنیم که گرمای مورد نیاز Q_v برای تبخیر جسمی به جرم m رابطه مستقیم دارد یعنی برای تبدیل تناسب به تساوی به یک ضریب نیاز داریم که در اینجا به جنس جسم بستگی دارد و با L_v نشان داده می شود.

$$Q_V = m \cdot L_V \quad (V-1)$$

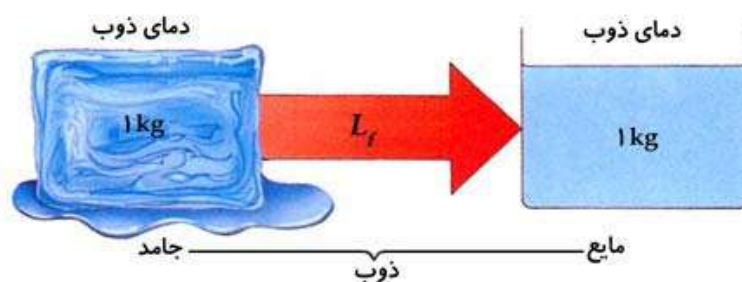
Q : مقدار انرژی دریافتی یا آزاد شده هنگام تغییر فاز (Jol)

m : جرم ماده مورد نظر (kg)

L : گرمای نهان ویژه یک ماده مشخص (kg/J)

۴-۴-۱ گرمای نهان ذوب

در تمام مدت ذوب یخ، دمای مخلوط آب و یخ ثابت می‌ماند. بنابراین گرمای داده شده به مخلوط کجا رفته است؟ این گرما صرف تغییر حالت یخ (از حالت جامد به مایع) می‌شود. یعنی در این حالت، گرچه جسم گرما می‌گیرد و انرژی درونی آن افزایش می‌یابد اما دمای آن تغییر نمی‌کند. به این انرژی گرمای نهان ذوب می‌گوئیم. گرمای نهان ذوب عبارت است از مقدار گرمایی که باید به ماده جامد در دمای نقطه‌ی ذوب آن بدهیم تا در همان دما از حالت جامد به مایع تبدیل شود. در جدول زیر گرمای نهان ذوب بعضی مواد برای جرم یک کیلوگرم آن‌ها آورده شده است.

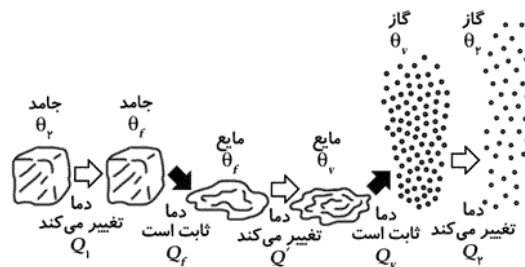
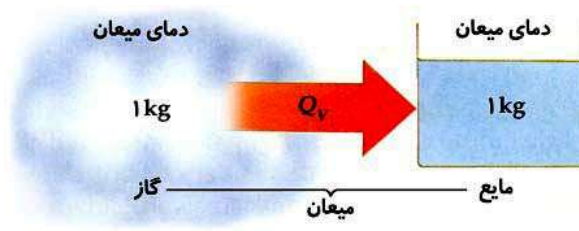


شکل ۷-۱. گرمای نهان ذوب آب

به عبارتی مقدار گرمایی که یک جسم جامد در نقطه ذوب خود می‌گیرد تا به مایع تبدیل شود، گرمای ذوب آن جسم نامیده می‌شود. این تبادل گرمای سبب تبدیل جامد به مایع می‌شود. از طرفی نقطه ذوب دمایی است که در آن جسم جامد شروع به ذوب می‌کند که به جنس و فشار وارد بر آن بستگی دارد.

۵-۴-۱ گرمای نهان ویژه میعان

مقدار گرمایی که باید از یک کیلوگرم از یک گاز در دمای میعان گرفته شود تا به مایع تبدیل شود گرمای نهان ویژه میعان (L_v) نام دارد.



شکل ۸-۱. دمای میعان

با دادن گرمای Q دمای جسم جامد افزایش می یابد تا به نقطه ذوب θ_f برسد. از این به بعد با دادن گرمای Q_f جسم جامد در دمای ثابت θ_f به مایع تبدیل می شود (به عبارتی ذوب می شود).

حال با دادن گرمای Q دمای مایع افزایش می یابد تا به نقطه جوش θ_v برسد. در اینجا با دادن گرمای Q_v ، مایع در دمای ثابت θ_v به گاز تبدیل می شود. اگر فرآیند گرما دادن ادامه یابد دمای گاز افزایش می یابد. به طور مثال با گرمای Q_2 به دمای θ_2 می رسد.

فصل دوم

ماده خالص

اهداف

- در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:
۱. آشنایی با فازهای ترمودینامیکی
 ۲. محاسبات مربوط به حجم مخصوص
 ۳. آشنایی با جداول ترمودینامیکی در فازها و محاسبات حجم مخصوص

ماده خالص و ویژگی‌های آن

ماده خالص به ماده ای همگن و دارای ویژگی‌های مشخص و ترکیبات شیمیایی ثابت اطلاق می‌شود که در تمام مدت ترکیبات شیمیایی آن ثابت باشد. به عنوان مثال آب در تمام فازهای خود (جامد، مایع، گاز) ماده ی خالص است. گاهی یک مخلوط گازی نظیر هوا را تا زمانی که تغییر فاز رخ نداده است، ماده ای خالص فرض می‌کنیم. یا دقیق‌تر بگوییم «یک مخلوط گازی تا زمانی که تغییر فاز روی نداده است، مشخصات یک ماده خالص را از خود نشان می‌دهد». در نهایت در ماده خالص، حالت ماده توسط دو خاصیت مستقل (حجم مخصوص، دما، فشار...) تعریف می‌شود. مثلاً اگر حجم مخصوص و درجه حرارت مشخص باشد، آنگاه حالت ماده که در فاز مایع، بخار یا بخار مافوق گرم قرار دارد، مشخص می‌شود.

۱-۲ فازها

وقتی به ماده‌ای مانند آب حرارت داده می‌شود افزایش درجه حرارت و همچنین زمان انتقال حرارت منجر به بالا رفتن دمای آن ماده می‌شود. انتقال حرارت و جذب آن توسط مایع تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که دیگر مایع قادر به جذب آن نباشد در این حالت سبب تغییر فاز می‌گردد که این تغییر همان نقطه ی اشباع یا نقطه تغییر فاز ماده (جوش مایع) می‌باشد. پارامترهایی در محدوده اشباع قابل تعریف است که عبارتند از:

دمای اشباع: در یک فشار مشخص به دمایی که در آن یک ماده خالص به جوش می‌آید را دمای اشباع گویند. فشار مشخص مورد نظر را فشار اشباع برای آن درجه حرارت گویند. برای آب در $99/6^{\circ}\text{C}$ فشار اشباع 100 kPa است. معمولاً رابطه معینی بین فشار اشباع و درجه حرارت اشباع وجود دارد یعنی $T_{\text{sat}}=f(P_{\text{sat}})$ است و در شکل (۱-۲) به صورت منحنی فشار-درجه حرارت نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. منحنی فشار بخار آب

تغییر ارتفاع تأثیر مستقیم بر فشار اتمسفر و دمای جوش مواد دارد. ماده‌ای که تحت فشار بیشتر قرار دارد، در دمای بالاتر به جوش می‌آید. نتیجه تحقیقات نشان می‌دهد که برای هر 1000 متر افزایش در ارتفاع، دمای جوش تا حدود 3°C درجه سلسیوس افت می‌یابد.

مایع اشباع: اگر ماده‌ای در دما و فشار اشباع به صورت مایع باشد ولی آمادگی برای تبخیر را داشته باشد مایع فوق را مایع اشباع و درجه حرارت آن نقطه مشخص را درجه حرارت مایع اشباع می‌نامیم. در درجه حرارت کمتر از درجه حرارت اشباع، مایع

تمایلی به تبخیر شدن از خود نشان نمی‌دهد که به آن مایع مادون سرد یا مایع متراکم (Subcooled liquid) گویند.

بخار اشباع: اگر تمام ماده در درجه حرارت اشباع تبدیل به بخار شود آن را بخار اشباع گویند.

مایع مخلوط اشباع: اگر در درجه حرارت اشباع، قسمتی از مایع بخار و قسمتی دیگر هنوز مایع باقی ماند را مایع مخلوط اشباع گویند و باید بر اساس کیفیت بیان نمود. کیفیت به صورت نسبت جرم بخار به جرم کل مخلوط تعریف می‌گردد و به عنوان یک خاصیت شدتی با نماد x مشخص می‌شود. کیفیت زمانی مفهوم پیدا می‌کند که ماده در درجه حرارت و فشار اشباع قرار داشته باشد. اگر جرم بخار 0.4 kg و جرم مایع 0.6 kg باشد کیفیت برابر با ۴۰ درصد می‌باشد.

اگر درجه حرارت بخار بالاتر از درجه حرارت اشباع باشد، بخار فوق را بخار مافوق گرم گوئیم. فشار و درجه حرارت (P و T) بخار مافوق گرم خواص مستقل هستند زیرا درجه حرارت را می‌توان افزایش داد درحالی‌که فشار ثابت می‌باشد. مواد گازی بخارات مافوق گرم هستند.

نقطه بحرانی: نقطه انحراف با شیب صفر است، و آن را نقطه بحرانی گویند. در نقطه بحرانی مایع اشباع در تعادل با بخار اشباع است و مقدار دما، فشار و حجم مخصوص در این نقطه مشخص است.

بالاتر از حالت بحرانی: موقعی که ماده از ناحیه دو فازی نگذرد و مستقیماً از مایع متراکم بالاتر از حرارت بحرانی برود.

در فشار بالاتر از فشار بحرانی ($P > P_C$) هرگز فاز مایع و فاز بخار یک ماده خالص که در تعادل باشند، وجود ندارد. عبارتی تعادل بین فاز مایع و بخار تقریباً غیرممکن است. مثلاً برای یخ، در درجه حرارت پایین‌تر از صفر درجه سلسیوس و در فشار اتمسفر، با افزایش درجه حرارت تا صفر درجه سلسیوس و در فشار ثابت هنوز جامد اشباع است.

با کاهش فشار و ثابت نگه داشتن درجه حرارت (-20 درجه سلسیوس)، یخ مستقیماً به بخار تبدیل می‌شود (حالت تصعید).

حجم همه مواد در طی ذوب شدن افزایش می‌یابد. برای آب در طی ذوب شدن،

حجم کاهش می‌یابد ($V_{\text{جامد}} < V_{\text{مایع}}$).

مثال (۲-۱): مقداری آب در دمای ۱۰ درجه و فشاری معادل ۲ برابر فشار بحرانی را در فشار ثابت حرارت می‌دهیم. طی این فرایند.....

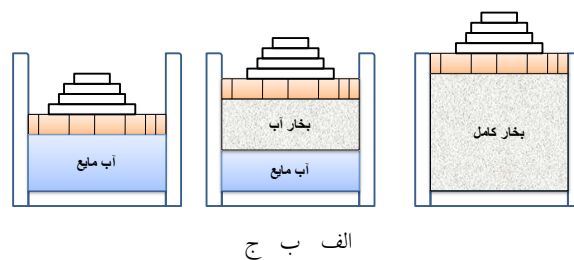
- الف) آب با بالا رفتن دما می‌جوشد
- ب) آب همواره در ناحیه مایع متراکم می‌ماند
- ج) آب بدون جوشیدن به یکباره تبخیر می‌شود
- د) همه موارد احتمال دارد رخ دهد

جواب:

چون فشار بیشتر از حالت بحرانی است آب بدون جوشیدن تبخیر می‌شود

۲-۲ تعادل در فازها

سیستمی متشکل از یک کیلوگرم آب خالص را در داخل سیلندر پیستون در نظر بگیریم (شکل ۲-۲). فرض وزنه‌ها فشاری معادل ۱۰۰ kPa بر سیلندر اعمال می‌کند. اگر درجه حرارت اولیه آن را 25°C فرض کنیم. وقتی که آب گرم می‌شود در اثر انتقال حرارت درجه حرارت آب افزایش می‌یابد. در اثر افزایش درجه حرارت، حجم مخصوص افزایش پیدا می‌کند. در این حالت فشار سیستم توسط وزنه ثابت باقی می‌ماند. این روند تا زمانی که درجه حرارت به 99.6°C برسد ادامه می‌یابد. در این درجه حرارت، انتقال حرارت بیشتر منجر به تغییر فاز مایع خواهد شد. این تغییر فاز همان تبدیل مایع به بخار است (شکل ۲-ب).



شکل ۲-۲. مراحل تبدیل مایع به بخار و تغییرات فاز صورت گرفته

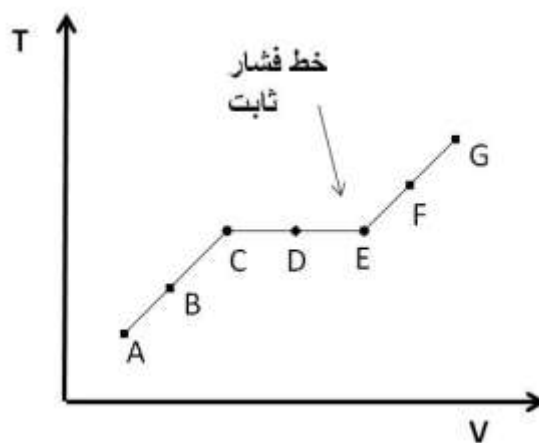
در این حالت فشار و دمای داخل سیستم همواره ثابت باقی می‌ماند و حرارت انتقال یافته صرف تغییر فاز مایع به بخار می‌شود. این روند تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که تمام آب تبدیل به بخار گردد. بعد از تبدیل تمام آب به بخار، حرارت انتقال یافته صرف افزایش درجه حرارت بخار شده و با افزایش انتقال حرارت وارد فاز بخار مافوق گرم می‌شود.

مراحل موجود در فعل و انفعالات حرارتی شکل (۲-۲) را می‌توان در نموداری که بیانگر تغییرات دما نسبت به حجم باشد، نشان داد. به عبارتی دیاگرام $T-V$ سیر تحول آب به‌عنوان یک ماده خالص را از حالت مایع تا بخار نشان می‌دهد (شکل ۲-۳).

مراحل A-C: مایع متراکم است و در فشار کاری سیستم هنوز به جوش نیامده است و فقط درجه حرارت مایع افزایش می‌یابد.

نقطه C: مایع اشباع نقطه‌ای که مایع شروع به جوشیدن می‌کند و تا زمانی که مایع بخار نشود، دمای سیستم ثابت است.

مراحل C-E: ناحیه‌ای که سیال در حال جوشیدن است را ناحیه اشباع دوفازی برای مخلوط اشباع گویند فشار و دمای سیستم ثابت بوده و فقط حجم افزایش می‌یابد.



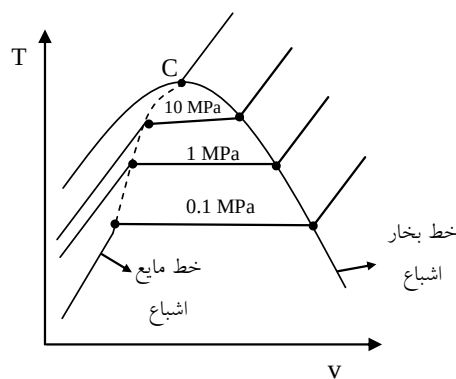
شکل ۲-۳. نمودار $T-V$ سیر تحول آب به‌عنوان یک ماده خالص از حالت مایع تا بخار

حرارت که به ماده خالص می‌رسد، صرف تغییر فاز آن از مایع به بخار می‌گردد و نه تغییر دمای آن. در این مرحله مایع و بخار در کنار هم هستند، هر لحظه از مایع کم و به بخار افزوده می‌شود. نقطه جوش سیال با بالا رفتن فشار افزایش می‌یابد. نقطه E: با رسیدن وضعیت سیستم به نقطه E، تمام ماده خالص بخار شده است. این نقطه را نقطه بخار اشباع می‌نامند.

مراحل E-G: گرمای داده شده به سیستم و ماده خالص صرف افزایش دمای آن در فاز بخار می‌شود. با افزایش دما، سیال به ناحیه بخار مافوق گرم می‌رود. مانند ناحیه متراکم، افزایش T و V را در فشار ثابت داریم لیکن فاز گازی است.

تمام مراحل فوق در فشار ثابت رخ می‌دهد. با افزایش و کاهش فشار مراحل فوق عیناً در بالا و یا پایین خط فشار ثابت فوق اتفاق می‌افتد. هر چه به سمت فشار بالاتر برویم مرحله دو فاز کوتا‌تر و در فشار پایین عکس این حالت اتفاق می‌افتد. در ناحیه دوفازی برای افزایش دما باید حتماً فشار تغییر کند ولی در دیگر نواحی مهم نیست. در شکل (۳-۲) کلیه فعل و انفعالات از نقطه A تا G در فشار ثابت رخ داد. اگر فشار افزایش یا کاهش داده شود، تغییرات دما و حجم بصورتی که در شکل (۴-۲) محاسبه شد، ترسیم گردید.

با به هم پیوستن نقاط مایع اشباع و بخار اشباع شکل مانند کوه ایجاد می‌شود. با افزایش فشار تغییرات حجم کمتر می‌شود



شکل ۴-۲. نمودار T-V در فشارهای مختلف

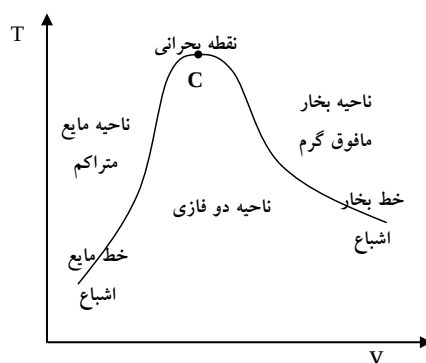
۳۱ ماده خالص

با بالا رفتن فشار، کم کم عرض ناحیه دوفازی به صفر نزدیک می‌شود. و این نقطه را نقطه بحرانی (C) گویند (شکل ۲-۴). در این نقطه، تغییر فاز از مایع به بخار مستقیماً اتفاق می‌افتد.

در حقیقت نقطه بحرانی یک نقطه عطف است و مماس بر منحنی در این نقطه با محور طولی موازی است. برای آب در فشار بالاتر از فشار بحرانی ($P_C = 22.09 \text{ MPa}$) مایع مستقیماً به فاز بخار می‌رود، و همواره یک فاز وجود خواهد داشت به عبارتی ناحیه دوفازی وجود ندارد و پدیده میعان اتفاق نمی‌افتد. سیال یکباره از فاز مایع به بخار می‌رود. بالای حالت بحرانی هیچ نقطه مرزی مشخصی که ناحیه متراکم را از منطقه بخار داغ جدا کند وجود ندارد. در دمای بالاتر از دمای بحرانی، حالت ماده به صورت بخار داغ و در دماهای زیر دمای بحرانی حالت ماده به صورت مایع متراکم بیان می‌گردد.

جدول ۱-۲. داده‌های نقطه بحرانی (حجم مخصوص v_C ، فشار P_C و دما T_C) برای چند ماده

ماده	$v_C \text{ (m}^3/\text{kg)}$	$P_C \text{ (MPa)}$	$T_C \text{ (}^\circ\text{C)}$
آب	۰.۰۳۱۵۵/۰	۰.۹/۲۲	۱۴/۳۷۴
دی‌اکسید کربن	۰.۰۲۱۴۳/۰	۳۹/۷	۰.۵/۳۱
اکسیژن	۰.۰۲۴۳۸/۰	۰.۸/۵	۳۵/-۱۱۸
هیدروژن	۰.۰۳۲۱۴۲/۰	۳/۱	۸۵/-۲۳۹



شکل ۲-۵. نمودار T-V سیر تحول آب به عنوان یک ماده خالص از حالت مایع تا بخار

همان‌طور که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است، خط مایع اشباع از پیوستن نقاط مایع اشباع به دست می‌آید و همچنین خط بخار اشباع از بهم پیوستن نقاط بخار اشباع به دست می‌آید. از طرفی خطوط فشار ثابت در دمای بالاتر مستقر می‌شوند. شیب خط فشار ثابت در ناحیه بخار مافوق گرم کمتر از ناحیه مایع متراکم است. با افزایش فشار تغییر حجم نیز کمتر است.

۳-۲ کیفیت بخار در ناحیه دوفازی

کیفیت بخار (X) شاخصی برای سنجش میزان بخار در یک مخلوط دو فازی می‌باشد، و خواص ترمودینامیکی در این ناحیه وابسته به داشتن این پارامتر است.

$$x = \frac{m_g}{m_t}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (۱-۲)$$

m_g = جرم بخار (kg)

m_t = جرم کل مخلوط (kg)

مثال (۲-۲): درون یک مخزنی به حجم 6 m^3 بخار آب با عیار 0.8 وجود دارد. چنانچه جرم بخار آب 5 کیلوگرم باشد، چند کیلو گرم بخار در این مخزن وجود دارد.

$$m_t = 5 \text{ kg}$$

$$x = \frac{m_g}{m_t} \Rightarrow 0.8 = \frac{m_g}{5} \quad m_g = 4 \text{ kg}$$

مثال (۳-۲): درون مخزنی 22 kg بخار آب با کیفیت 0.85 وجود دارد. درون این مخزن چند کیلوگرم آب و چند کیلوگرم بخار وجود دارد.

$$x = 0.85$$

$$x = \frac{m_g}{m_t} \Rightarrow 0.85 = \frac{m_g}{22} \quad m_g = 18.7 \text{ kg} \quad \text{جرم بخار}$$

جرم آب برابر است

$$m_f = m_t - m_g = 22 - 18.7 = 3.3 \text{ kg}$$

۲-۴ حجم مخصوص در ناحیه دوفازی

حجم مخصوص (v) عبارتست از حجم واحد جرم (V/m) که در نواحی مختلف، به واسطه مقدار مختلف حجم و جرم، متفاوت است. در ناحیه دوفازی، حجم کل برابر است با مجموع حجم بخار به علاوه حجم مایع و همچنین جرم کل هم برابر با مجموع جرم بخار و جرم مایع می باشد.

اگر خواص نقطه مایع اشباع را با (f) و خواص نقطه بخار اشباع را با (g) نمایش دهیم، حجم مخصوص مایع اشباع (v_f) و بخار اشباع (v_g) برابر است با:

$$v_f = \frac{V_f}{m_f} \quad (2-2)$$

$$v_g = \frac{V_g}{m_g} \quad (3-2)$$

حجم مخصوص کل برابر است با:

$$v = \frac{V_f + V_g}{m_t} \Rightarrow v_t = \frac{v_f(m_t - m_g) + m_g v_g}{m_t}$$

$$v_t = v_f(1 - x) + xv_g \Rightarrow v_t = v_f - xv_f + xv_g$$

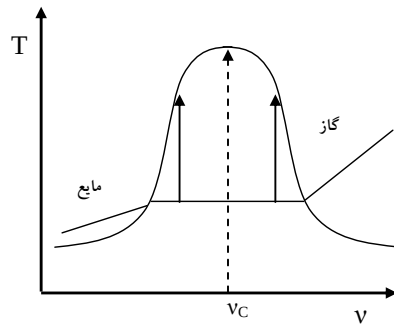
$$v_t = v_f + x(v_g - v_f)$$

از طرفی $v_{fg} = (v_g - v_f)$ در نتیجه حجم مخصوص کل برابر است با:

$$v_t = v_f + xv_{fg} \quad (4-2)$$

$$v_t = v_f(1 - x) + xv_g$$

مقدار v_f ، v_g و v_{fg} از جداول ترمودینامیکی (سری ب) قابل محاسبه است. یکی از نکات مهم در باره حجم مخصوص، بررسی تغییرات ماده در یک حجم مخصوص ثابت و معین (مانند ظرف صلب) می باشد (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲. تغییرات حجم مخصوص در طرفین حجم مخصوص بحرانی

۱. اگر حجم مخصوص ماده ای کمتر از حجم مخصوص بحرانی باشد ($v < v_c$)، با بالا رفتن دما، حجم مایع زیاد می شود. یا با بالا رفتن دما به خط مایع اشباع نزدیک تر می شود (در فرآیند حجم مخصوص ثابت)
۲. اگر حجم مخصوص بیشتر از حجم مخصوص بحرانی باشد ($v > v_c$)، با بالا رفتن دما، حجم گاز زیاد می شود.
۳. اگر حجم مخصوص برابر با حجم مخصوص بحرانی باشد ($v = v_c$)، در وضعیت بحرانی قرار می گیرد.

مثال (۴-۲): اگر کیفیت بخار در مخلوطی ۲ برابر شود، چه تغییری در حجم مخصوص آن به وجود می آید

$$v_t = v_f + x v_{fg}$$

$$v_1 = v_f + x_1 v_{fg}$$

$$v_2 = v_f + 2x_1 v_{fg}$$

$$v_2 = x_1 v_{fg} + v_1$$

ماده خالص ۳۵

در نتیجه حجم مخصوص ثانویه به اندازه پارامتر $X_1 V_{fg}$ بیشتر از حجم مخصوص اولیه است به عبارتی کمتر از دو برابر می شود

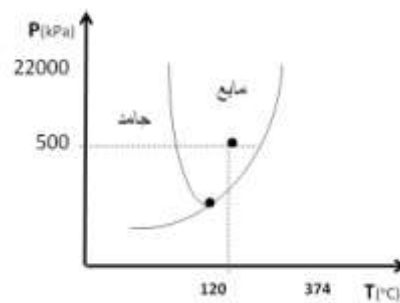
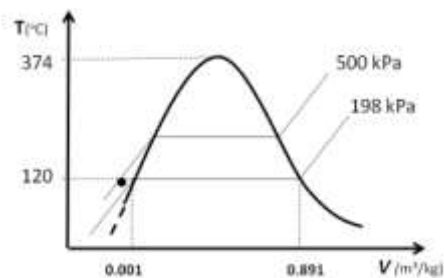
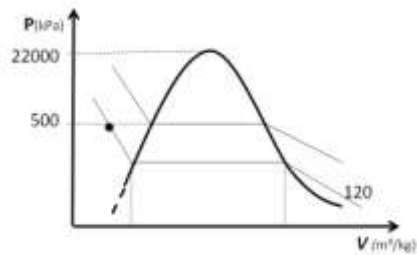
مثال (۲-۵): فاز هر یک از حالت های زیر را برای آب با استفاده از جداول پیوست ب بیابید و مکان آن را در نمودار $P-V$ ، $T-V$ و $P-T$ نشان دهید.

الف) ۱۲۰°C و ۵۰۰ kPa

از جداول ترمودینامیکی

$$T = 120^{\circ}\text{C} \rightarrow \begin{cases} P = 198.5 \text{ kPa} \\ V_f = 0.00106 \end{cases}$$

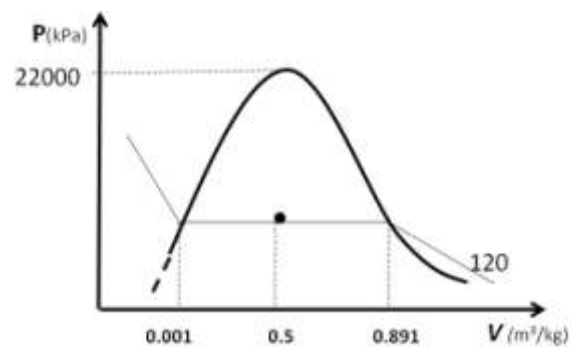
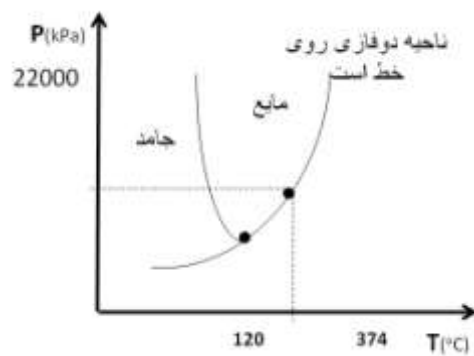
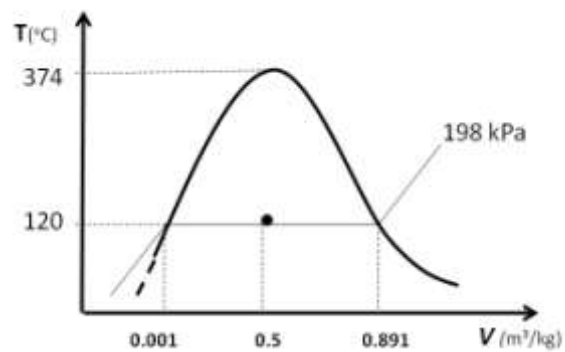
در ناحیه مایع متراکم قرار دارد که حجم مخصوص همان v_f است



ب) 120°C و $0.5 \text{ m}^3/\text{kg}$

با محاسبه حجم مخصوص در مایع اشباع و بخار اشباع در دمای 120°C درجه سلسیوس، و همچنین حجم مخصوص کل مسئله، میتوان نتیجه گرفت که نمونه ما در ناحیه دو فازی قرار دارد.

$$0.891 \text{ m}^3/\text{kg} > 0.5 \text{ m}^3/\text{kg} > 0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$$



ماده خالص ۳۷

$$v_t = v_f + Xv_{fg}$$

$$0.5 = 0.001 + X \times 0.891 \quad X = 0.6$$

مثال (۲-۶): فاز زیر را برای آمونیاک با استفاده از جدول ضمیمه و مکان آن‌ها را در نمودارهای P - V ، T - V نشان دهید.

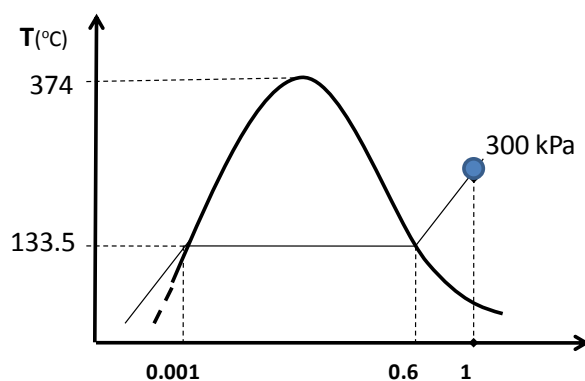
آمونیاک در 30°C و 1000 kPa

در شرایط مشخصه، در ناحیه بخار مافوق گرم قرار دارد. از جدول ترمودینامیکی:

$$T = 30^\circ\text{C} \rightarrow \begin{cases} P = 1167\text{ kPa} \\ v_f = 0.00168\text{ m}^3/\text{kg} \\ v_g = 0.00168\text{ m}^3/\text{kg} \\ v_{fg} = 0.10881\text{ m}^3/\text{kg} \end{cases}$$

مثال (۲-۷): دما و کیفیت آب در فشار 300 kPa برای حجم مخصوص $1\text{ m}^3/\text{kg}$ بیابید.

- از جدول ضمیمه ترمودینامیکی (سری ب):



$$P = 300 \text{ kPa} , \quad v = 1 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\longrightarrow v_1 = 0.8752 \text{ m}^3/\text{kg} \quad T_1 = 300^\circ\text{C}$$

$$v = 1 \text{ m}^3/\text{kg} \quad x = ?$$

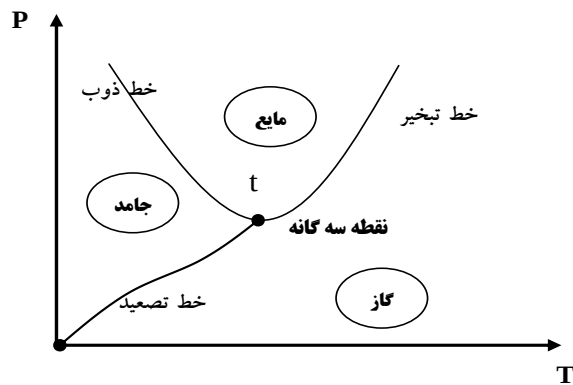
$$v_2 = 1.311 \text{ m}^3/\text{kg} \quad T_2 = 400^\circ\text{C}$$

در ناحیه بخار مافوق گرم قرار دارد که از جدول ترمودینامیکی سری ب محاسبه می‌شود. با میان یابی از دو درجه حرارت نزدیک به حجم مخصوص مسئله، درجه حرارت مجهول قابل محاسبه است

$$\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{v - v_1}{v_2 - v_1} \Rightarrow \frac{T - 300}{400 - 300} = \frac{1 - 0.8753}{1.315 - 0.8753} \Rightarrow T = 379.8^\circ\text{C}$$

۲-۵ نقطه سه گانه

نقطه‌ای است حاصله از تقاطع سه خط، تبخیر، ذوب و تصعید می‌باشد.



شکل ۲-۷. نقطه سه گانه آب

- خط تبخیر مابین دو فاز مایع و گاز قرار دارد که همان خط جوش است که از نقاط جوش در فشارهای مختلف به دست می‌آید.

- خط ذوب بین دو حالت جامد و مایع است که حاصل از دمای ذوب در فشارهای مختلف می‌باشد. برای آب، افزایش فشار موجب کاهش نقطه ذوب را موجب می‌شود.

- خط تصعید همان تغییر فاز مستقیم از فاز جامد به فاز بخار که حاصل از دمای تصعید در فشارهای مختلف می‌باشد. تصعید معمولاً در فشارها و دماهای کم رخ می‌دهد.

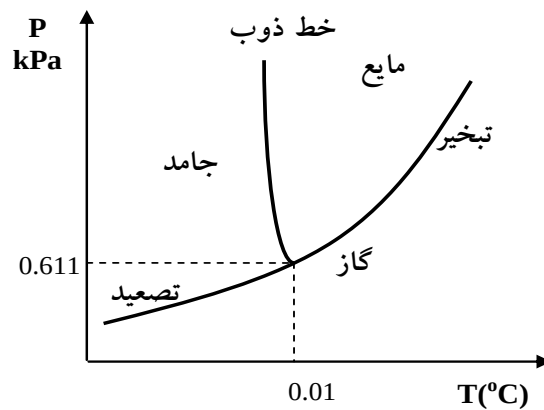
در نقطه سه‌گانه، با کوچک‌ترین تغییر و تحریکی، ماده خالص آمادگی ورود به یکی از فازهای جامد، مایع و گاز را دارد.

تفاوت عمده نقطه سه‌گانه و بحرانی اینست که نقطه سه‌گانه روی خطوط تبخیر- تصعید- ذوب قرار دارد ولی نقطه بحرانی روی خطوط تبخیر قرار دارد (بین فاز مایع و گاز). نقطه بحرانی در تعادل فاز مایع و گاز مطرح است و آن را باید روی خطوط تبخیر در دیاگرام P-T پیدا نمود.

جدول (۲-۲) مشخصات و ویژگی‌هایی از قبیل دما و فشار نقطه سه‌گانه مواد مختلف را به تفکیک برای مواد مختلف و متداول ارائه نمود. به‌عنوان مثال برای آب در حالت بخار، اگر در فشار پایین و دمایی کمتر از صفر درجه سلسیوس شروع به افزایش فشار نماییم. در حرارت ثابت، از فاز بخار وارد فاز جامد شده و سپس با افزایش فشار وارد فاز مایع می‌شویم (شکل ۲-۸).

جدول ۲-۲. مشخصات دما و فشار نقطه سه‌گانه مواد مختلف

مواد	درجه حرارت (°C)	فشار (kPa)
هیدروژن	-۲۵۹	۷/۱۹۴
اکسیژن	-۲۱۹	۰/۱۵
نیتروژن	-۲۱۰	۵۳/۱۲
دی‌اکسید کربن	-۵۶/۴	۸/۵۲۰
جیوه	-۳۹	۰۰۰۰۰۱۳/۰
آب	۰/۰۱	۰/۶۱۱۳
روی	۴۱۹	۰۶۶/۵
نقره	۹۶۱	۰۱/۰
مس	۱۰۸۳	۰/۰۰۰۰۷۹



شکل ۲-۸. وضعیت نقطه سه گانه آب

۲-۶ تبدیل آلوتروپیک

ماده خالص می‌تواند دارای فازهای جامد گوناگون باشد. لذا تبدیل از یک فاز جامد به فاز جامد دیگر را تبدیل آلوتروپیک گویند. یک ماده خالص می‌تواند چند نقطه سه‌گانه داشته باشد. اما فقط در یکی از این نقاط سه‌گانه است که جامد-مایع-بخار در تعادل هستند. به چند مثال از فرآیند آلوتروپیک در ذیل می‌پردازیم.

- اکثر عناصر در فشار، دما یا میدان‌های خارجی مختلف، گونه‌های مختلف از ساختار بلوری دگرشکل (آلوتروپی) دارند. تبدیل از یکی با تبدیل به دیگری، استحاله دگرشکلی یا آلوتروپیک خوانده می‌شود. ایتربیم دارای سه فرم آلوتروپیک است که درجه تغییر آن بین ۱۳۰- و ۷۹۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد.

- آهن **آلفا** یکی از آلوتروپ‌های آهن است. این آلوتروپ از دمای ۲۷۳- درجه سلسیوس تا ۹۱۰ درجه سلسیوس پایدار است. این آلوتروپ دارای ساختمان بلوری مکعبی مرکز پر است.

- آهن **گاما** یکی از آلوتروپ‌های آهن است که در محدوده دمایی ۹۱۲ تا ۱۳۹۴ درجه سلسیوس پایدار بوده و ساختمان بلوری (مکعبی مرکز پر) دارد.

- آهن **دلتا** یکی از آلوتروپ‌های آهن است که از دمای ۱۴۰۱ درجه سلسیوس تا

۱۵۳۹ درجه سلسیوس (نقطه ذوب آهن) پایدار است.

- در دمای ۷۶۸ درجه سلسیوس، آهن آلفای فرومگناطیس به آهن آلفای پارامگناطیس تبدیل می شود. این تحول، تحول آلوتروپیک نیست.

ماده خالص ۴۳

فصل سوم

گازها و قوانین و معادلات مربوطه

اهداف

در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:

۱. آشنایی با گاز ایده‌آل و روابط مربوطه
۲. آشنایی با قوانین مرتبط با گاز ایده‌آل، مقایسه با گاز حقیقی و روابط مربوطه
۳. تراکم‌پذیری گاز

۳-۱ معادلات گاز ایده‌آل

داشتن روابط مناسب میان سه پارامتر ترمودینامیکی دما، فشار و حجم (T, P, V) از اصول اولیه در علم ترمودینامیک می‌باشد. معادله حالت ترمودینامیکی ارتباطی است میان این سه پارامتر که به صورت تجربی نیز می‌باشد. یکی از این معادلات مربوط به حالت گاز ایده‌آل است. گاز ایده‌آل گازی است که اثر متقابل بین ذرات و مولکول‌ها در آن ضعیف است. از ویژگی‌های مهم گاز ایده‌آل چگالی کم، فشار کم و دمای بالا است که آن را به شرایط ایده‌آل نزدیک‌تر می‌کند.

قبل از بحث راجع به معادلات مربوط به گاز ایده‌آل، لازم است چندی راجع به اصل آوگادرو صحبت نماییم. برنولی در سال ۱۷۳۸ اعلام نمود که گازها از ذرات ریز نامرئی مجزایی به نام مولکول تشکیل شده‌اند، و حجم گاز به تعداد مولکول‌های آن وابسته است. آوگادرو، در سال ۱۸۱۱ بیان نمود که حجم‌های مساوی از کلیه گازها در

درجه حرارت و فشار یکسان حاوی تعداد مولکول‌های برابر هستند.

$$(۱-۳) \quad \frac{n}{V} = \text{ثابت} \quad \text{یا} \quad V \propto n$$

n : تعداد مولکول‌ها

$$V = \text{حجم (m}^3\text{)}$$

به عنوان مثال اگر n_A را تعداد مولکول‌ها در $31/998$ گرم O_2 تعریف کنیم در نتیجه حجم اشغال شده در حرارت صفر درجه سلسیوس و فشار یک اتمسفر، برابر $22/4$ لیتر است. لذا آواگادرو می گوید، این حجم نیز حجم اشغال شده از هر گاز در همین شرایط است بدون لحاظ کردن جرم آن گاز.

مثال (۱-۳): یک گرم گاز با سرعت $1/16 \times 10^{18}$ منتشر می شود. هر ذره تبدیل به یک مولکول گاز He می شود. در شرایط استاندارد، حجم کل $1/16 \times 10^{18}$ مولکول، $0/043$ میلی لیتر است.

$$\begin{aligned} \frac{n}{V} &= 1000 \times \frac{(1/16 \times 10^{18})}{(0/043)} = 2,7 \times 10^{23} \text{ molecu} / \text{mol} \\ &= 2,7 \times 10^{23} \times 22,4 = 6,05 \times 10^{22} \text{ litr} / \text{mol} \end{aligned}$$

همان طور که بیان شد در دما و فشار ثابت، حجم یک گاز با تعداد مول‌های آن به طور مستقیم تغییر می کند. واضح است در دما و فشار معین، حجم اشغال شده توسط یک مول گاز (یک مولکول گرم آن) برابر نصف حجم اشغال شده توسط دو مول از همان گاز است.

بنابراین طبق نظریه آواگادرو، در دما و فشار معین، حجم یک مول از یک گاز برابر حجم یک مول از هر گاز دیگر است به عبارتی در وضعیت مشخص، گازها با مول‌های مساوی دارای حجم مساوی هستند. اگر n تعداد مول‌های یک گاز باشد، همواره حجم آن متناسب با تعداد مول‌های همان گاز می باشد.

$$V = k^m \times n \rightarrow V \propto n$$

مقدار عددی ثابت k^m به دما و فشار گاز بستگی دارد.
از ترکیب رابطه بالا معادله‌ای کلی حاصل می‌شود که حجم، دما، فشار و تعداد مول‌ها را به هم مربوط می‌سازد:

$$V \propto 1/Pn \propto V/T$$

بنابراین،

$$V \propto \left(\frac{1}{P}\right)Tn$$

این تناسب، را با استفاده از یک مقدار ثابت می‌توان به تساوی تبدیل کرد. در این مورد، مقدار ثابت را $\bar{R}$ (ثابت عمومی گازها که برابر با $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$) فرض می‌کنیم.

$$V = \bar{R} \cdot \left(\frac{1}{P}\right) \cdot T \cdot n \quad (2-3)$$

رابطه (۲-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$PV = nRT \quad (3-3)$$

$P = \text{فشار (Pa)}$

در دما و فشار معمولی، رفتار اغلب گازها با رابطه بالا تطبیق می‌کند؛ ولی این تطابق در مواردی هم کامل نیست (خصوصاً در دمای پایین و فشار بالا). یک گاز فرضی که رفتار آن در هر شرایطی از معادله بالا پیروی کند، گاز ایده‌آل و معادله (۳-۳)، معادله حالت برای گاز ایده‌آل نامیده می‌شود. گازها به وسیله مولی که آن را گاز ایده‌آل می‌نامیم، نسبتاً خوب توصیف شده‌اند.

در مجموع گاز ایده‌آل متشکل از مولکول‌هایی است که دارای جرم و سرعت بوده ولی فاقد حجم می‌باشد، و هیچ‌گونه نیروی دافعه یا جاذبه بین خودشان و یا با ماده‌ی دیگری نشان نمی‌دهند. از طرفی رابطه بین ثابت عمومی گازها و ثابت هر گاز به صورت معادله (۴-۳) تعریف می‌شود.

$$\bar{R} = M \quad (۴-۳)$$

R = ثابت هر گاز (J/kg.K)

M = جرم مولکولی گاز

$$Rn = \frac{m}{M} \quad (۵-۳)$$

m = جرم گاز

با قراردادی معادلات فوق در معادله (۳-۳)، می توان نوشت:

$$PV = mRT \longrightarrow PV = n\bar{R}T \quad (۶-۳)$$

معادله (۶-۳) نشان دهنده اینست که همواره معادله $PV/T = \text{cte}$ مقدار ثابت می باشد و این مقدار ثابت می تواند حاصل ضرب جرم گاز در ثابت آن گاز باشد. با تبدیل و وارد کردن حجم مخصوص و جرم در معادله (۶-۳)، معادله (۷-۳) به دست می آید.

$$PV = mRT \Rightarrow Pv = RT \quad (۷-۳)$$

در رابطه (۷-۳)، P فشار مطلق، T دمای مطلق و v حجم مخصوص می باشد.

مثال (۲-۳): جرم هوای داخل اتاقی را به ابعاد $۴ \times ۱۰ \times ۶$ متر در شرایط ۱۰۰ kPa و ۲۵°C را بیابید.

فرض: هوا به عنوان گاز ایده آل $PV = mRT$

$$V = ۶ \times ۱۰ \times ۴ = ۲۴۰ \text{ m}^3$$

$$P = ۱۰۰ \text{ kPa}$$

$$T = ۲۵ + ۲۷۳/۱۵ = ۲۹۸/۲ \text{ K}$$

$$M = ۲۹ \text{ هو}$$

$$m = ۲۸۰/۵ \text{ kg}$$

$$100 \text{ (KN/m}^3\text{)} \times 240 \text{ (m}^3\text{)} = m \text{ (kg)} \times \frac{8/3145}{29} \text{ (KNm/kg)} \times 298/2 \text{ (K)}$$

۲-۳ تفاوت گاز ایده‌آل و گاز حقیقی

گاز ایده‌آل اگر در محیط محبوس قرار نگیرد، به سرعت پخش می‌شود. عملکرد گازهای حقیقی شبیه گاز ایده‌آل نیست زیرا:

۱. مولکول‌های حقیقی دارای حجم می‌باشند

موقعی که گاز حقیقی درون ظرفی قرار گیرد، فضای خالی کمتر از حجم ظرف (V) می‌باشد. زیرا قسمتی از این فضا توسط مولکول‌ها اشغال شده است، و مولکول‌ها طوری عمل می‌کنند که انگار در ظرف کوچکتری هستند و به جدار ظرف برخورد می‌کنند در نتیجه فشار بیشتری اعمال خواهند کرد. فشار (P_1) بیشتر از فشار ایده‌آل (P) است بنابراین نامعادله زیر صدق می‌کند.

$$\frac{P_1 V_1}{nRT} > 1$$

۲. به واسطه جاذبه بین مولکولی

مولکول‌های حقیقی یکدیگر را جذب می‌کنند، بر اساس این نیرو دو حالت رخ خواهد داد.

الف) مدت کوتاهی در کنار هم می‌مانند که به واسطه آن تعداد مولکول‌های مستقل کاهش می‌یابد و در نتیجه فشار گاز کاهش می‌یابد (ایده‌آل $P_1 < P$).

ب) بر اثر نیروی بین مولکولی مسیر هم را کمی منحرف می‌کنند. این تغییر مسیر سبب ایجاد مسیر منحنی شکل خواهد شد که در نتیجه آن برای برخورد به جداره باید مسیر بیشتری را طی نمایند. لذا به دلیل طی این مسیر طولانی، برخورد کمتر با جدار و فشار اعمالی کمتر (ایده‌آل $P_1 < P$) خواهد شد که با حالت قبلی چسبیدن یکسان می‌شود.

در فشار کم، حجم مقدار معینی از گاز زیاد شده و در نتیجه آن حجم اشغال شده توسط مولکول‌ها کم می‌شود. بنابراین به واسطه این فشار کم، پراکندگی مولکول‌ها بیشتر و جاذبه متقابل آن‌ها کم شده و به حالت گاز ایده‌آل نزدیک‌تر می‌گردد.

همچنین در دمای بالا، مولکول‌ها انرژی جنبشی بالاتری دارند لذا تمایل برای تجمع کمتر است و به حالت گاز ایده‌آل نزدیک‌تر می‌شود.

۳-۳ قانون دالتون

در شیمی و فیزیک، قانونی است که فشار کل یک گاز را با معادله‌ای به مجموع فشار هر جز گاز مرتبط می‌کند این قانون در مورد گازهای کامل هم‌خوانی دارد این قانون توسط جان دالتون و در سال ۱۸۰۱ به وجود آمد

غالباً رفتار مخلوطی از گازهایی که با هم ترکیب نمی‌شوند، مورد نظر است. فشار جزئی هر یک از اجزای چنین مخلوط گازی، عبارت از فشاری است که آن جزء از گاز اعمال می‌کرد، اگر تنها گاز موجود در حجم مورد نظر باشد.

قانون فشار جزئی دالتون می‌گوید که فشار کل مخلوطی از گازها برابر مجموع فشارهای جزئی هر گاز $(..., p_C, p_B, p_A)$ می‌باشد و فشار جزئی گازهای مخلوط شده کل را p_t آن گازها فرض شد. در ریاضیات فشار کل برابر مجموع فشار هر جز است، و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_i \quad (۸-۳)$$

$$P_t = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n \quad (۹-۳)$$

p_1 ، p_2 فشار هر جزء است. این قانون در حالتی حکم می‌کند که گاز برهم کنش نداشته باشد $P_i = P_{\text{totla}} \times m_i$ که m_i نسبت مولی است. قانون دالتون برای گازهای حقیقی با خطای زیادی همراه است

$$P_i = \frac{P_{\text{totla}} \times C_i}{1000000} \quad (۱۰-۳)$$

که C_i غلظت جز i ام برحسب ppm (ذره در میلیون) است

مثال (۳-۳): اگر ۱ لیتر گاز A در فشار ۰/۶ atm و ۱ لیتر گاز B را در فشار ۰/۴ atm در ظرفی به حجم ۱ لیتر هم مخلوط کنیم، چنانچه دما ثابت باشد، فشار مخلوط ۰/۶ atm خواهد شد.

طبق نظریه جنبشی، مولکول‌های گاز A و مولکول‌های گاز B انرژی جنبشی متوسط یکسان دارند، زیرا دمای هر دو گاز یکسان است. به علاوه، نظریه جنبشی فرض می‌کند که مولکول‌های گازی که در ترکیب شیمیایی وارد نمی‌شوند، همدیگر را جذب نمی‌کنند. بنابراین، بر اثر اختلاط دو یا چند گاز، تغییری در انرژی جنبشی متوسط هر یک از گازها ایجاد نمی‌شود و هر گاز همان فشاری را اعمال می‌کند که اگر به تنهایی در آن ظرف می‌بود، اعمال می‌کرد.

۳-۴ قانون بویل - چارلز

از طرفی برای دو گاز ایده‌آل مختلف می‌توان نوشت.

$$\frac{P_1 V_1}{n_1 T_1} = \bar{R} = \frac{P_2 V_2}{n_2 T_2}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (۱۱-۳)$$

یکی از نکات مهمی که از فرمول (۱۱-۳) در مورد گاز ایده‌آل می‌توان نتیجه گرفت این است که رفتار گاز ایده‌آل به تعداد مول‌های آن وابسته نیست. اگر در دمایی ثابت فشار گاز را نصف کنیم، حجم گاز ۲ برابر می‌شود.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\begin{cases} T_1 = T_2 \\ P_2 = P_1 / 2 \end{cases} \Rightarrow P_1 V_1 = \frac{1}{2} P_1 V_2 \Rightarrow V_2 = 2V_1$$

۳-۵ معادله حالت برای فاز بخار یک ماده تراکم پذیر

براساس مشاهده تجربی، رفتار گاز با فشار، حجم مخصوص، و دمای معین و با چگالی کم از معادله (۳-۷) به دست می آید.

$$Pv = RT$$

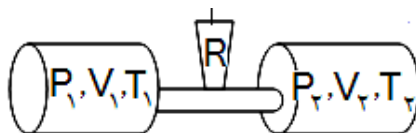
$$P\bar{v} = \bar{R}T$$

معادله حالت بر مبنای حجم کل با تابعیت از قانون بویل - چارلز و در شرایط چگالی کم صادق است.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

در تعریف مخلوط گازها می توان گفت که مخلوط دو گاز ایده آل با شرایط ترمودینامیکی مختلف که مخلوط حاصل گازی است ایده آل با شرایطی که در معادله (۳-۱۱) صدق نماید:

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_1 V_1}{T_1} + \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (۳-۱۲)$$



$$V = V_1 + V_2$$

$$PV = \text{cmHg.lit}$$

۶-۳ شرایط متعارفی

معمولاً به شرایطی اطلاق می گردد که گاز ایده آل دارای دمایی برابر ۲۷۳/۱۵ درجه کلوین و فشار ۱ اتمسفر که یک مول از آن گاز دارای حجمی برابر ۲۲/۴ لیتر باشد. اندیس صفر برای شرایط متعارفی است.

$$\begin{cases} T_1 = 273\text{K} \\ P_1 = 1\text{atm} \\ V_1 = 22.4\text{lit} \end{cases}$$

$$\frac{P}{P_1} \times \frac{V}{V_1} = \frac{m}{M} \times \frac{T}{T_1}$$

$$PV = n\bar{R}T \Rightarrow = \frac{1 \times 8.3145 \times 273.15}{1.03 \times 10^5} = 22.4\text{lit}$$

۷-۳ تراکم پذیری

دو سؤال درباره محاسبات ترمودینامیکی با استفاده از معادله گاز ایده‌آل مطرح است.

اولاً، معادله گاز ایده‌آل در چگالی کم معنی پیدا می‌کند پس چگالی کم یعنی چه و به چه دامنه‌ای اطلاق می‌گردد. همانطور که میدانیم چگالی رابطه عکس با حجم دارد و در حجم بالا معمولاً پراکندگی گاز بیشتر می‌شود

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{حجم بالا پراکندگی بیشتر})$$

در چگالی متوسط، نیروی ربایشی گرایش دارد تا مولکول‌ها را به طرف هم بکشد، پس مقدار تراکم‌پذیری کمتر از یک است ($Z < 1$). در چگالی زیاد، نیروی رانشی گرایش دارند تا مولکول‌ها را از هم دور سازند.

ثانیاً، گاز حقیقی در فشار و دمای (P, T) معین با چند مول از گاز ایده‌آل منحرف می‌شود.

اگر T کم و P زیاد شود، مقدار تراکم‌پذیری (Z) از واحد خیلی منحرف می‌شود. چون دما و فشار بحرانی (P_C, T_C) مواد مختلف خیلی متفاوتند در نتیجه نمودار تراکم‌پذیری آن‌ها هم متفاوت خواهد بود. بررسی این حالت مواد طبق یک مبنای مشترک، که همان خواص کاهیده‌ی مواد (P_r و T_r) است، انجام می‌شود.

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (۱۳-۳)$$

P_r : فشار کاهیده

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (۱۴-۳)$$

T_r : دمای کاهیده

برحسب P_r و T_r می‌توان نمودار تراکم‌پذیری Z را رسم می‌کنیم. در این نمودار اگر مقدار فشار (P) خیلی کوچک‌تر از فشار بحرانی (P_c) باشد، مدل گاز ایده‌آل را برای هر دما با تقریب خوب می‌توان استفاده کرد. همچنین در دمای بالاتر از دمای بحرانی ($T > T_c$)، می‌توان مدل گاز ایده‌آل را برای گاز با فشار بالا هم بکار برد.

در ناحیه بخار فوق گرم، انحراف از گاز ایده‌آل مورد توجه است (T کمتر از T_c و در P متوسط) که از جداول ترمودینامیکی (سری ج) استفاده می‌شود. اگر در معادله گاز ایده‌آل پارامتر Z به‌عنوان ضریب تراکم‌پذیری وارد گردد، معادله گاز ایده‌آل به معادله حالت گاز واقعی نزدیک می‌شود. به عبارتی، پارامتر Z مقدار انحراف از حالت گاز ایده‌آل را برای ما مشخص می‌کند. زمانی که پارامتر Z به سمت یک می‌رود، رفتار گاز به سمت گاز ایده‌آل نزدیک می‌شود

$$PV = ZmRT \quad Z \rightarrow ۱ \quad (۱۵-۳)$$

دور شدن Z از عدد یک به معنای انحراف از شرایط ایده‌آل است. همان‌طور که می‌دانیم در نقطه بحرانی، رفتار گاز از حالت ایده‌آل دور است.

$$Pv = ZRT$$

فصل چهارم

کار و گرما و فرآیندهای مرتبط

اهداف

در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:

۱. آشنایی با کار و فرآیندهای خاص ترمودینامیکی

۲. آشنایی با گرما و روش‌های انتقال آن

۳. محاسبه و مقایسه کار و گرما

۴-۱ کار در فرآیندهای ترمودینامیکی

اگر در یک فرآیند ترمودینامیکی مسیر فرآیند مشخص باشد، فرآیند با حفظ تعادل انجام می‌شود و در صورت عدم اتلاف انرژی در مسیر، می‌توان از همان مسیر فرآیند و با حفظ تعادل بازگشت.

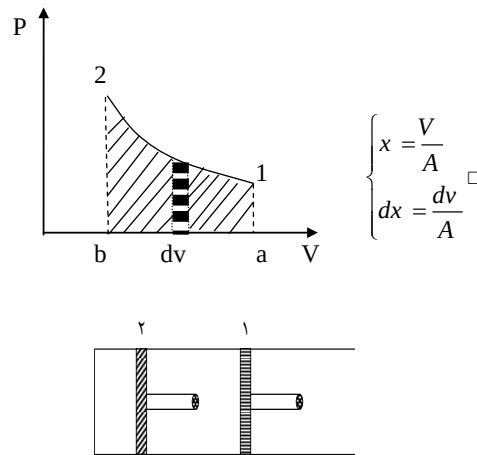
کار و گرما هر دو انتقال انرژی از سیستمی به سیستم دیگر هستند. همان‌طور که از تعریف کار می‌دانیم، کار برابر است با راستای نیرو (F) در جابه‌جایی (X) و به صورت انتگرالی بیان می‌شود. وقتی نیروی F در تغییر مکان X و در امتداد نیرو اثر کند، کار انجام شده است. برای تحلیل انتقال و تغییرات انرژی کار و گرما را بر اساس قوانین فیزیک می‌توان مدل‌سازی کرد.

$$kgW = \int_a^b F dx$$

$$P = F/A \Rightarrow F = P.A$$

$$W = \int_a^b F \left(\frac{dv}{A} \right)$$

در شکل (۱-۴) وقتی سیلندر از نقطه ۱ به نقطه ۲ می‌رود، فرآیند تراکمی است و کاهش حجم از V_a به V_b را داریم، در دیاگرام P - V سطح زیر منحنی برابر با کار انجام شده می‌باشد. المان dx را در انتگرال قرار می‌دهیم. همواره از دیدگاه ماکروسکوپی کار توسط یک سیستم انجام می‌شود و میزان کار مبادله شده میان سیستم و محیط را می‌توان با داشتن مسیر تحول ترمودینامیکی به دست آورد.



شکل ۱-۴. نمودار مقدار کار انجام شده در فرآیند تراکمی در سیلندر از نقطه ۱ به ۲

کار برابر است با انرژی عبوری از مرز سیستم و به صورت اثر خالص خارجی برای سیستم نشان داده می‌شود. به عنوان مثال در یک مدار الکتریکی، جریان الکتریکی و مکانیکی که از مرز سیستم می‌گذرد کار انجام می‌شود. همواره کار انجام شده توسط سیستم را مثبت، و کار انجام شده روی سیستم را منفی می‌گیریم. بعبارتی کار مثبت به این معنی است که انرژی از سیستم خارج می‌شود مثل مرحله انبساط در سیستم سیلندر- پیستون و کار منفی به معنی این که انرژی به سیستم وارد می‌شود مثل مرحله

تراکم در سیستم سیلندر- پیستون که آماده گرفتن کار است. گاز محبوس شده در سیلندر - پیستون را در نظر بگیرید. فشار اولیه گاز P ، حجم کل V و سطح مقطع آن A می‌باشد. چنانچه پیستون در یک حالت شبه تعادلی به فاصله dx حرکت کند، کار دیفرانسیلی انجام شده در این فرآیند برابر است با:

$$\delta W = Fdx = PAdx = PdV \quad (1-4)$$

یعنی کار مرزی به صورت دیفرانسیلی برابر با حاصل ضرب فشار مطلق P در تغییر دیفرانسیلی حجم سیستم می‌باشد. بر این اساس گاهاً کار مرز متحرک را کار PdV می‌نامند. در معادله (۲-۴)، P فشار مطلق بوده و همیشه مثبت است و تغییر حجم dV به واسطه نوع عمل تغییر می‌کند بدین صورت که طی فرآیند انبساط که با افزایش حجم همراه است، مثبت و در فرآیند تراکمی که با کاهش حجم است، منفی می‌باشد. بنابراین کار مرزی در فرآیند انبساط مثبت و در یک فرآیند تراکمی منفی خواهد بود که همان علامت قراردادی کار می‌باشد.

براساس شکل ۱-۴، کار انجام شده در فرآیند حرکت پیستون با جمع کردن تمام کارهای دیفرانسیلی انجام شده از حات اولی تا انتهای فرآیند حاصل می‌شود.

$$W = \int_a^b PdV \quad (2-4)$$

اگر رابطه بین فشار و حجم در طی فرآیند مشخص باشد کار قابل محاسبه است یعنی فشار تابعی از دما می‌باشد. نمودار PV سطح در شکل ۱-۴ یک فرآین شبه تعادلی است. در این نمودار سطح dA برابر است با دیفرانسیل کار (PdV) می‌باشد و کل سطح از مجموع سطوح کوچک dA به دست می‌آید. به عبارتی دیگر مساحت زیر منحنی $P-V$ فرآیند معرف کار مرزی می‌باشد

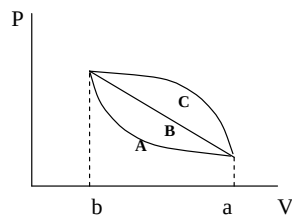
$$A = \int_a^b dA = \int_a^b PdV$$

از مقایسه این معادله با معادله ۲-۴ مشخص کننده این حالت است که سطح زیر

منحنی فرآیند بر روی نمودار $P-V$ از نظر اندازه برابر با کار انجام شده در یک فرآیند شبه تعادلی در یک سیستم بسته می باشد.

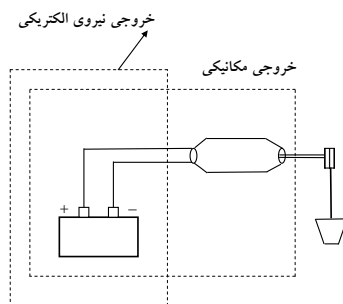
هرگاه اثر خالص کار مانند بالا بردن وزنه را بررسی کنیم، کار انجام شده توسط سیستم را مثبت و کار انجام شده بر روی سیستم را منفی گویند. واحد کار به صورت ژول یا نیوتن-متر بیان می شود و همچنین کار در واحد زمان به صورت قدرت که با واحد اسب بخار یا وات بیان می شود.

همانطور که بیان شد، کار تابع مسیر حرکت سیستم است. یعنی مقدار کار انجام شده در هر فرآیند فقط تابعی از حالت های انتهایی فرآیند نیست، بلکه به مسیر فرآیند بین این دو حالت بستگی دارد. شکل (۲-۴) نشان می دهد که کار در مسیرهای A ، B ، و C بترتیب افزایش می یابد زیرا در افزایش یا کاهش سطح زیر منحنی اثر دارد.



شکل ۲-۴. مسیر انجام کار در فرآیند ترمودینامیکی

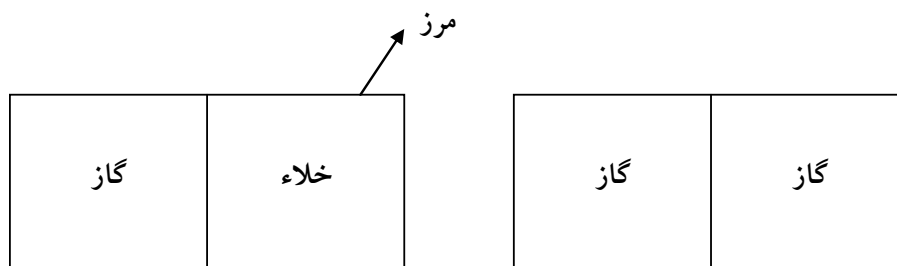
در شکل (۳-۴) اگر سیستم را باطری و موتور در نظر بگیریم و بالابر در داخل سیستم قرار نگیرد.



شکل ۳-۴. کار انجام شده در یک سیستم الکتریکی

با حرکت الکترو موتور قرقره می چرخد برای اینکه متوجه شویم بین سیستم و محیط کار انجام گرفته است. با حرکت الکترو موتور قرقره می چرخد و وزنه را به طرف بالا یا پایین می برد. یعنی اثر ماشین باعث انجام کار و تحویل آن به محیط گردید. حال اگر مرز سیستم تغییر کند و کل مجموعه در داخل سیستم قرار گیرد در این صورت کل تحول در داخل سیستم انجام می گیرد و هیچگونه تبادلی بین سیستم و محیط انجام نمی گیرد پس کاری انجام نمی گیرد. کار تنها در مرز سیستم تعریف می شود.

برای توصیف بیشتر ابتدا محفظه ای شامل گاز و خلاء را که توسط غشاء از هم جدا شده را در نظر می گیریم شکل (۴-۴). غشا پاره شده و گاز تمام حجم را پر می کند. کار ناشی از پارگی غشاء باید چشم پوشی گردد. حال این سؤال مطرح است که آیا کاری در فرآیند انجام گرفت. اگر سیستم را شامل گاز و خلاء لحاظ کنیم، کاری انجام نشده است. زیرا از مرز سیستم عبور نکرده است.



شکل ۴-۴. تعریف کار در مرز سیستم

حال اگر سیستم را فقط گاز در نظر بگیریم، با پاره شدن غشاء، تغییر حجم داریم در نتیجه کار انجام شده برابر است با انتگرال تغییر حجم از اولیه به ثانویه $(\int P dv)$. اما چون فرآیند شبه تعادلی نیست لذا کار انجام شده از رابطه فوق قابل محاسبه نیست چون مقاومتی در مرز سیستم در هنگام افزایش حجم وجود ندارد. بنابر این کاری در طی فرآیند صورت نمی گیرد.

۲-۴. فرآیندهای خاص ترمودینامیکی

در ترمودینامیک فرآیندهایی از قبیل هم حجم ($V=cte$)، هم دما ($T=cte$)، هم فشار ($P=cte$)، و بی‌دررو دارای اهمیت ویژه‌ای در بررسی و تحلیل فرآیندها دارند.

$$\frac{PV}{T} = mR \quad PV = mRT$$

فرآیند هم حجم در حجم ثابت انجام می‌گیرد. در این فرایند به واسطه عدم تغییر در حجم سیستم، کار انجام شده صفر است. لذا رابطه بین P و T بشرح ذیل می‌باشد:

$$\frac{P}{T} = \frac{mR}{V} \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (۳-۴)$$

مثال بارز این حالت را می‌توان برای دیگ زودپز بیان نمود. موقعی که حرارت به دیگ منتقل شده و به واسطه عدم تغییر در حجم سیستم، کار انجام شده برابر صفر است. به فرآیندی که در آن فشار سیستم همواره ثابت بوده و رابطه میان دما و حجم ($V-T$) به صورت خطی باشد را فرآیند فشار ثابت گویند.

$$\frac{PV}{T} = mR \Rightarrow \frac{V}{T} = \frac{mR}{P} = cte$$

فرمول ($۴-۴$) رابطه بین حجم و دما در فرآیند فشار ثابت را بیان می‌نماید.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (۴-۴)$$

محاسبه کار نهایی در این فرآیند وابسته به سطح زیر منحنی ($V-T$) می‌باشد و تغییرات حجم کاملاً مشهود است و به صورت ذیل محاسبه می‌شود.

$$W = \int P dv = P \int dv = P(v_2 - v_1) \quad (۵-۴)$$

به فرآیندی که جذب یا دفع انرژی در سیستم از طریق انتقال حرارت و کار با

محیط صورت می‌گیرد و دمای ماده کاری درون سیستم ثابت باقی ماند را فرآیند هم‌دما گویند. دما همان شاخص انرژی ذرات است و با برهم خوردن تعادل در انرژی سیستم، دمای آن کم یا زیاد می‌شود. انرژی فقط از طریق کار و انتقال حرارت به یک سیستم بسته وارد یا از آن خارج می‌شود.

$$\frac{PV}{T} = mR \Rightarrow PV = mRT = \text{ثابت}$$

موقعی که سیستم هیچ انرژی دریافت و صادر نکرده باشد، تناسب بین کار و انتقال حرارت سیستم وجود دارد و دمای سیستم ثابت است. بنابراین قانون اول ترمودینامیک یعنی برابری کار و انتقال حرارت در فرآیند دما ثابت تعریف شده است.

$$|W| = |Q|$$

با افزایش مقدار ثابت mRT مقدار PV فشار بالاتری را در حجم دلخواه خواهد داشت. رابطه بین فشار و حجم در فرآیند هم دما به صورت زیر می‌باشد.

$$PV = mRT \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (۶-۴)$$

کار در فرآیند هم دما به صورت رابطه (۷-۴) محاسبه می‌شود

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV \Rightarrow W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{mRT}{V} dV$$

$$W = mRT \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (۷-۴)$$

از طرفی با قرار دادن نسبت به دست آمده از رابطه (۶-۴) در فرمول (۷-۴)، کار انجام شده در سیستم هم‌دما عبارت است از:

$$W = P_1 V_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (۸-۴)$$

$$W = P_1 V_1 \times \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (9-4)$$

تحول بی‌دررو به فرآیندی گویند که هیچ انتقال حرارتی میان سیستم بسته و محیط انجام نمی‌گیرد. تنها راه تبادل انرژی بین سیستم و محیط، کار است. انجام فرآیند بی‌دررو و هم‌دما به‌طور هم‌زمان غیرممکن است. زیرا در سیستم ایزوله حرارتی، ورود و خروج انرژی از طریق کار انجام می‌گیرد. به عبارتی مقدار $\Delta Q \neq 0$ است در مجموع فرآیندی که همواره روابطی است که میان P و V را به صورت یک تابع معرفی نماید را فرآیند پلی‌تروپیک گویند.

$$PV^n = mRT = \text{cte} \quad (10-4)$$

n همان توان پلی‌تروپیک است و می‌تواند از صفر تا بی‌نهایت تغییر کند. توان‌های مختلف پلی‌تروپیک نشان‌دهنده فرآیندهای مختلف ترمودینامیکی می‌باشد. مثال بارز آن در سیستم سیلندر و پیستون با فنر است که $K = -1$ است. اگر $n = 0$ باشد در این صورت، فرآیند در فشار ثابت رخ می‌دهد

$$PV^0 = \text{cte} \Rightarrow P = \text{cte}$$

اگر $n = 1$ باشد در این صورت، فرآیند در دمای ثابت رخ می‌دهد

$$PV^1 = \text{cte} \Rightarrow PV = \text{cte} = mRT$$

اگر $n = \gamma$ باشد در این صورت، فرآیند در حالت آدیاباتیک رخ می‌دهد.

$$PV^\gamma = \text{cte}$$

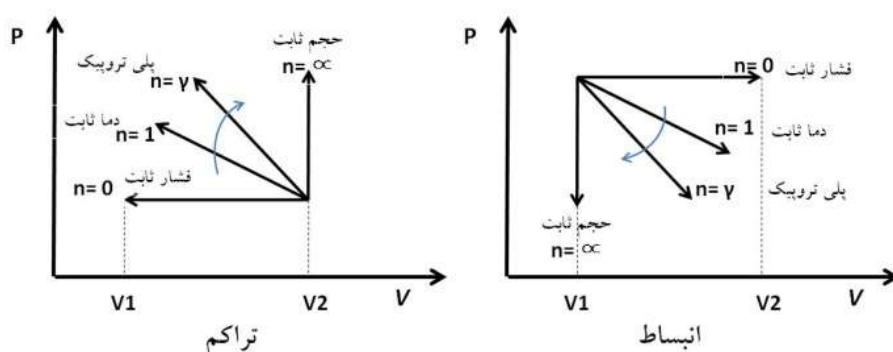
اگر $n = \infty$ باشد در این صورت، فرآیند در حجم ثابت رخ می‌دهد

$$PV^\infty = \text{cte} \Rightarrow V = \text{cte}$$

مقدار γ همان ضریب اتمیسیته است که همواره بزرگ‌تر از یک است ($\gamma > 1$) و برابر با نسبت ظرفیت گرمایی در فشار ثابت (C_p) به ظرفیت گرمایی در حجم ثابت

(C_v) می‌باشد و در فصل‌های بعد بیشتر توضیح داده خواهد شد.

حال فرآیندهای فشار ثابت، دما ثابت، پلی‌تروپیک، و حجم ثابت را در دو حالت تراکمی و انبساطی بر روی محور مختصات ($P-V$) در شکل (۴-۵) ترسیم شد. با افزایش مقدار عددی n ، شیب نمودار بیشتر شده و سطح زیر نمودار کاهش می‌یابد (حالت انبساطی). در حالت تراکمی عکس این حالت اتفاق می‌افتد و با افزایش n شیب نمودار کمتر و سطح زیر آن افزایش می‌یابد. لذا کار در فرآیند پلی‌تروپیک برابر با سطح زیر منحنی در دیاگرام پلی‌تروپیک می‌باشد.



شکل ۴-۵. مقایسه کار انجام شده در فرآیندهای مختلف بر روی نمودار $P-V$ در دو سیستم تراکمی و انبساطی

مقدار کار در فرآیند پلی‌تروپیک به صورت ذیل محاسبه می‌شود.

$$PV^n = mRT \Rightarrow P = \frac{mRT}{V^n}$$

حال با نوشتن فرمول (۴-۲) کار در فرآیند ترمودینامیکی و جاگذاری معادله فشار در فرآیند پلی‌تروپیک (فرمول (۴-۱۰)، کار نهایی برابر است با:

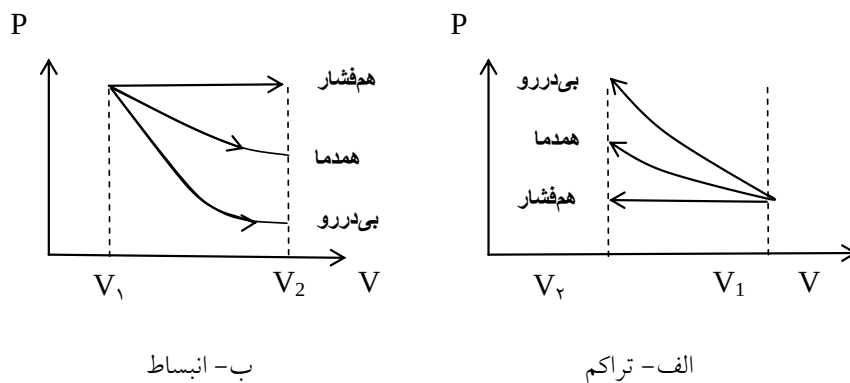
$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV \Rightarrow W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{mRT}{V^n} dV$$

$$W = \frac{V_1^{1-n}}{1-n} mRT \quad \text{or} \quad W = \frac{V_1^{1-n}}{1-n} \times PV_1^n \Rightarrow W = \left| \frac{PV}{1-n} \right|_{V_1}^{V_2}$$

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n} \quad (۱۱-۴)$$

کار نهایی در فرآیند پلی تروپیک به فشار و دمای سیستم وابسته می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم سطح زیر منحنی در فرآیندهای مختلف بیانگر کار انجام شده در آن فرآیند می‌باشد. سطح زیر منحنی در فرآیند تراکم به گونه‌ای است که فرآیند هم فشار کمترین و بی‌دررو یا آدیاباتیک بیشترین سطح را دارا می‌باشد (شکل ۴-۶). کار انجام شده هم به همین حالت تغییر می‌کند.

$$W_P < W_T < W_a \rightarrow \text{سطح هم فشار} > \text{سطح همدمای} > \text{سطح بی‌دررو}$$



شکل ۴-۶. مقایسه کار انجام شده در فرآیندهای مختلف بر روی نمودار P-V

سطح زیر منحنی در فرآیند انبساط هم طوری است که هم فشار بالاترین سطح ممکن و بی‌دررو در کمترین حالت قرار دارد

$$W_P > W_T > W_a \rightarrow \text{سطح هم فشار} > \text{سطح همدمای} > \text{سطح بی‌دررو}$$

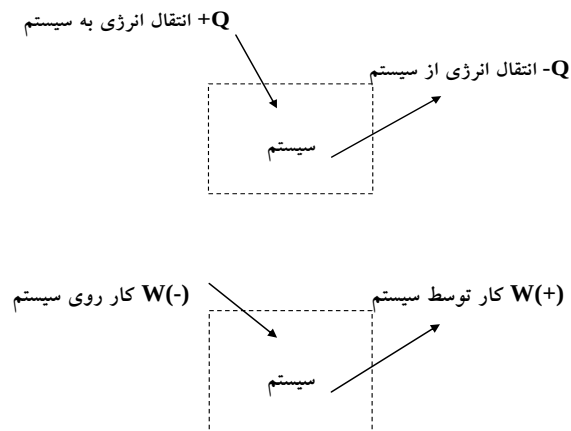
۳-۴ انرژی گرمایی

انتقال حرارت حاصل اختلاف دمای میان دو نقطه است که انتقال حرارت بین آن‌ها صورت می‌پذیرد. انتقال گرما عبارت است از انتقال انرژی بر اثر اختلاف دمای بین دو ماده تعریف می‌شود و در حقیقت کنش انتقال گرما از جسم A به جسم B همان انتقال انرژی است. در ابتدا هیچ یک از دو سیستم به تنهایی گرما ندارد ولی انرژی دارد و بعد از رسیدن به تعادل گرمایی در انتهای فرآیند، هیچ یک از دو سیستم گرما ندارد. علم ترمودینامیک در رابطه با سیستم‌هایی می‌باشد که در حال تعادل هستند و می‌توان از آن برای پیش بینی مقدار انرژی مورد نیاز برای تغییر سیستم از یک حالت تعادل به حالت دیگر تعادل استفاده کرد به عنوان مثال سرد شدن میله داغی را در نظر می‌گیریم که درون ظرفی از آب قرار می‌گیرد. با استفاده از ترمودینامیک می‌توان درجه حرارت نهایی تعادل میان میله و آب را به دست آورد اما مدت زمان لازم برای رسیدن به این شرایط تعادلی را ترمودینامیک مشخص نمی‌کند بلکه با علم انتقال حرارت می‌توان آن را به دست آورد. مثال دیگر در این رابطه، خنک شدن چای در محیط است که می‌توان از علم ترمودینامیک برای تعیین دمای نهایی تعادل چای و از علم انتقال حرارت برای تعیین دمای چای در هر لحظه قبل از تعادل استفاده کرد.

گرما به عنوان انرژی عبوری از مرز سیستم تعریف می‌شود و واحد آن در سیستم متریک کالری است و برابر است با مقدار گرمایی که به یک گرم آب داده می‌شود تا دمای آن را از $14/5$ درجه به $15/5$ درجه برساند. واحد گرما در سیستم انگلیسی BTU است و برابر است با مقدار گرمایی است که یک گرم آب داده می‌شود تا دمای آن را از $59/5$ درجه به $60/5$ درجه برساند.

مثالی از انرژی گرمایی را می‌توان به انداختن قطعه مس گرم در آب اشاره نمود که سبب گرم شدن آب و خنک شدن قطعه مس می‌گردد که عامل این کار انتقال انرژی گرمایی از مس به آب است.

برعکس کار انجام شده، همواره انتقال انرژی به سیستم مثبت و گرفتن انرژی از سیستم منفی می‌باشد شکل (۴-۷). فرآیندی که در آن انتقال گرما نباشد مقدار انرژی گرمایی صفر بوده و به آن فرآیند آدیاباتیک گویند.



شکل ۴-۷. فرآیند انتقال کار و گرما در یک سیستم

۴-۴ روش‌های انتقال گرما

برای انتقال حرارت میان دو جسم سه راه وجود دارد که ضمن معرفی آن‌ها به بررسی هر یک می‌پردازیم.

- انتقال حرارت هدایتی
- انتقال حرارت جابه‌جایی
- انتقال حرارت تشعشعی یا تابشی

۴-۴-۱ انتقال حرارت هدایتی (Conduction)

مکانیسم آن را باید در مفاهیم مولکولی جستجو کرد. توضیح اینکه دمای هر نقطه و میزان فعالیت و حرکت مولکولی در آن نقطه با هم در ارتباط مستقیم می‌باشند. تکاپو و حرکت مولکولی به مولکول‌های مجاور منتقل می‌شود. انرژی به واسطه تبادل مولکول‌ها انتقال می‌یابد به عبارتی انرژی توسط مولکول‌هایی که دمای بالاتر دارند به مولکول‌ها که دارای دمای کمتر هستند انتقال می‌یابد. این تبادل به واسطه هدایت یا انتقال صورت می‌گیرد. همچنین وجود الکترون‌های آزاد نیز در جسم عامل هدایت است که این عامل نقش عمده‌ای را در انتقال حرارت فلزات عهده دار است و به همین دلیل است که فلزات با رسانایی بالاتر قابلیت هدایت حرارتی بیشتری دارند.

انتقال حرارت متناسب با قابلیت هدایت حرارتی (K)، سطح کل انتقال حرارت (A) و گرادیان حرارت یا اختلاف دمای میان دو سوی سطح $\frac{dt}{dx}$ است. در هدایت، انتقال حرارت تحت تأثیر رفتاری که حرکت حجمی سیال دارد، قرار می‌گیرد مثل وزش باد روی ساختمان یا وزش هوا روی رادیاتور ماشین. قانون فوریه اساس محاسبات در فرآیند انتقال حرارت به حساب می‌آید (فرمول ۴-۱۲).

$$\dot{Q} = -KA \frac{dT}{dx} \quad (۴-۱۲)$$

$\dot{Q}$ = انرژی گرمایی بر حسب wat

A = مساحت کل، m^2

dT = گرادیانت یا شیب دما، K، یا $^{\circ}C$

K = رسانندگی، w/m.K

مقدار K به عنوان ضریب تساوی برای تبدیل تناسبات ذکر شده میان انتقال حرارت و دیگر پارامترهاست و برای مواد مختلف متفاوت است برای فلزات ۱۰۰، جامد غیر فلزی ۱-۱۰، مایعات ۰/۱-۱۰، مواد عایق ۰/۱، و گازها ۰/۱-۰/۱ w/m.K می‌باشد. بنابراین دو عامل بر مقدار ضریب انتقال حرارت مؤثر است که عبارتند از جنس و دما. مایعات دارای ضریب هدایت حرارتی بیشتری نسبت به گازها می‌باشند. علامت منفی در فرمول بیانگر جهت شار حرارتی است که همواره در جهت کاهش دما می‌باشد یا به عبارتی حرارت از دمای بالاتر به دمای پایین‌تر انتقال می‌یابد. در محدوده‌های کوچک پروفیل دما فرم خطی دارد.

مثال (۴-۴): در انتقال حرارت به روش هدایت، با فرض ثابت ماندن دمای دو سوی دیواره، با دو برابر شدن ضخامت دیواره آن، انتقال حرارت چند برابر می‌شود.

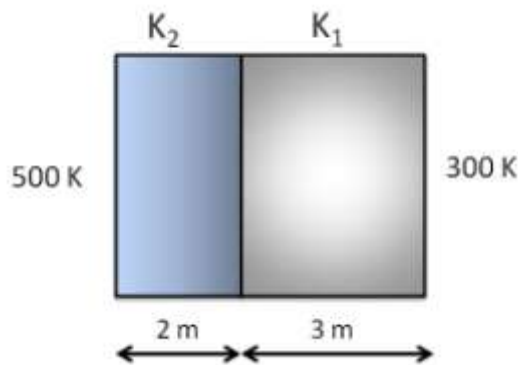
$$\dot{Q} = -KA \frac{dT}{dx}$$

با دو برابر شدن x، انتقال نصف خواهد شد

مثال (۴-۵): جداری به ضخامت ۱۰۰ mm که اختلاف دمای طرفین آن 40°C است در اختیار داریم. اگر ضریب هدایت حرارتی جداره 0.1 W/m.K باشد، جریان حرارتی بر واحد سطح این جداره در حالت پایا چند وات بر متر مربع $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ است.

$$\left| \frac{Q}{A} \right| = K \frac{dT}{dx} = 0.1 \times \frac{40}{0.1 \times 1.0} \Rightarrow = 40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

مثال (۴-۶): دیواره مرکبی به شکل زیر داریم که در حال انجام انتقال حرارت پایدار می‌باشد. اگر $K_2 = 2K_1$ و دماهای دو جدار خارجی دیواره مرکب به ترتیب 500K و 300K باشد، دمای فصل مشترک دو دیواره چند می‌باشد. مقدار شار انتقال حرارت در هر دو دیواره یکی می‌باشد.



اگر دمای فصل مشترک دو دیواره T باشد.

$$q = K_1 A \frac{500 - T}{2} \quad q = K_2 A \frac{T - 300}{3}$$

$$K_1 A \frac{500 - T}{2} = K_2 A \frac{T - 300}{3} = 2K_1 A \frac{T - 300}{3}$$

$$3 \times (500 - T) = (T - 300) \times 4 \Rightarrow T = \frac{2700}{7} = 386^{\circ}\text{K}$$

۴-۴-۲ انتقال حرارت جابه‌جایی (Convection)

در انتقال حرارت به روش جابه‌جایی علاوه بر حرکت تصادفی مولکول‌ها انرژی توسط حرکت توده‌ای از سیال نیز منتقل می‌شود. چون انتقال حرارت از طریق حرکت حجمی سیال بسیار مهم است. نمونه بارز انتقال به روش جابه‌جایی، وزش باد می‌باشد. اگر انتقال حرارت فقط و فقط بوسیله حرکت توده‌ای از سیال باشد به آن ادوآکسیون (Advection) یا جابه‌جایی افقی سیال گویند. در روش جابه‌جایی، مقدار انتقال حرارت (q) به اختلاف دمای سطح و جریان $(T_s - T_\infty)$ و نیز مساحت سطح (A) بستگی دارد.

$$q \propto A \quad , q \propto (T_s - T_\infty) \quad , q \propto A(T_s - T_\infty)$$

این تناسب را عددی مانند h به تساوی تبدیل می‌کند که به آن ضریب جابه‌جایی اطلاق می‌گردد. این ضریب مشخصات سیال عبوری از روی سطح و مشخصات جریان را در بر دارد. قانون فوق را که بر اساس موارد ذکر شده بیان شد به قانون سرمایش نیوتن معروف است (فرمول ۴-۱۳).

$$\dot{Q} = Ah\Delta T \quad (۴-۱۳)$$

h = ضریب انتقال گرما، $W/m^2.K$

A = سطح انتقال گرما، m^2

T_s = دمای سطح، K

T_∞ = دمای جریان، K

مقدار h برای حالت‌های مختلف انتقال متفاوت بوده و مقدار استاندارد در جدول (۴-۱) نشان داده شد.

جدول ۴-۱. ضریب انتقال گرما به روش جابه‌جایی

مایع	گاز	$h \left(\frac{W}{m^2.K} \right)$
۵۰-۱۰۰۰	۵-۲۵	جابه‌جایی طبیعی
۵۰-۲۰۰۰	۲۵-۲۵۰	جابه‌جایی تحت فشار

مثال (۷-۴): جسمی به دمای سطح 100°C در معرض جریان آزاد هوا با دمای 25°C قرار دارد. اگر ضریب جابه‌جایی h در این حالت $10\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ باشد. مقدار حرارت منتقل شده از واحد سطح جسم را محاسبه نمایید.

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= Ah\Delta T \Rightarrow \frac{Q}{A} = h\Delta T \\ &= 10(100 - 25) = 750 \rightarrow \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

عوامل مؤثر بر ضریب جابه‌جایی عبارتند از مشخصات جریان و خواص سیال می‌باشد. مشخصات جریان یا رژیم جریان با استفاده از عددی به نام رینولدز (Re) تعیین می‌شود. با استفاده از این عدد می‌توان تشخیص داد که جریان وضعیت آرام دارد یا مغشوش و یا در حال گذر از وضعیت آرام به مغشوش است. این عدد وابسته به چگالی جریان (ρ)، ویسکوزیته جریان (μ)، سرعت جریان (V)، فاصله از ابتدای صفحه (L)، و قطر لوله تحت جریان (D) می‌باشد.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (14-4)$$

خواص سیال که عددی بی بعد است به ویسکوزیته سینماتیکی سیال و ضریب پخش گرمایی سیال وابسته می‌باشد. انواع انتقال حرارت به روش جابه‌جایی عبارتند از جابه‌جایی آزاد و جابه‌جایی تحت فشار.

۳-۴-۴ تشعشع یا تابش (Radation)

مشخصه اصلی انتقال حرارت تشعشعی، عدم نیاز به ماده واسطه جهت انتقال انرژی می‌باشد. در این نوع انتقال حرارت انرژی می‌تواند از طریق امواج الکترومغناطیس از محلی به محل دیگر انتقال یابد. از کل انرژی دریافتی توسط جسم، قسمتی جذب، قسمتی عبور داده و قسمتی باز تابش میشود بر این اساس ضرائب جذب، عبور و انعکاس برای یک جسم در ارتباط با تشعشع قابل تعریف می‌باشد.

بر اساس رابطه استفن، جسمی با دمای سطح T_s ، از طریق تشعشع شار سطحی

انرژی حرارتی به اندازه زیر صادر می‌کند.

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \delta \cdot A \cdot (T_s^* - T_{sur}^*) \quad (۱۵-۴)$$

T_s = دمای سطح، K

T_{sur} = دمای محیط، K

δ = ضریب ثابت انتقال استفن، $W/m^2.K^4$

ε = تشعشع یا ضریب صدور

مقدار ضریب استفان (δ) در سیستم SI برابر با $5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$ می‌باشد. مقدار ε ضریب صدور است که شاخصی از توان صدور انرژی تشعشعی اجسام می‌باشد و به خواص فیزیکی و ظاهری سطح وابسته می‌باشد. ضریب صدور بیانگر میزان صدور انرژی از یک سطح در مقایسه با جسم سیاه می‌باشد و مقدار آن همواره بین صفر تا یک می‌باشد.

مقدار ضریب صدور برای سطوح مختلف در جدول (۲-۴) داده شده است. جسم سیاه بهترین صادر کننده انرژی تشعشعی می‌باشد و در دمای دلخواه انرژی تشعشعی صادر شده توسط جسم سیاه، بیشتر از اجسام دیگر در همان دما است.

جدول ۲-۴. ضریب انتقال گرما به روش تشعشع

مقدار ε	مشخصات سطوح
۰/۹۲	سطوح غیرفلزی
۰/۶-۰/۹	سطوح فلزی غیربراق
کمتر از ۰/۱	سطوح فلزی براق

مثال (۸-۴): یک صفحه سرامیکی گرد به قطر ۲۰ cm گرم شده و در دمای ثابت ۵۵۰K نگاه داشته شده است. اگر دمای محیط ۳۰۰K باشد، شدت اتلاف تابشی صفحه چند وات است (ضریب صدور سرامیک ۰/۹ می‌باشد)

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \varepsilon \cdot \delta \cdot A \cdot (T_s^* - T_{sur}^*) \\ \dot{Q} &= \frac{\pi \times (20 \times 10^{-2})}{4} \times 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} (550.4 - 300.4) \\ \dot{Q} &= 134 \text{ W}\end{aligned}$$

مثال (۴-۹): دو دیواره وسیع که دمای آنها 800°F و 1000°F می‌باشند. در صورتی که هر دو جسم سیاه فرض شوند، چه مقدار حرارت باید از دیوار سردتر انتقال یابد تا دیوار در دمای ثابت باقی ماند

$$\begin{aligned}T_{s1} &= \frac{1000 + 459.7}{1.8} = 810.94 \text{ K} \\ T_{s2} &= \frac{800 + 459.7}{1.8} = 699.83 \text{ K} \\ \frac{\dot{Q}}{A} &= \varepsilon \cdot \delta \cdot (T_s^* - T_{sur}^*) \\ \frac{\dot{Q}}{A} &= 5.67 \times 10^{-8} (810.94^4 - 699.83^4) = 10920.8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

۴-۵ مقایسه گرما (Q) و کار (W)

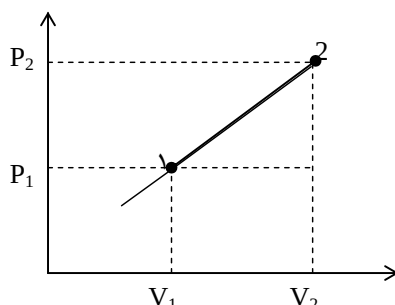
مهم‌ترین تشابه دو فرآیند کار و گرما عبارتند از:

- هر دو پدیده عبوری هستند، یعنی کار و گرما هیچ‌وقت وجود ندارد و موقعی وجود دارد که در سیستم تغییر حالت رخ دهد و از مرز سیستم عبور کند.
- هر دو در مرزهای سیستم مشاهده می‌شوند و انرژی عبوری از مرزهای سیستم را نشان می‌دهند.
- هر دو تابع مسیر هستند و دیفرانسیل‌های غیر دقیق‌اند.
- مهم‌ترین تفاوت دو فرآیند کار و گرما عبارت است از:
- انرژی حرارتی مثبت به معنی گرمای انتقال یافته به سیستم است. به عبارتی به واسطه اختلاف دما انرژی گرمایی به سیستم داده شده است.

- کار مثبت به معنی کار انجام شده توسط سیستم است. به عبارتی انرژی از سیستم خارج شده است و ارتباطی با اختلاف دما ندارد.

۴-۶ محاسبه کار در فشار و حجم متغیر

اگر سیلندر و پیستونی تحت نیروی مختلفی شامل نیروی فنر Kx ، فشار اتمسفر P_0 ، نیروی F ، وزن پیستون mg و همچنین فشار محفظه سیلندر قرار گیرد در این حالت $\sum f_{\downarrow \uparrow} = 0$ در نظر می‌گیریم و نمودار حاصله یک رابطه خطی از حجم می‌باشد:



شکل ۴-۸. کار انجام شده در فرآیند فشار و حجم متغیر

$$P = C_1 + C_2 V$$

مساحت را محاسبه می‌کنیم که عبارتست از مساحت ۱، ۲، V_1 ، V_2 ، ۱ از سطح زیر منحنی.

$$\begin{aligned} W = A &= A_1 + A_2 \\ &= \frac{1}{2} (P_2 - P_1)(V_2 - V_1) + (V_2 - V_1)P_1 \\ &= \left(\frac{P_2}{2} - \frac{P_1}{2} + P_1\right) \times (V_2 - V_1) = (V_2 - V_1) \times \left(\frac{P_1}{2} + \frac{P_2}{2}\right) \end{aligned}$$

$$W = \frac{1}{2} (P_1 + P_2)(V_2 - V_1) \quad (۴-۱۶)$$

فصل پنجم

قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص

اهداف

- در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:
۱. آشنایی با قانون اول ترمودینامیکی
 ۲. کاربرد قانون اول در فرآیندهای خاص ترمودینامیکی
 ۳. آشنایی با محاسبات آنتالپی و گرمای ویژه و روابط بین آنها

مقدمه

سیستم بسته‌ای را که در حال سکون است و میدان‌های خارجی هم بر آن بی تأثیرند در نظر بگیرید. همان‌طور که پیش از این شرح داده شد، یک سیستم بسته با محیط اطراف خود هیچ جرمی را مبادله نمی‌کند، درحالی‌که انرژی مبادله می‌کند. اکنون فرض کنید سیستم بسته یاد شده، کاری برابر با W و گرمایی برابر Q را با محیط اطراف خود مبادله نماید. **قانون اول ترمودینامیک** که به‌عنوان **قانون بقای انرژی** نیز شناخته می‌شود، می‌گوید که حالت تعادل ماکروسکوپی یک سیستم با کمیتی به نام انرژی درونی (U) بیان می‌شود.

قانون اول ترمودینامیک تنها بیانی از تئوری کار و انرژی یا قانون بقای انرژی است. یک آونگ ساده یا یک آونگ ایده‌آل برای همیشه به نوسان ادامه می‌دهد. فیلمی از یک آونگ که به جلو و عقب نوسان می‌کند را در نظر بگیرید. اگر ما فیلم را برعکس

نشان بدهیم، نخواهیم توانست آن را از حالت عادی تشخیص بدهیم. اما برداری (نشانگری) برای زمان وجود دارد. دامنه نوسان آونگ به تدریج کوچکتر می‌شود. اگر توپی را از ارتفاع خاصی رها کنید، در هر بار برخورد توپ با زمین، کمتر از دفعه قبل بالا خواهد آمد. فیلمی از این توپ در دنیای واقعی، هنگام پخش برعکس، متفاوت دیده خواهد شد. قطعات یخ در داخل فنجان چای ذوب می‌شوند در حالی که چای سردتر می‌شود.

قانون اول به ما اجازه می‌دهد که مقدار مجهول گرما یا کار لازم برای یک فرآیند را با استفاده از مقدار گرما و کار لازم برای فرآیندی متفاوت محاسبه نمائیم. بنابراین در هر سیکل یک سیستم جرم کنترل، انتگرال سیکلی انرژی گرمایی برابر با انتگرال سیکلی کار $(\oint Q = \oint W)$ است.

بحث کار در موتورها و خنک کردن با انتقال حرارت توأم است. گاهی کار با انتقال حرارت همراه نیست مثل سقوط آزاد که افزایش انرژی را در پی دارد. پس یک بیان ساده و روشن از قانون اول آن است که بگوییم انرژی درونی یک سیستم منزوی همواره ثابت است و مقدار آن در طی رویدادهایی که در سیستم رخ می‌دهد تغییر نمی‌کند. در یک سیستم منزوی انرژی‌ها طی رویدادهای گوناگون، تنها به هم تبدیل می‌شوند و یا از جایی به جای دیگر جریان می‌یابند. می‌توان دنیای دور و بر یک سیستم را به یک منبع کار و یک منبع گرما که ظرفیت هر کدام در مقایسه با سیستم بسته مورد مطالعه بسیار زیاد است محدود کرد. سیستم در این شرایط، تنها با این دو منبع در ارتباط است و با آن‌ها به ترتیب کار و گرما را مبادله می‌کند (شکل ۵-۱). به مجموع سیستم و دو منبع یاد شده، جهان سیستم می‌گویند. جهان هستی از بی‌نهایت جهان سیستمی درست شده است. جهان هر سیستم خود یک سیستم منزوی است. جهان خلقت که در آن زندگی می‌کنیم شامل تعداد بی‌شماری جهان سیستم است و در عین حال، جهان خلقت خود به منزله یک سیستم منزوی بسیار بزرگی است. بدین سان، تعمیمی از قانون اول ترمودینامیک بدین شیوه است که بگوییم انرژی در جهان خلقت ثابت است و در جریان رویدادهای بی‌شماری که در هر لحظه در آن رخ می‌دهند، تنها انرژی از شکلی به شکل دیگر تبدیل می‌شود و یا از جایی به جای دیگر جریان می‌یابد.



شکل ۱-۵. سیستم و منابع های گرمایی و مکانیکی در ارتباط با آن

بر اساس قانون اول ترمودینامیک می توان نتیجه گرفت که مجموع انرژی و ماده تشکیل دهنده جهان خلقت ثابت است و در جریان رخ دادن این همه رویدادهای شگفت انگیز و آموزنده در آن، تنها انرژی ها به هم تبدیل می شوند.

۱-۵ قانون اول ترمودینامیک برای سیستم بسته

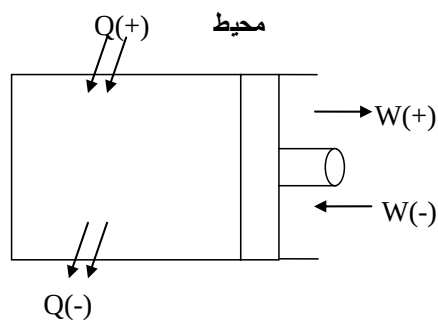
همواره توازن انرژی در یک سیستم را می توان برای قانون اول ترمودینامیک تعریف کرد که شامل کار و انتقال حرارت می باشد. این دو انرژی از مرزهای بسته سیستم می تواند وارد یا خارج گردد شکل (۵-۲). در قانون اول ورود و خروج جرم نداریم. **قانون اول ترمودینامیک** که به عنوان **قانون بقای کار** و انرژی نیز شناخته شده است، تنها بیانی از تئوری کار و انرژی است. بیان ریاضی قانون اول را به صورت زیر می توان نوشت:

$$Q = W + \Delta u \quad (۱-۵)$$

U : انرژی داخلی سیستم

Q : تبادل حرارت میان سیستم و محیط

W : کار انجام گرفته



شکل ۲-۵. تبادل کار و حرارت در یک سیستم

بنابراین تغییرات انرژی داخلی برابر است با:

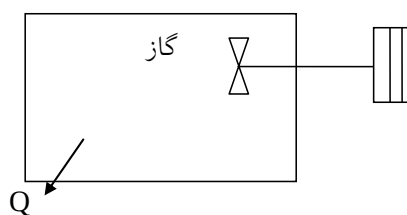
$$\Delta u = Q - W \quad (۲-۵)$$

در سیستم تراکم؛ انتقال حرارت از محیط به سیستم است. لذا انرژی حرارتی مثبت $Q (+)$ و کار داده شده به سیستم منفی $W (-)$ می‌باشد.

$$\Delta u = Q - (-W) \quad (۳-۵)$$

۲-۵ کار و حرارت در سیستم جرم کنترل

فرض سیستم بسته که گاز در آن است را مطابق شکل (۳-۵) در نظر می‌گیریم. به واسطه کار فن مقدار انرژی حرارتی Q داخل سیستم افزایش می‌یابد



شکل ۳-۵. تغییرات انرژی حرارتی در یک سیستم بسته

در مقایسه کار و حرارت این دو پارامتر با هم متناسب هستند. در تعادل کار و حرارت می‌توان نوشت که انتگرال سیکلی حرارت و کار با هم متناسب می‌باشد و با وارد کردن ضریب J با هم مساوی می‌شوند (فرمول ۴-۵).

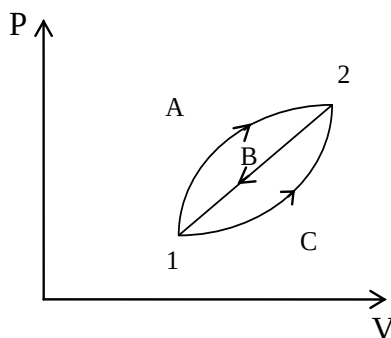
$$J \oint \delta Q = \oint \delta W \quad (4-5)$$

J ضریب نسبت آحاد است

چون هر دو انرژی هستند و با هم متناسب می‌باشند. بر اساس شکل (۴-۵) تفاضل تغییرات حرارت و کار ($\delta Q - \delta W$) مستقل از مسیر است و به حالت اولیه و نهایی بستگی دارد. در اثبات این مسئله، مقایسه ای بین دو مسیر متفاوت رفت (C, A) و مسیر برگشت (B) انجام شد که با توجه به فرمول (۴-۵) به شرح ذیل می‌باشد.

$$\int_1^2 \delta Q_A + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_A + \int_2^1 \delta W_B$$

طبق قانون اول نیوتن، انتگرال کار انجام شده از نقطه ۱ تا ۲ در مسیر A و برگشت از مسیر B برابر با انرژی گرمایی همان مسیر می‌باشد.



شکل ۴-۵. تغییرات حرارت و کار در نمودار P-V

حال همین رابطه را موقعی که رفت از مسیر C و برگشت از مسیر B باشد براساس معادله (۴-۵) محاسبه می‌نماییم.

$$\int_1^2 \delta Q_C + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_C + \int_2^1 \delta W_B$$

با تفریق دو رابطه فوق عبارت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \int_1^2 \delta Q_A - \int_2^1 \delta Q_C &= \int_1^2 \delta W_A - \int_2^1 \delta W_C \\ \int_1^2 (\delta Q - \delta W)_A &= \int_1^2 (\delta Q - \delta W)_C \end{aligned}$$

مقدار C و A فرآیندی اختیاری بین دو سیکل ۱ و ۲ هست. رابطه فوق بیانگر این است که تفاضل انرژی و کار در مسیر A برابر با مسیر C است. بنابراین کمیت $(\delta Q - \delta W)$ برای تمام فرایندها بین نقاط ۱ و ۲ یکسان است و به حالت اولیه و نهایی وابسته و مستقل از مسیر است و تابع نقطه‌ای می‌باشد و دیفرانسیلی از یک خاصیت جرم کنترل است که این خاصیت را انرژی جرم کنترل می‌نامند. لذا دیفرانسیل آن خاصیتی از جرم را نشان می‌دهد که این خاصیت همان انرژی جرم است (dE).

$$dE = \delta Q - \delta W$$

$$\Rightarrow E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2 \quad (5-5)$$

انرژی در طی فرآیند برابر با تفاضل انرژی در ابتدا و انتهای مسیر می‌باشد. مقدار انرژی کل سیستم (E) برابر است با انرژی پتانسیل (PE)، انرژی جنبشی (KE) و انرژی داخلی (U) یک سیستم جرم کنترل می‌باشد..

$$\delta Q - \delta W = dU + d(KE) + d(PE)$$

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = dU + \frac{1}{2} m V^2 + mgz \quad (5-6)$$

مثال (۵-۱): سنگی به جرم ۱۰ کیلوگرم و ظرفی حاوی ۱۰۰ کیلوگرم آب مایع در اختیار داریم. ابتدا سنگ در فاصله ۱۰ متر بالای سطح آب قرار دارد. سنگ و آب در دمای یکسانند. سپس سنگ به داخل آب نفوذ می‌کند. کمیت‌های ΔU ، ΔK ، ΔP ، Q ،

W را در حالت‌های زیر محاسبه نمائید.

الف) سنگ در آستانه ورود به آب:

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = dU + \frac{1}{2}mV^2 + mgz$$

فرض از Z_1 به Z_2 رسید

$$U\Delta = 0, \quad W = 0, \quad Q = 0$$

$$\Delta KE = -\Delta PE \Rightarrow \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) = -mg(z_2 - z_1)$$

$$\Delta KE = -10 \times 9.8(0 - 10) = 0.98 \rightarrow KJ$$

ب) سنگ در ظرف در حال سکون:

در این حالت انرژی جنبشی و داخلی تغییر می‌کند و مابقی صفر است

$$\Delta KE = -\Delta U \Rightarrow \Delta U = -0.98 KJ$$

ج) انتقال گرما طوری است که سنگ و آب در دمای یکسان و آهسته:

در این حالت انرژی جنبشی و پتانسیل صفر است و کار برابر با صفر در نتیجه

انتقال گرما برابر با انرژی داخلی سیستم می‌باشد.

$$Q = \Delta U \Rightarrow Q = -0.98 KJ$$

انرژی داخلی یک خاصیت ترمودینامیکی است یعنی تابع ویژگی‌های سیستم در

یک وضعیت معین است نه تابع مسیر سیستم. به عبارتی انرژی داخلی U یک خاصیت

مقداری است چون به جرم وابسته است و فقط تابع وضعیت سیستم در همان نقطه

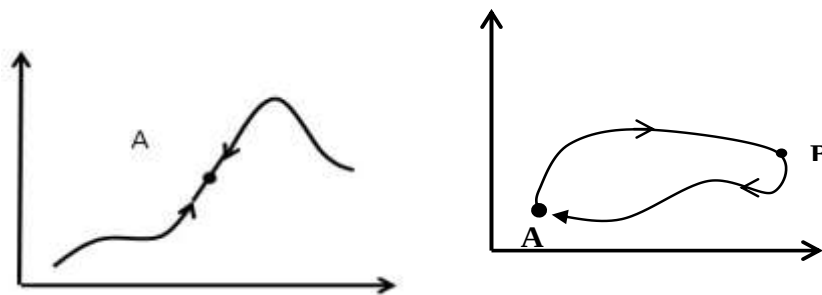
است. اگر ابتدا و انتهای فرآیند به یک نقطه برسد تغییرات انرژی داخلی صفر است

شکل (۵-۵). قانون اول به عنوان قانون پایستاری انرژی برای یک سیکل بیان می‌شود.

انرژی داخلی ویژه برابر با تقسیم انرژی داخلی کل به جرم می‌باشد.

$$u = \frac{U}{m}$$

(۷-۵)



شکل ۵-۵. تغییرات انرژی داخلی در یک فرآیند کامل

در جداول ترمودینامیک سری ب، انرژی داخلی همراه با سایر خواص جدول بندی شده است. انرژی داخلی مایع اشباع U_f ، انرژی بخار اشباع U_g و همچنین در ناحیه دو فازی ما باید تفاوت بین انرژی داخلی مایع و بخار اشباع U_{fg} را بخوانیم. لذا انرژی داخلی کل برابر است با:

$$U = U_f + U_g$$

$$mu = u_f m_f + u_g m_g$$

$$u = u_f + xu_{fg}$$

(۸-۵)

مثال (۲-۵): انرژی داخلی ویژه بخار آب اشباع با فشار ۰/۶ Mpa و کیفیت ۹۵٪ را محاسبه نمایید.

از جدول ترمودینامیکی سری ب، با فشار مشخص می‌توان انرژی داخلی را محاسبه نمود. با فشار ۶۰۰ کیلوپاسکال به جدول آب اشباع رفته و مقادیر انرژی داخلی را با توجه به دو فازی بودن محاسبه می‌نمائیم.

$$u_f = ۶۶۹/۹$$

$$u_{fg} = ۱۸۹۷/۵$$

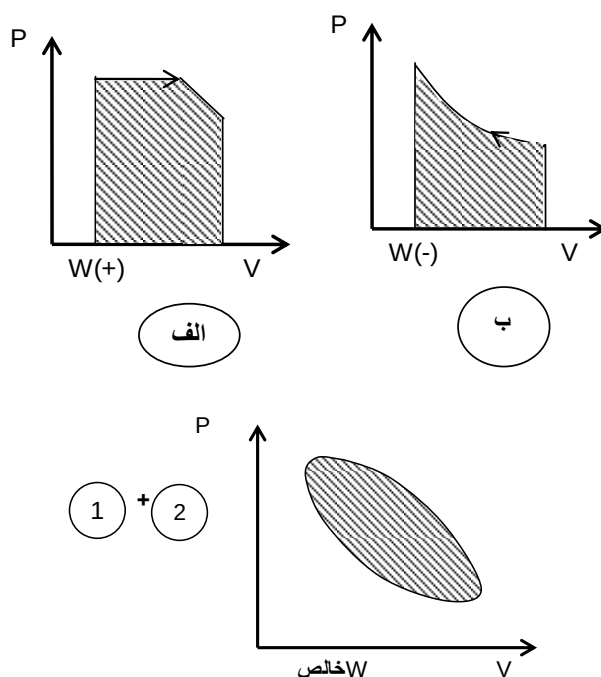
$$u = ۶۶۹/۹ + ۰/۹۵ \times ۱۸۹۷/۵ = ۲۴۷۲/۵ \rightarrow \text{KJ}$$

در یک سیکل بسته سطح داخلی سیکل در دیاگرام (P-V) برابر با کار انجام شده است.

کار مثبت ($+W$) حالت انبساط است که در جهت ساعت گرد می‌باشد و کار منفی ($-W$) حالت تراکم سیستم بوده و در خلاف جهت حرکت ساعت است. کار در یک سیستم برابر است با مجموع کار مثبت (انبساط) و کار منفی (تراکم) در همان سیستم که در شکل به صورت کار خالص نشان داده شد (شکل ۵-۶). کار در یک سیکل برابر با انتگرال سیکلی فشار در حجم می‌باشد.

$$w = \oint P dv$$

$$w = \oint \delta w = \oint \delta Q$$

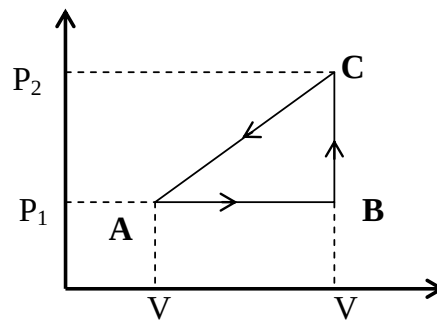


شکل ۵-۶. محاسبه کار در فرآیند انبساطی (الف)، تراکمی (ب) و کار خالص

اگر مقدار ΔU برابر با صفر باشد در نتیجه کار انجام شده برابر با انتقال حرارت به سیستم می‌باشد

$$Q - W = 0 \Rightarrow Q = W$$

نکته مهمی که در یک سیکل می‌توان گفت این است که علامت منفی کار نمایانگر مصرف کننده قدرت یا انتقال حرارت به محیط و علامت مثبت کار نمایانگر تولید کننده قدرت یا انتقال حرارت به سیستم می‌باشد.



شکل ۵-۷. محاسبه کار در فشار و حجم متغیر

در نمودار (۵-۷) کار انجام شده برابر با سطح داخلی نمودار می‌باشد.

$$W = \frac{1}{2} AB \times BC$$

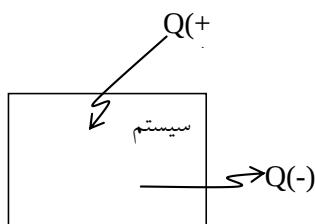
$$W = \frac{1}{2} (V_2 - V_1) \times (P_2 - P_1) \quad (۵-۹)$$

$$= \text{واحد} = \text{m}^3 \times \text{Pa} = \text{Jol}$$

۳-۵ قانون اول ترمودینامیک و فرایندهای خاص

۳-۵-۱ کار در فرآیند هم حجم (Iso-volume)

کار انجام شده (w) در این فرآیند صفر است. چون سطح زیر منحنی صفر است. عامل تغییر در انرژی داخلی سیستم، انتقال حرارت بین سیستم و محیط انجام می‌شود. با انتقال حرارت (Q) به سیستم، انرژی داخلی افزایش می‌یابد و برعکس با گرفتن حرارت از سیستم، انرژی داخلی کاهش می‌یابد.



شکل ۸-۵. وضعیت تبادل انرژی حرارتی در یک سیستم

$$\Delta u = Q - W \quad \Rightarrow \quad \Delta u = Q$$

در کلیه فرآیندها، انرژی داخلی Δu از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\Delta u = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1} \quad (۱۰-۵)$$

γ ضریب اتمیسیته است که برابر است با نسبت ظرفیت گرمایی در فشار ثابت (C_p) به ظرفیت گرمایی در حجم ثابت (C_v) و همواره بزرگ‌تر از یک می‌باشد. در فرآیند هم حجم، $V_1 = V_2$ می‌باشد بنابراین:

$$\Delta u = \frac{(P_2 - P_1) \times V}{\gamma - 1} = Q \quad (۱۱-۵)$$

مثال (۳-۵): گازی با ضریب اتمیسیته ۱٫۴ در حجم ثابت ۱ m^3 از فشار ۱۰۰ kPa به ۲۰۰ kPa رسیده است. مقدار انتقال حرارت به گاز را محاسبه نمایید.

$$Q = \frac{(P_2 - P_1) \times V}{\gamma - 1} \Rightarrow \frac{200 - 100}{1.4 - 1} \times 1 = 250 \text{ kJ}$$

۲-۳-۵ قانون اول و فرآیند هم‌دما (Isotherm)

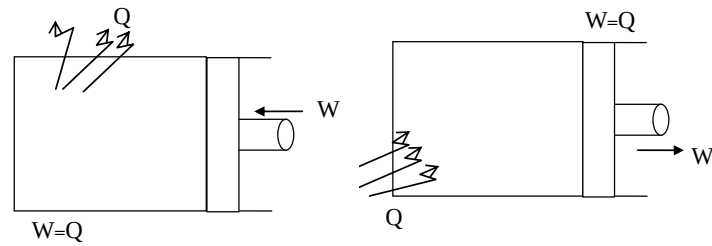
انرژی داخلی در گازهای ایده‌آل فقط تابع دما است. اگر دما تغییر نکند، انرژی تغییر نمی‌کند. اگر انرژی داخلی ثابت باشد، می‌توان گفت که دمای گاز ایده‌آل طی آن فرآیند

ثابت بوده است. در فرآیند همدم، انرژی داخلی صفر است.

$$\Delta u = Q - W$$

$$\Delta u = 0$$

$$Q - w = 0 \Rightarrow Q = W$$



شکل ۹-۵. انتقال کار و حرارت در فرآیند هم دم

در تراکم همدم، به اندازه کار تراکم از سیستم حرارت گرفته می‌شود و در انبساط همدم، به اندازه کار انبساط به سیستم حرارت داده می‌شود شکل (۹-۵). انتقال حرارت در فرآیند همدم به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$W = Q = mRT \ln \left(\frac{V_r}{V_1} \right) \quad (۱۲-۵)$$

یا

$$Q = mRT \ln \left(\frac{P_1}{P_r} \right) \quad (۱۳-۵)$$

یا

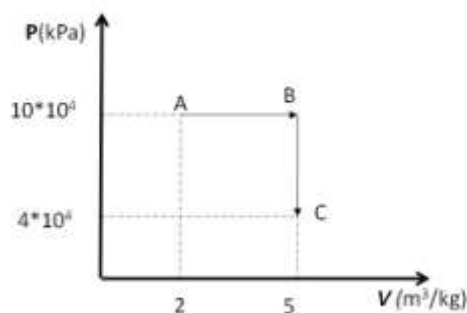
$$Q = PV \ln \left(\frac{V_r}{V_1} \right) \quad \Rightarrow \quad PV \ln \left(\frac{P_1}{P_r} \right) \quad (۱۴-۵)$$

همان‌طور که می‌دانیم انرژی درونی یک گاز ایده‌آل تابع دم است. لذا در فرآیند

قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص ۹۱

دما ثابت گاز ایده‌آل، کار مبادله شده با حرارت مبادله شده بین سیستم و محیط برابر است.

مثال (۴-۵): یک مول گاز تک اتمی ایده‌آل در یک فرآیند آرمانی مسیر A تا C را طی می‌کند. مقدار (Q-W) در طی این مسیر را محاسبه نمایید.



با توجه به حاصل ضرب (PV) در نقاط A و C و برابر بودن آن‌ها بیانگر این است که این دو نقطه همدم هستند. بنابراین $U_C = U_A$ می‌باشد.

$$(PV)_A = (10 \times 10^4)(2 \times 10^{-3}) = 200 \rightarrow \text{kJ}$$

$$(PV)_C = (4 \times 10^4)(5 \times 10^{-3}) = 200 \rightarrow \text{kJ}$$

$$\Delta U = (U_C - U_A) = 0 \Rightarrow Q - W = 0$$

۳-۳-۵ قانون اول و فرآیند هم‌فشار (Iso-bar)

در این فرآیند، رابطه قانون اول به همان صورت کلی استفاده می‌شود. و هیچ‌یک از ارکان رابطه وضعیت خاصی مثل فرآیندهای قبلی پیدا نمی‌کند. با توجه به روابط عمومی Δu (فرمول ۱۰-۵) در فرآیند هم‌فشار داریم:

$$\Delta u = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1}$$

در فرآیند هم‌فشار $P_1 = P_2$ در نتیجه انرژی داخلی برابر است با

$$\Delta u = \frac{P(V_2 - V_1)}{\gamma - 1} \quad (15-5)$$

از طرفی کار انجام شده برابر با

$$W = \frac{P(V_2 - V_1)}{1 - n}$$

بنابراین رابطه بین کار و انرژی داخلی در فرآیند همدمای به صورت فرمول (۱۶-۵) تعریف می‌شود.

$$\Delta u = \frac{W}{\gamma - 1} \quad (16-5)$$

همان‌طور که می‌دانیم رابطه بین کار و انرژی حرارتی و انرژی داخلی در قانون اول به صورت زیر تعریف شد

$$\Delta u = Q - W$$

با قرار دادن معلومات انرژی داخلی و کار در فرآیند همدمای در رابطه قانون اول ترمودینامیکی، معادله به صورت ذیل نوشته می‌شود.

$$\frac{P(V_2 - V_1)}{\gamma - 1} = Q - P(V_2 - V_1)$$

قانون اول در فرآیند هم‌فشار

$$\frac{W}{\gamma - 1} = Q - W$$

$$\frac{W}{\gamma - 1} + W = Q$$

$$\frac{\gamma \times W}{\gamma - 1} = Q$$

قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص ۹۳

$$\frac{Q}{W} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \quad (17-5)$$

با جایگزینی مقدار کار انجام شده در فرمول (۱۷-۵) رابطه زیر به دست می آید.

$$Q = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P(V_2 - V_1) \quad (18-5)$$

مثال (۵-۵): اگر کار انجام شده در یک فرآیند هم فشار بر روی گازی ایده آل با ضریب اتمیسیته $1/3$ ، 300 kJ باشد. مقدار حرارت مبادله شده میان گاز و محیط چقدر می باشد.

$$Q = \frac{\gamma}{\gamma - 1} W$$

$$Q = \frac{1/3}{1/3 - 1} \times 300 = 1300 \rightarrow \text{kJ}$$

مثال (۶-۵): در یک فرآیند هم فشار بر روی مقدار مشخصی از گاز ایده آل با ضریب اتمیسیته γ کار انجام شده است. نسبت $\frac{Q}{\Delta U}$ را محاسبه نمایید.

$$\Delta U = \frac{P(V_2 - V_1)}{\gamma - 1}$$

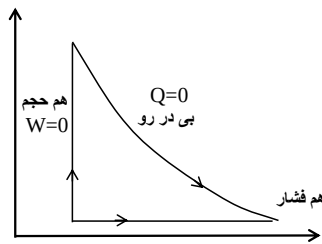
$$Q = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P(V_2 - V_1)$$

در نتیجه نسبت مقدار حرارت به انرژی داخلی برابر است با:

$$\frac{Q}{\Delta U} = \gamma$$

۴-۳-۵ قانون اول و فرآیند بی دررو (Adiabatic)

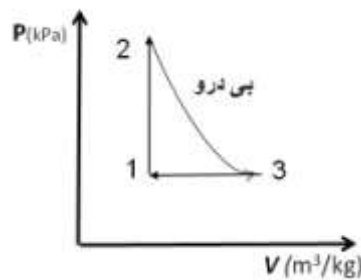
در فرآیند بی دررو، انتقال حرارت صفر است و در نقطه مقابل فرآیند هم حجم که کار صفر است، می باشد.



شکل ۵-۱۰. مقایسه فرآیندهای هم فشار، هم حجم و بی درو

$$\Delta U = Q - W \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta U = -W}$$

مثال (۷-۵): گازی ایده آل در یک سیستم، سیکل نشان داده شده را طی می کند. در این سیکل، کار انجام شده (+20 J) است. اگر در فرآیند هم حجم، حرارت جذب شده توسط سیستم (+25 J) باشد. حرارت مبادله شده را در فرآیند هم فشار چقدر است.



$$\Delta U = 0 = Q - W$$

برای کل سیکل

$$0 = {}_1Q_2 + {}_2Q_3 + {}_3Q_1 - W$$

$$0 = +25 + 0 + {}_3Q_1 - 20 \Rightarrow {}_3Q_1 = -5J$$

۵-۳-۵ قانون اول و فرآیند پلی تروپیک

فرآیند پلی تروپیک تابعی میان فشار و حجم را بر اساس توان پلی تروپیک معرفی می کند و برابر با مقدار ثابتی می باشد.

$$PV^n = cte$$

اگر مقدار $P_2 V_2 - P_1 V_1$ را به اختصار $\Delta(PV)$ نمایش دهیم. براساس قانون عمومی معرفی شده برای ΔU ، رابطه جدیدی را بر اساس انرژی حرارتی می‌توان نوشت.

$$\Delta U = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1}$$

$$(۱) \Delta U = \frac{\Delta(PV)}{\gamma - 1}$$

$$(۲) W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} = \frac{\Delta(PV)}{1 - n}$$

طبق قانون اول نیوتن، مقدار $\Delta u = Q - W$ و براساس تعریف انرژی داخلی:

$$\Delta U = \frac{\Delta(PV)}{\gamma - 1} = Q - \frac{\Delta(PV)}{1 - n}$$

$$Q = \frac{(n - \gamma) \times \Delta(PV)}{(n - 1)(\gamma - 1)} \quad (۱۹-۵)$$

بنابراین انرژی گرمایی در ارتباط با ضریب اتمیسیته، و تغییرات فشار و حجم و همچنین ضریب n می‌باشد.

در فرآیند تراکم پلی تروپیک در یک گاز ایده آل، تغییرات دما ΔT باید با کار W هم علامت باشد. چون در فرآیند تراکمی، کار منفی است و ΔT نیز منفی است یا به عبارتی دما کاهش یافته است. بنابراین حرارت مبادله شده با توجه به فرمول (۱۹-۵) و بر اساس پارامتر جرم دما بشرح فرمول (۲۰-۵) می‌باشد.

$$Q = \frac{(n - \gamma) \times mR\Delta T}{(n - 1)(\gamma - 1)} \quad (۲۰-۵)$$

مثال (۸-۵): در فرآیند پلی تروپیک با توان ۱/۴ روی گازی با ضریب اتمیسیته ۱/۳، مقدار انتقال حرارت به محیط ۲۰ kJ است. کار انجام شده را محاسبه نمایید.

$$Q = \frac{(n - \gamma) \times \Delta(PV)}{(n - 1)(\gamma - 1)}$$

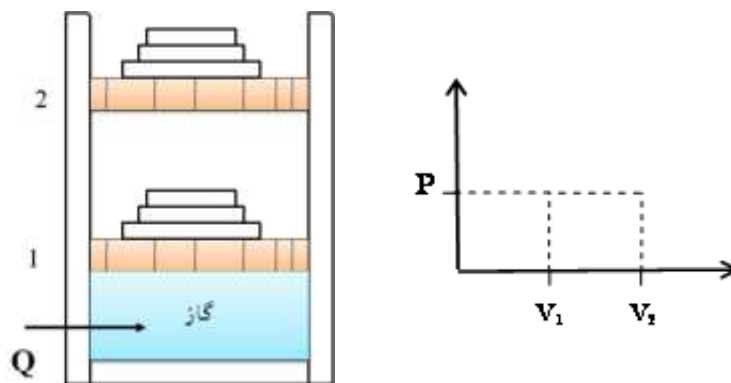
$$-20 = \frac{(1.4 - 1.3) \times \Delta(PV)}{(1.4 - 1)(1.3 - 1)}$$

$$\Delta(PV) = -24 \rightarrow \text{kJ}$$

$$W = \frac{\Delta(PV)}{1 - n} = \frac{-24}{1 - 1.4} = 60 \rightarrow \text{kJ}$$

۴-۵ آنتالپی سیستم و مفهوم آن

مفاهیم گرما، فشار و حتی انرژی درونی موضوعاتی هستند که برای ما کم‌وبیش ملموس می‌باشند اما در خصوص مفهوم فیزیکی آنتالپی موضوع به این سادگی نیست و برای نزدیک شدن به این درک، لازم است قانون اول ترمودینامیک را در نظر بگیرید. همان‌طور که می‌دانیم این قانون در واقع بیانی است از قانون پایستگی انرژی و با این توضیح اضافی که گرما نیز صورتی از انرژی است. در ترمودینامیک، با بعضی فرایندها که دارای خواص ترکیبی هستند مواجه می‌شویم. و این ترکیبات جزء خواص ماده اند که تغییر حالت می‌دهد. مثل فرایند شبه تعادلی در فشار ثابت که در این فرایند فرض بر این است که $P = 0$, $K = 0$ باشد.



شکل ۵-۱۱. فرایند شبه تعادلی در فشار ثابت

همه کم و بیش درکی شهودی از مفاهیم گرما، فشار و حتی انرژی درونی داریم اما به نظر می‌رسد در خصوص مفهوم فیزیکی آنتالپی این گونه نباشد. برای نزدیک شدن به این درک، قانون اول ترمودینامیک را در نظر بگیرید. همان‌طور که می‌دانیم این قانون در واقع بیانی است از قانون پایستگی انرژی و با این توضیح اضافی که گرما نیز صورتی از انرژی است. برای توضیح بیشتر به شکل (۵-۱۱) توجه کنید. مقداری گاز در داخل سیلندر محبوس است. حال اگر به سیستم حرارت بدهیم گاز تحت فشار ثابت منبسط می‌شود یعنی سیستم از حالت (۱) به حالت (۲) می‌رسد، چون در این سیستم تغییر مرز انجام می‌گیرد. در این فرآیندها قانون اول ترمودینامیک در یک سیستم بسته به طور کمی به صورت $dQ = dU + dW$ بیان می‌کنند. کمیت‌های W, U, Q به ترتیب گرما، انرژی درونی و کار را نشان می‌دهند و d معرف تفاضل یا اختلاف است.

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2 \quad (۵-۲۰)$$

هرگاه در فشار ثابت حجم دستگاهی به مقدار کوچکی تغییر کند، دستگاه به اندازه $dW = PdV$ روی محیط کار انجام می‌دهد و یا بر عکس از طرف محیط روی دستگاه کار انجام می‌شود.

$${}_1W_2 = P \int_1^2 dv = P(v_2 - v_1)$$

حال فرض کنید در یک فرآیند ترمودینامیکی، انرژی درونی و حجم دستگاهی تغییر کند.

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + P_2V_2 - P_1V_1 \quad (۵-۲۱)$$

$${}_1Q_2 = (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1)$$

در این صورت به کمک قانون اول ترمودینامیک و رابطه کار در فرآیند هم فشار به سادگی به رابطه‌ی $dQ = d(U + PV)$ می‌رسیم. کمیت داخل پرانتز یعنی $U + PV$ را با H نشان می‌دهند و انتقال گرما، بر حسب تغییر کمیت $U + PV$ می‌باشد که این کمیت را آنتالپی می‌نامیم: یعنی گرمای جذب شده به وسیله سیستم در

واکنش فشار ثابت (فرمول ۵-۲۲).

$$H = U + PV \quad (۵-۲۲)$$

بنابراین، در فرآیندی هم فشار گرمای داده شده یا گرفته شده از سیستم با تغییر آنتالپی آن سیستم برابر است. از همین رو آنتالپی را محتوای گرمایی سیستم نیز می‌نامند. از آنجا که بیشتر فرایندها در فشار ثابت انجام می‌شود مفهوم آنتالپی کاربرد زیادی دارد.

در گازها انرژی جنبشی در یک نقطه بیشتر از نیروهای جاذبه است، بطوری که اتم‌ها و مولکول‌ها کاملاً از یکدیگر جدا می‌شوند. مجموعه اتم‌ها منبسط می‌شوند و حجم فضایی را که در آن قرار دارند، اشغال می‌کنند. در تعریف آنتالپی سیستم می‌توان گفت که، تابعی ترمودینامیکی است که با مجموع انرژی درونی سیستم و حاصل ضرب حجم در فشار آن (در فشار ثابت) در محیط سیستم، هم‌ارز است. به عبارت دیگر گرمای جذب شده به وسیله واکنشی که در فشار ثابت انجام می‌گیرد، برابر با تغییر آنتالپی سیستم است.

اگر به یک سیستم انرژی گرمایی (q) داده شود، انرژی درونی آن (u) افزایش می‌یابد، و اگر سیستم روی محیط کار (w) انجام دهد، انرژی درونی آن کاهش می‌یابد به طوری که:

$$du = dq + dw$$

که در آن کار انجام توسط سیستم منفی در نظر گرفته می‌شود. برای یک سیستم پتانسیلی که کار انبساطی انجام دهد، تغییرات آنتالپی (dH) یک سیستم برابر با گرمای اعمال شده بر سیستم است. بنابراین برای تغییرات جزئی سیستم داریم $dPdv$ حاصل ضرب دو مقدار کوچک است که باید از آن صرف نظر کرد. در نهایت به قسمت Pdw توجه کنید. اگر سیستم هیچگونه کار الکتریکی یا مکانیکی و ... انجام ندهد، تنها کاری که می‌تواند انجام دهد، کار ناشی از PV (انبساط) است.

آنتالپی، همانند انرژی داخلی، تابعی از حالت سیستم و مستقل از مسیری است که به آن حالت می‌رسد. و در تعریف آن می‌توان گفت که یک خاصیت ترمودینامیکی

است و وابسته به مسیر فرآیند نیست. همانند حجم ویژه و انرژی داخلی، از آنتالپی کل هم صحبت می‌شود. آنتالپی نیز همانند دیگر پارامترهای ترمودینامیکی، اگر بر واحد حجم تقسیم شود مقدار مخصوص یا ویژه آن بیان می‌شود.

$$v = \frac{V}{m}$$

حجم مخصوص

$$u = \frac{u}{m}$$

انرژی داخلی مخصوص

$$h = \frac{H}{m}$$

آنتالپی مخصوص

در ناحیه دو فازی، حالت مایع و گاز را برای ماده خالص در نظر می‌گیریم و بر این اساس آنتالپی مخصوص را از فرمول (۲۳-۵) محاسبه می‌نماییم.

$$h = u + pv$$

$$h = h_f + xh_{fg} \quad (23-5)$$

$$xh_{fg} = h_g - h_f$$

چون u انرژی داخلی و کار تابع دما است پس در یک گاز ایده‌آل، آنتالپی سیستم هم تابع دما است. انتقال گرما در یک فرآیند شبه تعادلی با فشار ثابت برابر با تغییر در آنتالپی سیستم است.

$$\begin{aligned} {}_1Q_2 &= U_2 - U_1 + {}_1W_2 \\ {}_1Q_2 &= m(u_2 - u_1) + m(P_2v_2 - P_1v_1) \\ {}_1Q_2 &= m(u_2 + P_2v_2) + m(u_1 - P_1v_1) \end{aligned}$$

$${}_1Q_2 = m(h_2 - h_1) \quad (24-5)$$

آنتالپی، همانند انرژی داخلی، تابعی از حالت سیستم و مستقل از راهی است که

به آن حالت می‌رسد. در فرآیند فشار ثابت انتقال حرارت بین محیط و سیستم برابر با تغییرات آنتالپی سیستم می‌باشد.

$$\Delta U = Q - W$$

$$U_2 - U_1 = Q - P(V_2 - V_1)$$

$$\Rightarrow (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) = Q$$

$$H_2 - H_1 = Q = \Delta H \quad (5-25)$$

مثال (۵-۹): سیستمی در فشار ثابت منبسط شده است، انتقال حرارت به سیستم برابر است با

- | | |
|----------------------|------------------|
| الف) تغییر آنتروپی | ب) کار انجام شده |
| ج) تغییر انرژی داخلی | د) تغییر آنتالپی |
| جواب (د) صحیح است | |

۵-۵ گرمای نهان

در دمای معمولی، انتقال گرما به درون محصولات و مواد غذایی معمولاً با تغییرات قابل ملاحظه دما همراه است. چون این تغییرات دما به وسیله لمس با دست قابل احساس و یا با دماسنج قابل اندازه‌گیری است، به آن تغییرات گرمای محسوس می‌گویند. اما تغییر از یک فاز به فاز دیگر علی‌رغم اینکه با انتقال انرژی گرمایی همراه است، هیچ‌گونه تغییری در دما ایجاد نمی‌کند. گرمای نهان مقداری گرمایی است که در طی تغییر فاز مبادله می‌شود و در سیستم SI برحسب kJ/kg بیان می‌شود.

برای تبخیر ماده‌ای به جرم m ، انرژی گرمایی مورد نیاز تابعی از گرمای نهان تبخیر (L_v) جسم و جرم (m) آن می‌باشد.

$$Q = mL_v$$

از طرفی؛ با توجه به فرمول (۵-۲۵)، اگر فرآیند هم فشار باشد، مایع اشباع از نقطه مایع اشباع (f) به نقطه بخار اشباع (g) می‌رسد.

قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص ۱۰۱

$$Q = mh_g - mh_f = m(h_f - h_g) = mh_{fg}$$

$$mL_v = mh_{fg}$$

پس در فرآیند هم فشار گرمای نهان تبخیر برابر است با اختلاف آنتالپی مخصوص مایع اشباع و بخار اشباع می باشد (فرمول ۵-۲۶).

$$L_v = h_{fg} \quad (۵-۲۶)$$

در فشار اتمسفر، وقتی آب صفر درجه سلسیوس به یخ صفر درجه سلسیوس تبدیل می شود گرمایی معادل 335 kJ/kg آزاد می کند، ولی در هنگام تغییر فاز از مایع به بخار 100 درجه سلسیوس معادل 227 kJ/kg گرما جذب می نماید. در انجماد نسبت به سرد کردن، گرمای بسیار زیادتری از ماده غذایی جدا می شود.

مثال (۵-۱۰): مخزنی شامل m کیلوگرم بخار و مایع در فشار P و در شرائط دو فازی قرار دارد. با دادن Q ژول گرما به مخلوط، تمام مخلوط به بخار تبدیل می شود. اگر کیفیت اولیه مخلوط x ، و گرمای نهان تبخیر در فشار P ، h_{fg} باشد مقدار Q را محاسبه نمائید.

$$Q = \Delta H = H_v - H_l$$

$$Q = mh_g - m(h_f + xh_{fg}) \quad \text{یا} \quad Q = m(h_g - h_f) - mxh_{fg}$$

$$Q = mh_{fg}(1 - x)$$

این نکته بسیار مهم است که اگر در ناحیه اشباع از کیفیت X_1 به X_2 برویم. انتقال حرارت لازم برای این کار برابر است با؛

$$Q = mh_{fg}(x_2 - x_1)$$

مثال (۵-۱۱): مخزنی محتوی 2 kg مخلوط آب و بخار با کیفیت 50% است. در فشار ثابت به این مخزن چقدر حرارت بدهیم تا آنتالپی مخصوص محتویات آن به $1/5 h_g$

برسد.

$$Q = H_v - H_l$$

$$Q = m(h_v - h_l) = m\left(\frac{r}{v} h_g\right) - m\left[\left(h_f + \frac{1}{v}(h_g - h_f)\right)\right]$$

$$Q = m\left[\left(\frac{r}{v} - \frac{1}{v}\right)h_g - \left(1 - \frac{1}{v}\right)h_f\right] = m\left(h_g - \frac{1}{v}h_f\right)$$

با قرار دادن مقدار جرم در معادله فوق:

$$Q = r\left(h_g - \frac{1}{v}h_f\right) \Rightarrow Q = rh_g - h_f$$

۵-۶ ظرفیت گرمایی ویژه

مقدار انرژی گرمایی که طی یک فرآیند به ماده داده می‌شود تا دمای آن به اندازه یک واحد افزایش یابد را ظرفیت گرمایی ماده گویند. حال اگر جرم ماده واحد باشد، همان تعریف را می‌توان برای ظرفیت گرمایی ویژه استفاده نمود. ظرفیت گرمایی به نوع فرآیند وابسته می‌باشد ممکن است در حجم ثابت C_V و یا در فشار ثابت C_P تعریف شود. ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (C_P) برابر است با:

$$C_P = \frac{Q_V}{\Delta T} \left(\frac{J}{K} \right) \quad (۲۷-۵)$$

$$c_P = \frac{Q_V}{m\Delta T} \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$$

همچنین ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت (C_V) نیز برابر است با:

$$C_V = \frac{Q_P}{\Delta T} \left(\frac{J}{K} \right) \quad (۲۸-۵)$$

$$c_V = \frac{Q_P}{m\Delta T} \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$$

قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص ۱۰۳

ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت (C_V) را می‌توان بر اساس قانون اول ترمودینامیک نوشت:

$$\delta Q = dU + PdV$$

مقدار انرژی جنبشی و پتانسیل صفر می‌باشد $\Delta KE = 0$, $\Delta PE = 0$ همچنین کار انجام شده نیز برابر صفر است بنابراین:

$$PdV = 0 \Rightarrow C_V = \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right) \times \frac{1}{m}$$

$$C_V = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta U}{\delta T} \right)_V$$

$$C_V = \frac{du}{dT} \Rightarrow du = C_V dT \quad (29-5)$$

بیانگر این است که به انرژی داخلی سیستم وابسته است. اگر مقدار حرارت کسب شده و دمای ماده بررسی شود، می‌توان ظرفیت گرمایی مواد را اندازه‌گیری کرد برای مثال مقدار حرارت لازم را که برای ثابت نگه داشتن فشار در طی یک فرایند، اطلاق می‌گردد. ظرفیت گرمایی در فشار ثابت (C_P) و گرمای لازم بر اساس قانون اول به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\delta Q = dU + PdV$$

$$C_P = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right)_P$$

طبق تعریف آنتالپی در یک سیستم که $Q = H = U + PV$ می‌باشد پس در یک فشار ثابت گرمای ویژه به آنتالپی سیستم وابسته است.

$$C_P = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta H}{\delta T} \right)_P \quad (30-5)$$

بر اساس تعریف گاز ایده‌آل، انرژی داخلی به دما وابسته است از طرفی آنتالپی نیز

به دما وابسته است.

$$h = u + pv$$

$$h = u + RT \Rightarrow h = f(t)$$

$$dh = du + RdT \quad (۳۱-۵)$$

با توجه به فرمول (۳۰-۵) رابطه بین آنتالپی و گرما ویژه در فشار ثابت عبارت است از:

$$C_p = \frac{dh}{dT} \Rightarrow dh = C_p dT \quad \text{یا} \quad dH = MC_p dT$$

با قرار دادن مقدار dh و du بر اساس گرمای ویژه آن‌ها در رابطه (۳۱-۵)، رابطه (۳۲-۵) به دست می‌آید.

$$C_p \cdot dT = C_v dT + RdT \quad (۳۲-۵)$$

با حذف مقدار dT رابطه جدید (۳۳-۵) به دست می‌آید.

$$C_p = C_v + R$$

$$\Rightarrow C_p - C_v = R \quad (۳۳-۵)$$

بر اساس رابطه فوق مقدار ظرفیت گرمایی در فشار ثابت به اندازه ثابت گاز (R) از ظرفیت گرمایی در حجم ثابت بیشتر است بنابراین در گازها، مقدار ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت بیشتر از ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت است ($C_p > C_v$) اما در جامدات و مایعات این دو به هم نزدیک هستند، می‌توان برابر فرض کرد. فرمول (۳۳-۵) را می‌توان بر اساس ثابت عمومی گازها به صورت ذیل نوشت.

$$\bar{C}_p - \bar{C}_v = \bar{R} = 8.314 \rightarrow J/mol. K$$

چند نکته از ظرفیت گرمایی ویژه

۱. گرمای ویژه در حجم و فشار ثابت تابعی از دما است. چون انرژی داخلی (u) و آنتالپی (h) تابعی از دماست.
۲. تمام گازها در فشار نزدیک صفر دارای رفتار گاز ایده‌آل است. در نتیجه گرمای ویژه گاز ایده‌آل برای یک ماده خالص را گرمای ویژه در فشار صفر می‌گویند.
۳. گرمای ویژه در فشار ثابت و در حجم ثابت برای یک گاز ایده‌آل همواره ثابت است. گرمای ویژه در فشار ثابت برای انواع گازهای تابعی از θ و ضرائب ثابت است.

$$C_p = C_v + C_1\theta + C_2\theta^2 + C_3\theta^3 \quad (۳۴-۵)$$

$$\theta = \frac{T}{1000}$$

حالت تغییرات آب را به عنوان مثال مورد بررسی قرار می‌دهیم. اگر آب را از حالت جامد آن (یخ) از -125°C مورد بررسی قرار دهیم، و به آن تا $+125^\circ\text{C}$ حرارت بدهیم، (در فشار یک اتمسفر). در تمام مراحل این فرایند، فشار ثابت است. - بین منفی -25°C تا 0°C شیب نمودار ثابت خواهد بود.

$$C_p = 6.37 \text{ J/mol.K}$$

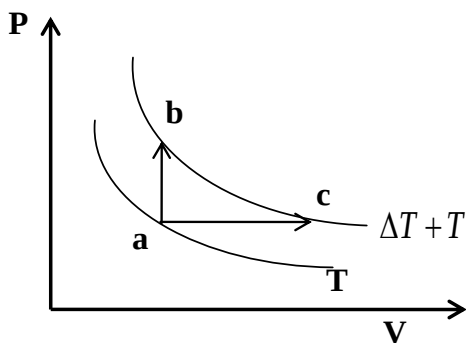
- در 0°C چنین به نظر می‌رسد که گرمای ویژه نامحدود است. اما آزمایش نشان می‌دهد که گرمای ذوب تابع آنتالپی یخ است.

- بین صفر تا 100°C درجه ی سلسیوس ظرفیت گرمایی آب برابر با 7.52 J/mol.K است.

- دوباره در 100°C درجه ی سلسیوس چنین به نظر می‌رسد که گرمای ویژه ی آب (آب جوش) بی نهایت است. اما تجربه نشان می‌دهد که با گرفتن مقداری گرما از حالت مایع به حالت بخار در می‌آید (آنتالپی تبخیر 40.7 J/mol.K).

حال تغییرات در دو فرآیند حجم ثابت و فشار ثابت را در دو دمای مختلف را با یک مثال بررسی می‌نماییم

مثال (۵-۱۲): با توجه به شکل دو فرآیند حجم ثابت و فشار ثابت میان دو دمای مختلف انجام شده است. اگر این فرآیند بر روی مقدار مشخصی از گاز ایده آل انجام گرفته باشد. مقدار انتقال حرارت انجام شده طی این فرآیندها را مقایسه نمایید.



مقدار تغییر در انرژی گرمایی در فشار ثابت و حجم ثابت به صورت زیر می باشد.

$$Q_V = Q_{ab} \text{ و } Q_P = Q_{ac}$$

$$Q_P = Q_{ac} = mC_P \Delta T = mC_P (T_c - T_a) = mC_P \Delta T = Q_{ac}$$

$$Q_V = Q_{ab} = mC_V \Delta T = mC_V (T_b - T_a) = mC_V \Delta T = Q_{ab}$$

از طرفی چون

$$C_P > C_V$$

پس نتیجه می گیریم که:

$$Q_{ac} > Q_{ab}$$

۵-۷ ضریب اتمسیتی

نسبت ظرفیت گرمایی در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی در حجم ثابت را ضریب اتمسیتی گویند.

قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص ۱۰۷

$$K = \gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad \text{و یا} \quad \frac{c_p}{c_v}$$

$$\gamma = \frac{Q_p}{Q_v} = \frac{\partial h / \partial t}{\partial u / \partial t}$$

$$\gamma = \frac{\Delta H}{\Delta U} \quad (35-5)$$

چون مقدار $C_p > C_v$ پس ضریب اتمیسته همیشه از یک بزرگتر است. $\gamma > 1$

$$H = u + PV \Rightarrow \gamma > 1$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

از طرفی چون $C_p - C_v = R$ است پس (ارتباط ظرفیت گرمایی و انرژی)

$$\gamma = \frac{R + C_v}{C_v}$$

$$R = C_v(\gamma - 1) \quad (36-5)$$

بنابراین مقدار ظرفیت گرمایی ویژه در حجم و فشار ثابت بر حسب ضریب اتمیسته به شرح فرمول‌های (37-5) و (38-5) می‌باشد. مقدار ثابت گازها برابر با

$$R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$C_v = \frac{R}{\gamma - 1} \quad (37-5)$$

$$C_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \quad (38-5)$$

مقدار تقریبی ضریب اتمسیتیة (γ) برای گازهای تک اتمی (۱/۶۶)، دو اتمی (۱/۴) و سه اتمی (۱/۳) می باشد.

مثال (۵-۱۳): مقدار مشخصی گاز ایده آل بین دو دمای T_1 و T_2 یک بار فرآیندی هم حجم و یک بار فرآیندی هم فشار را می پیماید. اگر مقدار انتقال حرارت در این فرآیندها به ترتیب ۲۰۰۰ و ۲۸۰۰ ژول باشد. ضریب اتمسیتیة را محاسبه نمایید.

$$Q_V = 2000 \rightarrow J \quad Q_P = 2800 \rightarrow J$$

$$\frac{Q_P}{Q_V} = \frac{mC_p\Delta T}{mC_V\Delta T} \Rightarrow \frac{C_p}{C_V} = \gamma \quad \gamma = \frac{2800}{2000} = 1.4$$

مقدار تغییرات انرژی داخلی Δu در کلیه فرآیندها با استفاده از فرمول رابطه بین ضریب اتمسیتیة و گرمای ویژه به صورت ذیل محاسبه می شود.

$$\Delta u = mc_V\Delta T$$

$$\Delta u = m \frac{R}{\gamma - 1} \Delta T = \frac{mR\Delta T}{\gamma - 1} = \frac{\Delta PV}{\gamma - 1}$$

$$\Delta u = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1}$$

۵-۸ قانون اول به صورت معادله آهنگی

گاهی لازم است قانون اول را به صورت آهنگ لحظه ای عبور انرژی از سطح کنترل به صورت گرما و کار و نیز آهنگ تغییرات انرژی جرم کنترل بیان نمود. این حالت خارج از سیستم ترمودینامیک کلاسیک است که همواره با تعادل سروکار دارد و بدون لحاظ کردن مورد زمان است. در معادله آهنگی تعادل قانون اول را بر حسب زمان می سنجیم. طبق قانون اول با لحاظ کردن پارامتر زمان:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = \delta Q - \delta W$$

$$\frac{\Delta E}{\delta t} = \frac{\delta Q}{\delta t} - \frac{\delta W}{\delta t}$$

قانون اول ترمودینامیک و فرآیندهای خاص ۱۰۹

از کمیت‌های انرژی حد می‌گیریم وقتی که تغییران زمان به سمت صفر میل می‌کند

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\delta t} = \frac{dU}{dt} \quad \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta KE}{\delta t} = \frac{dKE}{dt} \quad \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta PE}{\delta t} = \frac{dPE}{dt}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\delta t} = \dot{W} \quad \text{آهنگ کار (قدرت)}$$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\delta t} = \dot{Q} \quad \text{آهنگ انتقال حرارت}$$

بنابراین معادله آهنگی قانون اول به فرم ذیل می‌باشد.

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dKE}{dt} + \frac{dPE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (۳۹-۵)$$

فصل ششم

فرآیند خاص حجم کنترل

اهداف

در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:

۱. کاربرد قانون اول در حجم کنترل
۲. آشنایی با فرآیندهای پایدار و یکنواخت
۳. تبادل گرما و محاسبات مربوط به تعادل گرمایی در سیستم

۶-۱ قانون اول ترمودینامیک در حجم کنترل

حجم کنترل، حجمی است در فضا که برای تحلیل و کنترل در نظر می‌گیریم و دارای سطح کنترل است. برای تحلیل بهتر، اندازه آن دلخواه می‌باشد. حجم کنترل نسبت به یک سیستم مختصات تعریف می‌شود.

حجم کنترل به سیستمی اطلاق می‌گردد که در آن ورود و خروج انرژی از طریق ورود و خروج جرم صورت می‌گیرد. حجم کنترل تفاوت محسوسی با سیستم بسته جرم کنترل دارد. حال قانون اول ترمودینامیک را به صورت کامل تر با احتساب جرم (m) به کار می‌بریم. طبق قانون اول برای سیال:

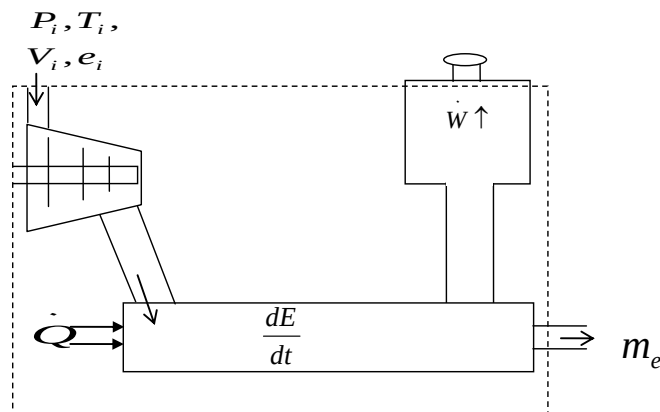
$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_r - \dot{W}_r$$

سیال در عرض سطح کنترل جریان دارد.

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

انرژی را نه می توان ایجاد کرد و نه می توان از بین برد. بنابراین تغییر انرژی ناشی از انرژی ورودی به حجم کنترل i یا انرژی خروجی از حجم کنترل می باشد. در یک سیستم حجم کنترل، انرژی e وارد یا خارج می شود. با ورود و خروج سیال از مرز کنترل، کار مرزی در فرآیند به وجود می آید.

در شکل (۱-۶) در لحظه ورود، سیال توسط سیال پشت خود هل داده و به داخل وارد می شود در نتیجه بر روی آن کار انجام می شود. در خروجی، سیال، سیال جلو را هل داده و روی آن کار صورت می دهد. این کار متناسب با آهنگ جرم و حجم مخصوص در حالت ورودی است:



شکل ۱-۶. فرآیند حجم کنترل و پیوستگی جرم

$$\dot{W} = F.V = \int P V dA = P.\dot{V} \Rightarrow P.m\dot{v} = \dot{W}$$

$$V = m\dot{v} \Rightarrow \dot{V} = m\dot{v}$$

در حجم کنترل با آهنگ $P_e v_e \dot{m}_e$ روی جریان خطی کار انجام می دهد و اطراف با آهنگ $P_i v_i \dot{m}_i$ روی جرم ورودی کار انجام می دهد. در نتیجه میزان کار جریان برای واحد، Pv است.

$$q = w + e$$

$$= Pv + u + \frac{1}{\gamma} V^2 + gz$$

$$q = h + \frac{1}{\gamma} V^2 + gz \quad (۱-۶)$$

بسط قانون اول :

$$\frac{dE_{c.v}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + (\dot{m}_e e_i + \dot{W}) - (\dot{m}_e e_e + \dot{W}) \quad (\text{جریان خروجی} - \text{جریان ورودی})$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + m_i (e_i + Pv) - m_e (e_e + Pv)$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + m_i (h_i \dots) - m_e (h_e \dots) \quad (۲-۶)$$

حجم کنترل می تواند شامل چند جریان ورودی و خروجی باشد، بنابراین مجموع جریان های ورودی و خروجی را لحاظ می کنیم معادله (۳-۶).

$$\Rightarrow \frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{\gamma} V_i^2 + gz_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{\gamma} V_e^2 + gz_e \right) \quad (۳-۶)$$

از کاربردهای مهم این معادله این است که برای استنتاج مدل تحلیلی مناسبی برای عملیات پایای طولانی مدت مثل توربین ها، کمپرسورها، نازل ها، بویلر ها، کندانسور استفاده می شود.

$$Q_{CV} + \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{\gamma} + gz_i \right) = \frac{dE_{CV}}{dt} + \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{\gamma} + gz_e \right) + W_{CV} \quad (۴-۶)$$

$$Q_{CV} = \text{انرژی گرمایی در حجم کنترل (CV)}$$

$$m_i = \text{جرم ورودی}$$

$$V_i = \text{سرعت ورودی جریان}$$

z_i = ارتفاع مرکز ثقل جریان ورودی نسبت به مبدأ پتانسیل

dE_{CV} = تغییرات انرژی حجم کنترل

$\sum m_e$ = جرم خروجی

V_e = سرعت خروجی جریان

gz_e = ارتفاع مرکز ثقل جریان خروجی نسبت به مبدأ پتانسیل

رابطه (۴-۶) براساس نرخ زمانی بیان شده است زیرا نرخ زمانی ورود و خروج جرم عامل تعیین کننده در تعادل انرژی سیستم است. ورود و خروج داخل حجم کنترل برحسب زمان تغییر می کند که از آن به عنوان «معادله پیوستگی» یاد می کنند. نرخ تغییر حجم در حجم کنترل می تواند غیر صفر باشد. جرم، حرارت، و کار از سطح کنترل عبور می کند.

$$\frac{dm_{c.v}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e \quad (۵-۶)$$

وقتی چند وسیله ذخیره کننده باشد به صورت زیر جمع می بندیم، جرم کل در حجم کنترل را می توان متشکل از چند سهم در نظر گرفت:

$$m_{c.v} = \int P dv = \int \frac{dV}{V} = m_A + m_B + m_C + \dots$$

آهنگ حجمی:

$$\dot{V} = V \times A$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \Rightarrow \frac{1}{V} \times V \cdot A$$

$$\dot{V} = \text{نرخ حجمی (دبی در واحد زمان)}, \frac{m^3}{s}$$

$$V = \text{سرعت سیال}, m/s$$

$$A = \text{حجم}, m^3$$

$$\dot{m} = \frac{V.A}{v} \quad (6-6)$$

۶-۲ حالات در فرآیند حجم کنترل

این فرآیندها شامل دو بخش است:

۱. حالت پایدار – جریان پایدار (SSSF) Steady State – Steady Flow
در وسایلی همانند توربین‌ها، کمپرسورها، دیگ‌های بخار که چگالنده‌ها قابل فرض است.

۲. حالت یکنواخت – جریان یکنواخت (USUF) Uniform State – Uniform Flow
پروسه پر و خالی کردن مخازن گاز را می‌توان به‌عنوان مثال مطرح کرد

۶-۲-۱ فرآیند حالت پایدار – جریان پایدار – SSSF

به‌طور کلی در چگالنده‌ها از این فرآیند استفاده می‌شود. این فرآیند در وسایلی همچون کمپرسورها، و دیگ‌های بخار و توربین‌ها استفاده می‌شود.

برای توصیف بهتر فرآیند SSSF، فرضیه‌هایی را به‌شرح ذیل لحاظ می‌نمائیم.

۱. حجم کنترل نسبت به مرجع مختصات ثابت می‌باشد. یعنی همه سرعت سنجش شده نسبت به محور مختصات برابر سرعت‌ها نسبت به حجم کنترل می‌باشد.
۲. حالت جرم در هر نقطه و جرم موجود نسبت به زمان تغییر نمی‌کند.
۳. حالت جرم عبوری از مجاری حجم کنترل در طول زمان تغییر نکند (دبی ثابت باشد).

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = 0 \quad \& \quad \frac{dm_{cv}}{dt} = 0 \Rightarrow \sum m_i = \sum m_e$$

شدت حرارت و کار عبوری از مرزهای حجم کنترل ثابت می‌ماند.

$$Q, \quad W = \text{cte}$$

بنابراین در این فرآیند جرم ورودی و خروجی باید برابر باشد. و همچنین انرژی

حجم کنترل نسبت به زمان تغییر نکند.

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = 0$$

فرمول کلی برای محاسبه SSSF

$$Q_{cv} + \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) = \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) + W_{cv} \quad (7-6)$$

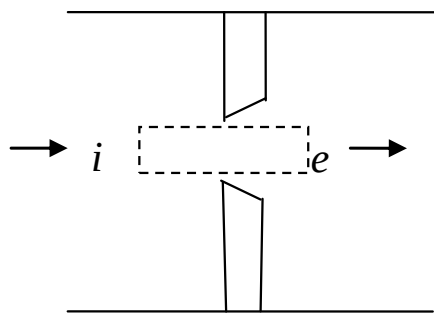
در بسیاری از مسائل مربوط به فرآیند SSSF؛ مقدار ورودی و خروجی جرم با هم برابر است $m_i = m_e = m$ پس با تقسیم طرفین بر m ، فرمول (7-6) به صورت ذیل محاسبه می‌شود.

$$q + \sum \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) = \sum \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) + w$$

۶-۲-۱-۱ فرآیند اختناق و ضریب ژول-تامسون

الگوی خاص از فرآیند SSSF است. در فرآیند اختناق افت فشار موضعی داریم. قوانین موجود در فرآیند اختناق:

انتقال حرارت به دلیل فضای کم و زمان کوتاه ناچیز است. انرژی جنبشی جریان تغییر نمی‌کند، و همچنین سطح پتانسیل ثابت است. در نهایت کار صورت نمی‌گیرد. بنابراین معادله SSSF در حالت اختناق بشرح فرمول (۶-۸) است.



شکل ۶-۲. نمایی از فرآیند اختناق

$$q + h_i + \frac{V_i}{\gamma} + gz_i = h_e + \frac{V_e}{\gamma} + gz_e + w \quad (۸-۶)$$

$$V_i = V_e$$

$$q = w = 0 \Rightarrow h_i = h_e$$

$$z_i = z_e$$

ضریب ژول - تامسون (μ_j) عبارت از تغییرات دما به تغییرات فشار در آنتالپی ثابت است (فرمول ۹-۶). چون آنتالپی در فرآیند اختناق ثابت است پس ضریب ژول - تامسون در اینجا کاربرد دارد.

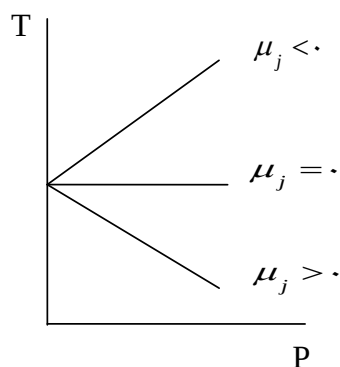
$$\mu_j = \left[\frac{\partial T}{\partial P} \right]_h \quad (۹-۶)$$

۱. اگر ضریب ژول - تامسون گازی مثبت باشد؛ $\mu_j > 0$ پس دما کاهش می‌یابد.

۲. اگر ضریب ژول - تامسون گازی منفی باشد؛ $\mu_j < 0$ پس دما افزایش می‌یابد.

دلیل آن هم مربوط به مخرج کسر است. در فرآیند اختناق مخرج کسر همواره

منفی است. بنابراین در افزایش دما، کسر منفی $-\frac{T}{P} = -$ و در کاهش دما، کسر مثبت $+\frac{T}{P} = +$ می‌شود.



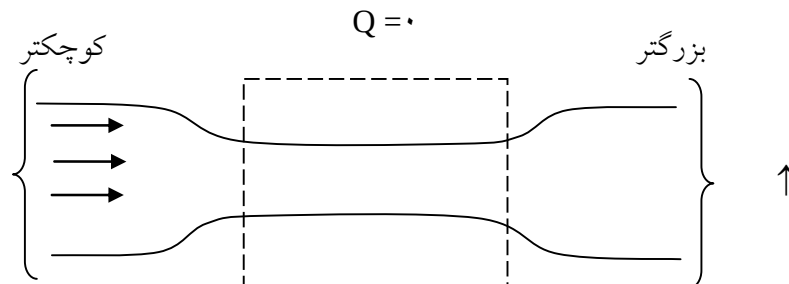
شکل ۳-۶. ضریب ژول - تامسون در نمودار دما فشار

یکی از نکات مهم در فرآیند اختناق برای گاز ایده‌آل اینست که آنتالپی همواره تابع دما است بنابراین اگر آنتالپی ثابت باشد ($h=cte$)، دما تغییر نمی‌کند در نتیجه اگر دما تغییر نکند، ضریب ژول - تامسون ($\mu_j = 0$) برای گاز ایده‌آل صفر خواهد بود. فرآیند ژول-تامسون یک فرآیند آنتالپی ثابت می‌باشد. و مقدار تغییرات دما به تغییرات فشار را در یک آنتالپی ثابت $\left[\frac{\partial T}{\partial P}\right]_h$ را می‌توان اندازه‌گیری نمود.

$$\begin{aligned} dH &= C_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP \Rightarrow C_p dT = -\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP_H \\ \Rightarrow \left[\frac{\partial H}{\partial P}\right]_T &= -C_p \left[\frac{\partial T}{\partial P}\right]_H \\ \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta T}{\Delta P}\right]_H &= \left[\frac{\partial T}{\partial P}\right]_H = \mu_j \\ \left[\frac{\partial H}{\partial P}\right]_T &= -C_p \mu_j \\ dH &= C_p dT - C_p \mu_j dP \end{aligned} \quad (۱۰-۶)$$

۶-۲-۱-۱ نازل در سیستم SSSF

نازل وسیله‌ای جریان پایا است بدین معنی که جریان سیال را افزایش و فشار آن را کاهش می‌دهد. در نازل کار صورت نمی‌گیرد ($W=0$). تغییر انرژی پتانسیل و جنبشی تقریباً صفر است. انتقال گرما معمولاً ناچیز و صفر است مثل راکت که با سوخت مایع کار می‌کند.



شکل ۴-۶. نمایی از یک نازل

۳-۱-۲-۶ دیفیوزر (پخش کن) در سیستم SSSF

دیفیوزر وسیله‌ای است پایا که سرعت سیال را کاهش و فشار آن را افزایش می‌دهد. دیفیوزر بر عکس نازل است و فرض‌های مربوط به دیفیوزر مانند فرضیات مربوط به نازل است. انرژی جنبشی در ورودی‌های پخش کننده زیاد است و در خروجی، کوچک می‌باشد اما غیرقابل صرف نظر کردن است.

۴-۱-۲-۶ توربین در سیستم SSSF

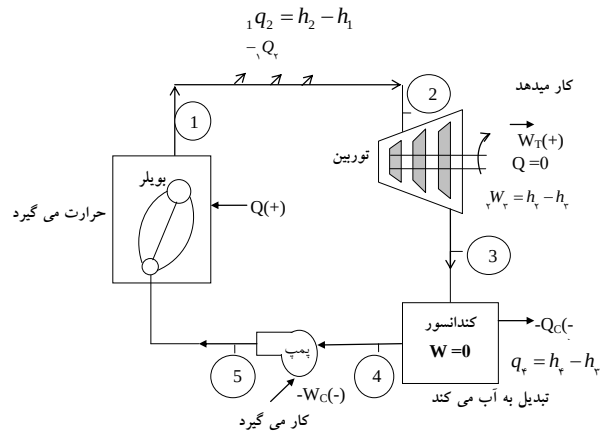
توربین ماشین پایای چرخانی است که در آن فشار سیال عامل کاهش می‌یابد و بر اساس آن کار شفت انجام می‌شود. دو نوع توربین را می‌توان از هم تمیز داد:

توربین بخاری: در این توربین‌ها، بخار آب خروجی توربین وارد کندانسور شده و به مایع تبدیل می‌شود.

توربین گازی: گاز از توربین به اتمسفر می‌رود.

در توربین با استفاده از دریافت انرژی حرارتی، کار را می‌توان به دست آورد و مقدار آن نیز مثبت می‌باشد. همانطور که از شکل (۵-۶) پیداست، بویلر حرارت لازم را دریافت می‌کند (علامت مثبت انرژی حرارتی).

- بخار با درجه حرارت بالا به توربین وارد شده و به واسطه آن کار می‌دهد و مقدار انرژی حرارتی صفر است.



شکل ۵-۶. نمایی از یک توربین و فرآیندهای مربوطه

- بخار آب خارج شده از توربین جهت چگالیده شدن وارد کندانسور می شود. در این حالت کار صفر است، حرارت به محیط برمی گردد و علامت آن منفی است.
- پمپ و کمپرسور، کار می گیرند (کار منفی، $-W$)، اواپراتور (تبخیرکننده) انرژی حرارتی ($+Q$) می گیرد.

دو فرآیند در داخل توربین رخ می دهد:

۱. سیال عامل توسط نازل ها وارد توربین شده و منبسط می شود. به واسطه این عمل، فشار سیال کاهش یافته و سرعت آن افزایش می یابد.
۲. جریان پرسرعت بسمت پره های متحرک (چرخان) حرکت کرده و قبل از خروج سیال، سرعت آن کاهش می یابد. این کاهش سرعت هدایت شده منجر به اعمال گشتاور بر شفت شده و در نتیجه شفت می گردد. در نهایت سیال کم سرعت و کم فشار از توربین خارج می شود. قانون اول برای این فرآیند:

$$q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e$$

تغییرات انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی تقریباً صفر است. فرآیند دفع گرما در توربین نامطلوب است. فرآیند در توربین آدیاباتیک است. کار خروجی برابر با کاهش آنتالپی سیستم است.

$$W = \Delta h = h_p - h_i \quad (۱۱-۶)$$

۵-۱-۲-۶ کمپرسور و پمپ در سیستم SSSF

وظایف کمپرسور همانند وظایف پمپ است یعنی هر دو روی سیال کار انجام می‌دهند و هر دو فشار سیستم را افزایش می‌دهند. عملاً دو نوع کمپرسور داریم:

۱. کمپرسور چرخان (جریان شعاعی). اساساً متضاد دو فرآیندی است که در توربین رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۶-۶)، سیال عامل با فشار کم ($P \downarrow$) وارد کمپرسور شده و با حرکت به داخل، تیغه‌های چرخان را به حرکت در می‌آورد. خروج سیال با سرعت بالا ($V \uparrow$) روی آن کار انجام می‌شود و در نتیجه عبور از دیفیوزر کاهش سرعت ($V \downarrow$) و افزایش فشار ($P \uparrow$) را در پی خواهد داشت. خروج سیال با فشار بالا نتیجه این عمل می‌باشد.



شکل ۶-۶. شماتیک عملکرد یک کمپرسور

تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی در کمپرسور ناچیز است. دفع گرما از سیال عامل در ضمن تراکم مطلوب می‌باشد لیکن فرصت کافی وجود ندارد. این نوع کمپرسور چرخان را آدیاباتیک می‌گیریم. یعنی کار ورودی برابر با تغییرات آنتالپی از ورودی تا خروجی است

$$w = h_i - h_e$$

۲. کمپرسور سیلندر پیستونی. دفع گرما در ضمن تراکم تسریع می‌کنند. کمپرسور را آدیاباتیک فرض می‌کنیم.

۲-۲-۶ فرآیند حالت یکنواخت - جریان یکنواخت (USUF)

فرآیند USUF در پر و خالی کردن مخازن، کاربرد دارد. فرضیات USUF عبارتند از:

۱. همانند فرآیند SSSF، حجم کنترل نسبت به محور مختصات ثابت است
۲. بر عکس فرآیند SSSF، حالت جرم نسبت به زمان تغییر می‌کند ولی در هر لحظه مشخص، حالت جرم در حجم کنترل یکنواخت است.

دبی جرمی عبوری (شار جرمی) می‌تواند نسبت به زمان متغیر باشد. رابطه پیوستگی جرم (۶-۱۲) نشان می‌دهد که جرم ورودی و خروجی برابر نیستند.

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum m_i - \sum m_e$$

$$\frac{dm_{cv}}{dt} - \sum m_i + \sum m_e = 0 \quad (۶-۱۲)$$

$\frac{dm}{dt}$ یعنی جرم موجود در حجم کنترل در ابتدای فرآیند (m_1) و انتهای فرآیند (m_2) در یک محدوده مشخص زمانی برای دو فرآیند بشرح ذیل می‌باشد

$$sssf \Rightarrow \frac{dm_{cv}}{dt} = 0$$

&

$$usuf \Rightarrow \frac{dm_{cv}}{dt} = (m_2 - m_1)_{cv}$$

۶-۳ تبادل گرما و قانون اول ترمودینامیک

سیستم کاملاً بسته و ایزوله؛ تبادل حرارت و کار با محیط ندارد. و فقط انتقال حرارت‌های داخلی میان اجزاء سیستم است که در مجموع با لحاظ کردن جهت، مقدار آن صفر است (قانون اول)

$$\sum Q = 0$$

در این حالت تبادل دما، اجسام با دمای بالا به اجسام دارای دمای پایین انرژی

گرمایی می‌دهند و پس از رسیدن به تعادل گرمایی، دمای کل با هم برابر می‌شود. دمای نهایی را دمای تعادل گویند.

$$\sum Q = 0 \Rightarrow \sum mc\Delta T = 0$$

همچنین فرض بر این است که تغییر فاز نداشته باشیم. از میان اجزاء سیستم، اگر جزئی در حال تغییر فاز باشد، حرارت مبادله شده به تغییر فاز آن جز کمک می‌کند نه تغییر دمای آن.

دمای تعادل برای یک مخلوط به جرم‌های $m_1, m_2, \dots$ و گرمای ویژه $c_1, c_2, \dots$ و دمای اولیه $T_1, T_2, \dots$ برابر است با:

$$\begin{aligned} \sum Q &= 0 \\ \sum mc\Delta T &= 0 \Rightarrow m_1 c_1 (T_1 - T_r) + m_2 c_2 (T_2 - T_r) + \dots = 0 \\ T &= \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 + \dots}{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots} \end{aligned} \quad (۱۳-۶)$$

اگر تمام اجزاء از یک جنس باشند گرمای ویژه همه مساوی است در این صورت:

$$c_1 = c_2 = c_3, \dots \Rightarrow T = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$$

تعادل دمایی بر اساس شکل حجمی به صورت فرمول (۱۴-۶) نوشته می‌شود.

$$m_1 = \rho V_1 \quad \& \quad m_2 = \rho V_2$$

$$T = \frac{V_1 T_1 + V_2 T_2 + \dots}{V_1 + V_2 + \dots} \quad (۱۴-۶)$$

در فرآیند تبخیر و تقطیر پارامتر گرمای نهان تبخیر (L_v) یا همان h_{fg} برای محاسبه Q مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$|Q| = mL_v$$

در فرآیند ذوب و انجماد پارامترهای گرمای نهان ذوب (L_f) برای محاسبه Q مورد استفاده قرار میگیرد.

$$|Q| = mL_f$$

مقادیر C برای آب ($C=4/2$) $\frac{KJ}{kg^\circ C}$ یا $\frac{J}{kg^\circ C}$ ۴۲۰۰ است و برای آلومینیم

حدود $\frac{J}{kg^\circ C}$ ۹۰۰ می باشد. در بحث ذوب یخ با انرژی Q لازم برای ذوب یخ صفر درجه به آب صفر درجه سلسیوس محاسبه می شود.

$$|Q| = mL_f$$

در تعادل بین آب و یخ در جرمها و درجه حرارت مختلف سه حالت وجود دارد.

۱. انرژی آب کمتر از انرژی یخ باشد

$$m_1 L_f > m_2 c T$$

تمام یخ ذوب نمی شود و دمای تعادل نهایی صفر درجه سلسیوس است. مقداری از یخ (m') ذوب می شود.

$$m' = \frac{m_2 c T_1}{L_f}$$

۲. انرژی آب بیشتر از انرژی یخ باشد

$$m_1 L_f < m_2 c T$$

تمام یخ ذوب می شود و دمای نهایی تعادل بیش از صفر است. دمای تعادل برابر است با:

$$T = \frac{m_1 c T_1 - m_2 L_f}{c(m_1 + m_2)}$$

۳. انرژی آب برابر با انرژی یخ باشد

$$m_i L_f = m_w c T$$

در این وضعیت دمای نهایی تعادل صفر می‌باشد.

فصل هفتم

قانون دوم ترمودینامیک

اهداف

- در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:
۱. آشنایی با قانون دوم ترمودینامیک و کاربردهای آن
 ۲. آشنایی با فرآیندهای برگشت‌پذیری و عوامل مؤثر بر آن
 ۳. آشنایی با آنتروپی و رابطه آن با فرآیندهای مختلف ترمودینامیکی
 ۷. مفهوم قانون دوم ترمودینامیک

بر اساس قانون اول ترمودینامیکی، $\oint Q = \oint W$ و محدودیتی برای جهت جریان کار (W) و حرارت (Q) قائل نیست و این تا حدودی به واقعیت نزدیک نیست. اما فرآیندها در ترمودینامیک تابع جهت می‌باشند به عبارتی فرآیندها خودبه‌خودی در جهت خاص به وقوع می‌پیوندند و در خلاف جهت غیر ممکن است. اگر بخواهیم در خلاف جهت انجام گیرد باید انرژی خاص صرف شود. به‌عنوان مثال انتقال حرارت از منبع گرم به منبع سرد ممکن بوده و خود به خود صورت می‌گیرد ولی از منبع سرد به منبع گرم تقریباً امکان ندارد (شکل ۷-۱) و برای تحقق آن باید انرژی صرف نموده و نیاز به تحریک خارجی ویژه می‌باشد. پس قانون دوم می‌گوید که فرآیندهای ترمودینامیکی در جهتی رخ می‌دهند و در خلاف آن روی نمی‌دهد.

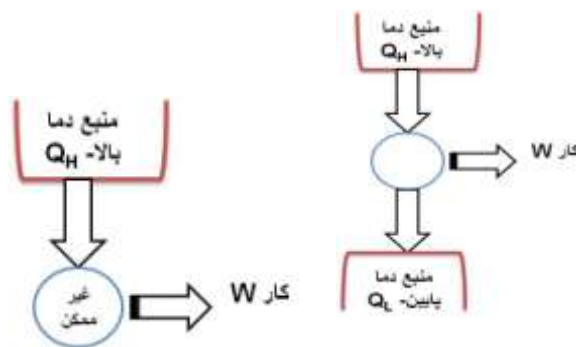
قانون دوم در دو قالب ذیل بیان می‌شود:

الف) مولد قدرت: همانند عملکرد یک موتور حرارتی

ب) مصرف کننده قدرت: مانند عملکرد یک یخچال در فرآیند ترمودینامیکی دو بیان کلاسیک از قانون دوم عبارتند از بیان کلون-پلانک و بیان کلاسیوس که در هر دو مورد تفسیری از فرآیند ترمودینامیک ارائه میدهد.

۱-۷ بیان کلون - پلانک

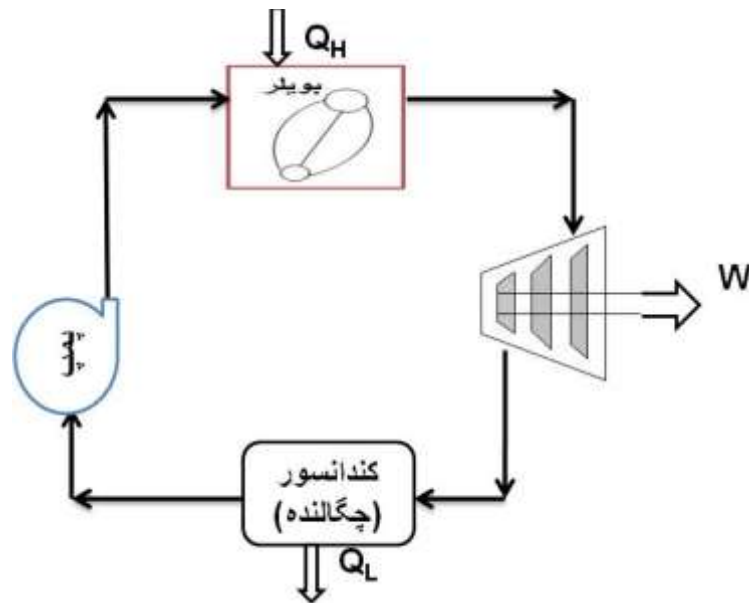
بیان کلون - پلانک می‌گوید، نمی‌توان وسیله‌ای ساخت که در سیکل کار کند و تاثیر آن فقط بالا بردن وزن یا انجام کار و تبادل گرما با یک منبع حرارتی تنها باشد.



شکل ۱-۷. بیان کلون - پلانک

این قانون بر اساس عملکرد یک موتور حرارتی به‌عنوان مولد قدرت است. یک موتور حرارتی تمام انرژی که دریافت می‌کند به کار تبدیل نمی‌کند بلکه قسمتی را به منبع سرد تحویل می‌دهد. به عبارتی دیگر بازده یک ماشین هیچ وقت ۱۰۰ درصد نخواهد بود زیرا اگر تمام انرژی حرارتی به کار تبدیل می‌شد امکان رسیدن راندمان به ۱۰۰ درصد بود اما غیر ممکن است.

ماشین گرمایی به‌وسیله اطلاق می‌گردد که در آن سیال عامل گرما را انتقال می‌دهد. به عبارتی وسیله‌ای (مانند موتور احتراقی یا توربین گازی) که در یک سیکل ترمودینامیکی با انتقال گرما از یک جسم دما بالا به یک جسم دما پایین مقدار معینی کار خالص مثبت انجام می‌دهد. شکل (۲-۷) شماتیکی از یک سیکل حرارتی ترمودینامیکی را که سیال عامل آن آب باشد را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲. شماتیکی از یک سیستم موتور حرارتی

- سیال با فشار ایجاد شده توسط پمپ وارد دیگ بخار می‌شود. سیال ورودی دارای فشار بالا و حرارت کم است.
 - در دیگ بخار، سیال با دریافت انرژی حرارتی، تبدیل به بخار مافوق گرم شده و در خروج از دیگ بخار دارای فشار و درجه حرارت بالا می‌باشد.
 - بخار مافوق گرم با فشار بالا وارد توربین شده و پره‌های توربین را به حرکت در می‌آورد و انرژی لازم را برای چرخش محور توربین مهیا می‌نماید.
 - سیال با درجه حرارت کم و به‌صورت دوفازی از توربین خارج شده و وارد چگالنده می‌شود.
 - در چگالنده، سیال تبدیل به مایع اشباع شده و سپس برای افزایش فشار وارد پمپ می‌گردد.
- در این سیکل ترمودینامیکی، مقدار گرما (Q_H) از جسم دما بالا انتقال می‌یابد. بنابراین ماشین گرمایی سیستمی است که سیکلی را طی می‌کند و دارای خروجی کار مثبت و انتقال گرمای مثبت می‌باشد. لذا کار خالص در سیکل حائز اهمیت می‌باشد. بازده گرمای (η) در این سیکل برابر با نسبت انرژی به‌دست آمده (W) به انرژی هزینه

شده (Q_H) در سیستم است (فرمول ۱-۷).

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (1-7)$$

بازده گرمایی واقعی ماشین (۳۵-۵۰٪) در نیروگاه‌های بزرگ است. درحالی‌که در موتورهای بنزینی و دیزلی به ترتیب (۳۵-۴۰٪) و (۳۰-۳۵٪) می‌باشد.

مثال (۱-۷): کدام عامل باعث افزایش راندمان سیکل تولید قدرت می‌شود.

الف) افزایش $|Q_H|$ و کاهش $|Q_L|$ ب) افزایش $|Q_L|$ و کاهش $|Q_H|$

ج) افزایش همزمان $|Q_H|$ و $|Q_L|$ د) کاهش همزمان $|Q_H|$ و $|Q_L|$

جواب الف صحیح است زیرا بر اساس فرمول (۱-۷) افزایش $|Q_H|$ و کاهش

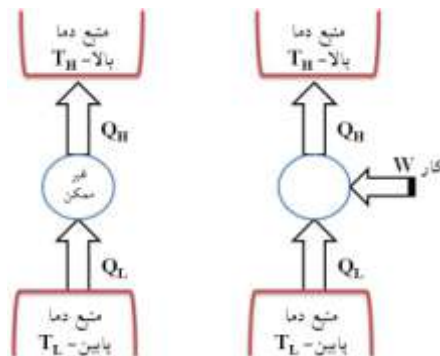
$|Q_L|$ منجر به کاهش کسر شده و در نتیجه آن راندمان سیستم افزایش می‌یابد.

۲-۷ بیان کلاسیوس

کلاسیوس بیان نمود که نمی‌توان وسیله‌ای ساخت که در یک سیکل کار کند و تاثیر آن فقط انتقال گرما از یک جسم سرد به یک جسم گرم باشد. بیان فوق در زمینه یخچال و پمپ کاربرد دارد. انتقال گرما از یک منبع سرد به یک منبع گرم همواره با وارد کردن کار به سیستم همراه خواهد بود. یک موتور حرارتی تمام انرژی که دریافت می‌کند به کار تبدیل نمی‌کند بلکه قسمتی را به منبع سرد تحویل می‌دهد. سیکل انتقال گرما به‌طور مستقیم از جسم حرارت پایین (Q_L) به منبع حرارت بالا (Q_H) امکان ندارد مگر اینکه کار ویژه انجام گیرد (شکل ۳-۷).

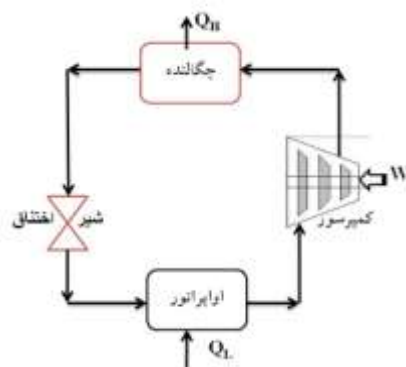
شماتیک عملکرد یک سیستم برودتی را می‌توان به صورت شکل (۴-۷) شرح

داد. کار به فرم انرژی الکتریکی به کمپرسور داده می‌شود و سیال (R-۱۳۴a) را به حرکت در می‌آورد. به عبارتی روی مبرد کار انجام می‌دهد.



شکل ۷-۳. بیان کلاسیوس

- مبرد با درجه حرارت بالا وارد کمپرسور شده و فشار مبرد توسط کمپرسور افزایش یافته و سپس مبرد به سمت چگالنده می‌رود.
- در چگالنده یا کندانسور حرارت بالای مبرد به محیط یا یک منبع حرارتی دیگر منتقل می‌شود
- سیال خنک شده با فشار بالا به شیر اختناق وارد شده و در آنجا کمی افت فشار پیدا می‌کند تا آماده ورود به سردخانه (اوپراتور) گردد.
- سیال به محض ورود به اوپراتور، حرارت محفظه را جذب نموده و محفظه سردخانه را همیشه در حد مورد نظر خنک نگه می‌دارد.



شکل ۷-۴. شماتیکی از یک سیستم سرمایش

بنابراین یخچال وسیله‌ای است که در یک سیکل عمل می‌کند و نیازمند کار است تا حرارت را از جسم با دمای پایین (Q_L) به جسم با درجه حرارت بالا (Q_H) انتقال دهد.

راندمان: کارایی یخچال (β) از موارد بسیار مهم در ترمودینامیک می‌باشد و به انرژی قابل عرضه (Q_L) و انرژی دریافتی (W) هزینه‌زا وابسته است (رابطه ۷-۲).

$$\beta = \frac{Q_L}{W}$$

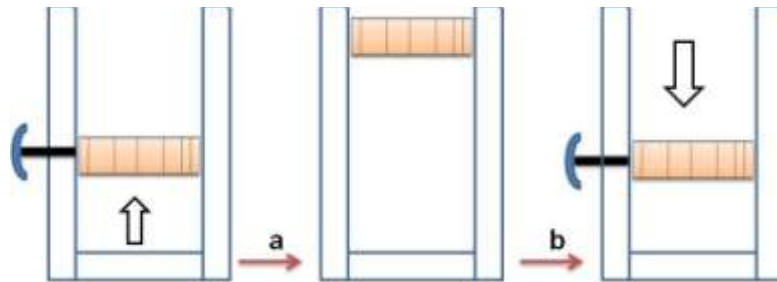
$$\beta = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad (7-2)$$

هر چه مقدار انرژی قابل عرضه کمتر باشد (یا خروجی حرارتی بیشتر باشد) کارایی یخچال کمتر می‌شود. کارایی یخچال خانگی ۲/۵ است در صورتی که در فریزرها تقریباً یک می‌باشد.

۷-۳ فرآیند برگشت پذیر

این سؤال مطرح است که آیا می‌توان ماشینی با بازده گرمایی ۱۰۰٪ داشت. یا ماگزیم بازده چقدر می‌باشد. در جواب می‌بایست فرآیند برگشت پذیر را تعریف کنیم. به فرآیندی برگشت پذیر گویند که پس از وقوع بتوانیم بدون هیچ گونه تغییر در سیستم یا اطراف آن را در جهت معکوس نیز انجام دهیم. به عبارتی محیط و سیستم هر دو به حالت اولیه بر می‌گردند و پس از بازگشت به حالت اولیه هیچ تاثیر و تغییری در محیط و سیستم بجا نگذارد.

سیستم سیلندر-پیستون برگشت ناپذیر است چون با آزاد کردن پین کار انجام می‌شود و در برگرداندن پیستون نیاز به کار داریم. در فرایند برگشت فشار بیشتری نیاز است در نتیجه کار در مسیر برگرداندن بیشتر از کار حاصله اولیه است ($W_b > W_a$). با تبادل انرژی حرارتی (Q) و تغییر در انرژی داخلی (U) می‌تواند به حالت اولیه برگردد.

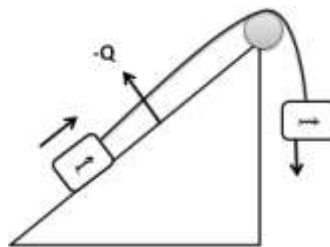


شکل ۵-۷. شمای از یک سیستم سیلندر پیستون و فرآیند برگشت پذیر

۷-۳-۱ عوامل برگشت ناپذیری

بعضی از عوامل منجر به برگشت ناپذیری می شود که بشرح ذیل عبارتند از اصطکاک، انبساط آزاد، اختلاط دو گاز، انتقال حرارت، و احتراق.

الف) اصطکاک. به معنی اتلاف انرژی است و با بازگشت به حالت اولیه، قابل بازگشت نیست. به عبارتی منجر به برگشت ناپذیری می شود. برای بالا رفتن جسم، نیاز به کار داریم. کار مورد نظر صرف غلبه بر اصطکاک بین جسم و سطح و همچنین افزایش انرژی پتانسیل جسم می شود (شکل ۶-۷).

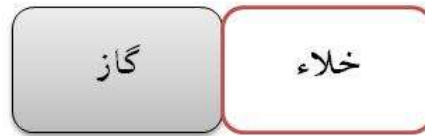


شکل ۶-۷. اثر اصطکاک در فرآیند برگشت ناپذیر

با کم کردن وزنه، جسم به سمت پایین حرکت می کند و به حالت اولیه برنمی گردد زیرا اصطکاک عامل برنگشتن به حالت اولیه است.

ب) انبساط آزاد. یعنی افزایش سطح اشغال شده توسط گاز. با فرض این که بین دو ماده خلاء و گاز دیافراگمی قرار گیرد و اگر دیافراگم را برداریم گاز وارد خلاء

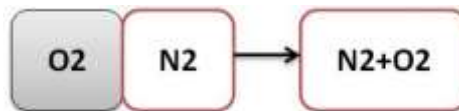
میشود و در تمام سطح پخش می‌شود.



شکل ۷-۷. اثر انبساط آزاد در فرآیند برگشت ناپذیر

حال اگر دیافراگم به حالت اولیه برگردد، دیگر امکان برگشت گاز به حالت اولیه میسر نخواهد بود. در یک انبساط آزاد، تراکم گاز ایجاد حرارت اضافی و تبادل با محیط می‌نماید و اثر آن روی محیط یعنی برگشت‌ناپذیری سیستم می‌باشد (شکل ۷-۷).

پ) **اختلاط دو گاز.** حالت خاص از انبساط آزاد است. با مخلوط شدن دو گاز امکان برگشت به حالت اولیه امکان‌پذیر نمی‌باشد (شکل ۷-۸).



شکل ۷-۸. اثر اختلاط گاز در فرآیند برگشت ناپذیر

در صورت استفاده از جداساز هوا که نیاز به کار دارد، امکان جداسازی هست.

ج) **انتقال حرارت.** گرما نوعی انرژی است که انتقال آن بر اثر اختلاف دما دو منبع انجام می‌گیرد. به واسطه ماهیت تصادفی آن در حرکت ذرات و انتقال به دلیل اختلاف دما، فرآیند بازگشت‌ناپذیر است. هر چه اختلاف دما بیشتر باشد شدت برگشت‌ناپذیری بیشتر است. اگر اختلاف دما کم و یا سطح انتقال حرارت وسیع باشد سیستم را تقریباً می‌توان بازگشت‌پذیر فرض کرد.

د) **احتراق.** پس از سوختن جسمی، دیگر نمی‌توان جهت این فرآیند را به عقب برگرداند.

مثال (۷-۲): در تعریف فرآیند بازگشت پذیر کدام گزینه صحیح می باشد.

- الف) فرآیندی که با برگشت مسیر آن به عقب هیچ گونه تغییری در سیستم نسبت به وضعیت اولیه نداشته باشیم.
- ب) فرآیندی که با برگشت مسیر آن به عقب هیچ گونه تغییری در محیط نسبت به وضعیت اولیه نداشته باشیم.
- ج) فرآیندی که با برگشت مسیر آن به عقب هیچ گونه تغییری در محیط و سیستم نسبت به وضعیت اولیه نداشته باشیم.
- د) فرآیندی که بتوان آن را به عقب برگرداند.

گزینه ج صحیح می باشد.

۷-۴ آنتروپی

قانون دوم ترمودینامیک را می توان چنین توصیف کرد که آنتروپی جهان در طی یک فرآیند خود به خودی افزایش می یابد. اما حقیقتاً آنتروپی (ΔS) را چگونه می توان توضیح داد؟ قانون دوم ترمودینامیک یک برداشت منطقی از تجربه بشری است و از تئوری ها و معادلات پیچیده به دست نیامده است. در بررسی قوانین ترمودینامیکی اغلب با سیکل ها سر و کار داریم و با فرایندها هم سرو کار داریم که مهم ترین این فرایندها عبارتند از فرآیند احتراق در موتور، فرآیند سرمایش فنجان قهوه، فرآیند شیمیایی بدن ... می باشند.

بنابراین فکر کردن در مورد تجارب عادی می تواند در درک مفاهیم آنتروپی بسیار مؤثر باشد. آنتروپی (S) اندازه بی نظمی سیستم یا ماده ای است که در حال بررسی است و کمیتی ترمودینامیکی است که اندازه ای برای درجه بی نظمی در هر سیستم است. هر چه درجه بی نظمی بالاتر باشد، آنتروپی بیشتر است. بنابراین برای یک ماده معین در حالت تعادل درونی کامل در هر حالت، داریم: آنتروپی جامد کوچکتر از آنتروپی مایع و همچنین آنتروپی مایع کمتر از آنتروپی گاز می باشد.

واحد آنتروپی در سیستم SI، ژول بر مول کلوین است. ($J/mol.K$). با فرض صادق بودن قانون سوم ترمودینامیک می توان مقدار مطلق برای آنتروپی جامدات در

دماهای بالا به دست آورد

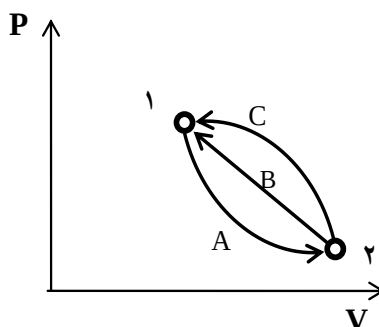
قانون دوم برای سیکل بیان گردید اما برای فرایندها به بررسی خاصیت آنتروپی سیستم می پردازیم که از طریق بررسی نامساوی کلاسیوس انجام می گیرد. نامساوی کلاسیوس نتیجه ای از قانون دوم ترمودینامیکی است و برای تمام سیکل های ممکن صحت دارد.

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (3-7)$$

برای یک سیکل انتگرال سیکلی گرما بزرگ تر از صفر است. در نتیجه:

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L > 0$$

آنتروپی همانند دیگر فرایندهای ترمودینامیکی تابعی از ابتدا و انتهای فرایند بوده و به مسیر فرایند وابسته نمی باشد.



شکل ۷-۹. فرایند آنتروپی در نمودار P-V

بر اساس نامساوی کلاسیوس در حالت تساوی (فرایند بازگشت پذیر)، میان دو نقطه دلخواه از هر مسیری، مقدار انتگرال ثابت است و مقدار انتگرال از مسیر AB برابر است با مقدار مقدار انتگرال از مسیر AC می باشد.

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_C$$

$$\int_r^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = \int_r^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_C$$

معادله فوق بیانگر این است که $\oint \frac{\delta Q}{T}$ مستقل از مسیر است و می‌توان از آن به مفهوم آنتروپی رسید. آنتروپی به عنوان خاصیتی از یک ماده با رابطه زیر تعریف کرد.

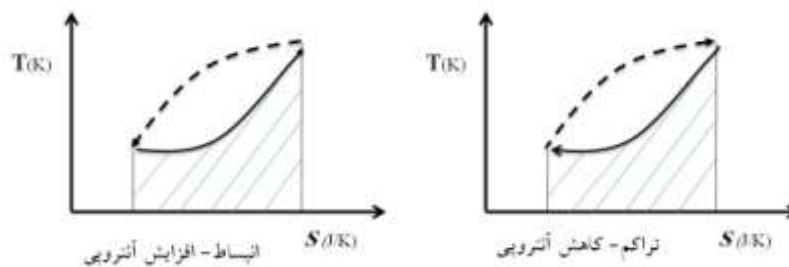
$$\int dS = \int \frac{\delta Q}{T}$$

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (۴-۷)$$

$S =$ آنتروپی، J/K

با لحاظ کردن دمای متوسط در فرآیند برگشت پذیر:

انتقال حرارت به سیستم منجر به افزایش آنتروپی می‌شود و گرفتن حرارت از سیستم سبب کاهش آنتروپی سیستم می‌شود. بنابراین در فرآیند آدیاباتیک بازگشت پذیر، آنتروپی سیستم صفر است.



شکل ۷-۱۰. فرآیند افزایش و کاهش آنتروپی در نمودار T-S

در فرآیند انبساط - هم فشار بازگشت پذیر، آنتروپی سیستم زیاد می‌شود زیرا با گرفتن حرارت از محیط همراه است. و در فرآیند تراکم - هم فشار بازگشت پذیر، آنتروپی سیستم کم می‌شود زیرا با دادن حرارت به محیط همراه است پس آنتروپی سیستم کم می‌شود. بنابراین تغییرات آنتروپی ΔS در فرآیند برگشت پذیر فقط بستگی به جهت انتقال حرارت دارد. اگر سیکل بسته باشد، انتقال حرارت برابر با مساحت سطح

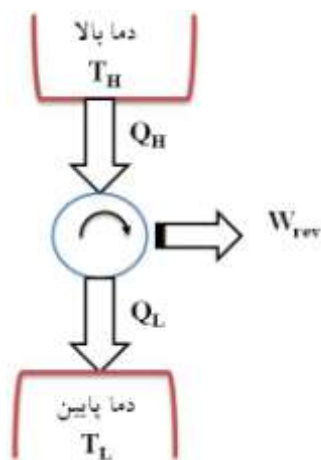
داخلی سیکل است که در سیکل ساعت گرد مثبت و در خلاف آن منفی می باشد.
در یک سیکل بسته ترمودینامیکی تغییرات انرژی داخلی صفر است ($\Delta u=0$). در نتیجه کار و انتقال حرارت با هم برابر است.

$$Q - W = 0 \Rightarrow Q = W$$

مقدار مخصوص آنتروپی یک خاصیت مقداری سیستم است و در ناحیه دو فازی همانند دیگر پارامترهای ترمودینامیکی (حجم مخصوص، آنتالپی، انرژی داخلی مخصوص) محاسبه می گردد (فرمول ۵-۷).

$$s = s_f + x s_{fg} \quad (5-7)$$

برای تمام سیکل های ماشین گرمایی برگشت پذیر، $\oint \frac{\delta Q}{T} \geq 0$ است. مقدار T_H و T_L ثابت هستند و هر چه این دو دما به هم نزدیک تر شوند انتگرال سیکلی انرژی حرارتی به صفر نزدیک تر می شود.



شکل ۱۱-۷. سیکل تولید قدرت در ماشین برگشت پذیر

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0 \quad (6-7)$$

حال اگر ماشین برگشت‌ناپذیر باشد و بین T_H و T_L کار کند و از هر دو منبع Q_H مساوی دریافت کنند، کار انجام شده در فرآیند برگشت‌پذیر (W_{re}) بزرگ‌تر از کار انجام شده در فرآیند برگشت‌ناپذیر (W_{ir}) می‌باشد.

$$W_{re} > W_{ir} \Rightarrow Q_H - Q_{Lre} > Q_H - Q_{Lir}$$

$$Q_{Lre} > Q_{Lir}$$

۷-۴-۱ تغییر آنتروپی در فرآیندهای بازگشت‌پذیر

این بخش در دو قسم باید مورد بررسی قرار گیرد

الف) فرآیند فشار ثابت بازگشت‌پذیر:

بر اساس تعریف قانون اول ترمودینامیکی،

$${}_1Q_2 = dU + {}_1W_2$$

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + PV_2 - PV_1$$

$${}_1Q_2 = (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1)$$

$$Q = \Delta H$$

در نتیجه مقدار تغییرات آنتروپی برابر است با تغییر آنتالپی به دما (رابطه ۷-۷).

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{\Delta H}{T}$$

$$\Delta S = \frac{H_2 - H_1}{T} \quad (7-7)$$

در ناحیه اشباع دوفازی، برای رسیدن از نقطه مایع اشباع به بخار اشباع، تغییرات آنتروپی برابر است با:

$$\Delta S = \frac{H_g - H_f}{T} = \frac{H_{fg}}{T}$$

$$\Delta S = \frac{mh_{fg}}{T} \quad (8-7)$$

ب) فرآیند حجم ثابت بازگشت پذیر:

بر اساس تعریف قانون اول ترمودینامیکی، کار برابر صفر است در نتیجه:

$${}_1Q_2 = \Delta U$$

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \Rightarrow \Delta S = \frac{\Delta U}{T} \quad (9-7)$$

فرمول (۹-۷) بیانگر این است که در یک فرآیند حجم ثابت، تغییرات آنتروپی برابر با تغییرات انرژی داخلی سیستم است.

۷-۴-۲ فرآیند بازگشت پذیر و ارتباط آنتالپی، آنتروپی و انرژی داخلی

وقتی که برای اندازه گیری های گرماسنجی، از گرماسنج بمبی استفاده می کنیم، اثر گرمایی در حجم ثابت اندازه گیری می شود. واکنش های معمولی در فشار ثابت انجام می شوند. رابطه میان تغییر در آنتالپی و تغییر در انرژی داخلی برای تبدیل گرماهای واکنش در حجم ثابت به گرماهای واکنش در فشار ثابت مورد استفاده قرار می گیرد. این تغییر با توجه به تغییر حجم محصولات واکنش به عمل می آید و این تغییر در حجم مایعات و جامدات به قدری است که می توان آن را نادیده گرفت. برای یک ماده تراکم پذیر ساده، رابطه بین آنتروپی و انرژی داخلی برابر است با:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \Rightarrow TdS = \delta Q$$

از طرفی تغییرات انرژی حرارتی برابر است با:

$$\delta Q = dU + \delta W$$

در نتیجه با جاگذاری مقدار تغییرات Q در معادله آنتروپی، معادله جدید عبارتست از:

$$TdS = dU + \delta W \Rightarrow TdS = dU + PdV$$

معادله نهایی که بیانگر رابطه بین آنتروپی و انرژی داخلی باشد عبارت است از:

$$Tds = du + pdv \quad (۱۰-۷)$$

رابطه جدید دیگری که بیانگر رابطه فی مابین آنتالپی و آنتروپی سیستم باشد عبارت است از:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \Rightarrow \quad TdS = dU + PdV$$

از طرفی آنتالپی سیستم برابر است با:

$$H = U + PV \quad \Rightarrow \quad dU = dH - PdV - VdP$$

با قرار دادن آن در معادله آنتروپی:

$$TdS = dH - PdV - VdP + PdV$$

$$TdS = dH - VdP \quad (۱۱-۷)$$

یا بر اساس حالت مخصوص آنها عبارت است از:

$$Tds = dh - vdp$$

۳-۷-۷ تغییر آنتروپی در جامدات و مایعات

با توجه به اینکه در جامدات و مایعات تغییر حجم بسیار ناچیز است بنابراین می‌توان نوشت.

$$Tds = du - pdv \rightarrow Tds = du$$

$$\delta Q = dU = mcdT \quad \text{از طرفی}$$

$$du = cdT, \quad Tds = du$$

$$ds = c \frac{dT}{T}$$

$$ds = c \ln T$$

$$ds = c \ln\left(\frac{T_r}{T_l}\right) \quad (۱۲-۷)$$

۴-۴-۷ آنتروپی در فرآیند پلی تروپیک

براساس معادله پلی تروپیک $PV^n = mRT$ در فصول قبل در توان‌های مختلف پلی تروپیک مفصلاً صحبت شد.

۵-۴-۷ تغییر آنتروپی در فرآیند بازگشت ناپذیر

در تعریف آنتروپی می‌توان گفت که

$$\Delta S \geq \frac{\delta Q}{T}$$

اگر عوامل بازگشت ناپذیری به حداقل یا صفر برسد معادله فوق مساوی خواهد شد. به عبارت دیگر اگر عواملی همانند اصطکاک، احتراق، گرمای بالا باشند مقدار تغییرات آنتروپی بیشتر از نسبت انتقال حرارت به دما خواهد بود و مقدار این افزایش همان کار تلف شده (LW) است.

$$\Delta S = \frac{\delta Q}{T}$$

اگر $LW = 0$ باشد، فرآیند بازگشت پذیر است. اگر $LW < 0$ باشد فرآیند بازگشت ناپذیر است.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta LW}{T}$$

از نکات مهمی که در این بخش می‌توان اشاره کرد این است که:

- تغییر آنتروپی سیستم ایزوله در فرآیند بازگشت پذیر صفر است $\Delta S = 0$
- تغییر آنتروپی سیستم ایزوله در فرآیند بازگشت ناپذیر بیش از صفر است
- فرآیندی که آنتروپی طی آن تغییر نکند لزوماً بازگشت پذیر نیست.
- فرآیند آدیاباتیک بازگشت پذیر (آیزونتروپیک)، تغییر آنتروپی صفر است.

۶-۴-۷ تغییر آنتروپی سیستم و محیط

در طی فرآیندی که با انتقال حرارت همراه است. آنتروپی سیستم تغییر می‌کند بالطبع آنتروپی محیط هم می‌تواند تغییر کند که عکس تغییرات آنتروپی سیستم است.

$$Q_{\text{Sys}} = -Q_{\text{Env}} \quad \text{محیط} \quad \text{سیستم}$$

همواره مجموع تغییرات آنتروپی محیط و سیستم بزرگ‌تر یا مساوی صفر است که به آن اصل افزایش آنتروپی سیستم گویند. تغییرات آنتروپی محیط صفر است.

$$\Delta S_{\text{Env}} + \Delta S_{\text{Sys}} \geq 0$$

$$\Delta S_{\text{Env}} = 0 \Rightarrow \Delta S_{\text{Sys}} \geq 0$$

مثال (۱-۷): دمای یک کیلو گرم از گازی درون یک ظرف صلب در بسته، ضمن تبادل حرارت با محیط 27°C درجه، از 227°C به 127°C کاهش می‌یابد. تغییر آنتروپی محیط چند $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ است

$$(R = 297,0, C_p = 0,17 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})$$

$$q = C_v \Delta T$$

$$q = (C_p - R) \Delta T$$

$$q = (0,17 - 0,29)(227 - 127)$$

$$q = +72 \rightarrow \text{kJ/kg}$$

$$\Delta s = \frac{q}{T} = \frac{72}{300} = 0,24 \rightarrow \text{kJ/kg}$$

مثال (۲-۷): سیستم طی یک فرآیند 150 kJ حرارت در دمای 300 K از دست می‌دهد و مقدار 100 kJ کار روی آن انجام می‌شود. تغییر آنتروپی سیستم را محاسبه نمایید.

$$\Delta S = \frac{Q}{T} + \frac{LW}{T}$$

$$\Delta S = \frac{-150}{300} + \frac{LW}{300} = -0.5 + \frac{LW}{300}$$

$$\Delta S = -0.5 + \frac{LW}{300}$$

چون تغییر آنتروپی همواره منفی است پس مقدار LW در صورت وجود، همواره عددی مثبت است.

فصل هشتم

سیکل‌ها

اهداف

در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:

۱. آشنایی با سیکل در موتورهای حرارتی و بررسی راندمان آن

۲. آشنایی با انواع سیکل‌های ترمودینامیکی

مقدمه

اکثر نیروگاه‌ها از جمله نیروگاه ساده بخار در یک سیکل کار می‌کنند و سیال فعال یک سری فرایندها را طی می‌کند و در انتهای فرایند به حالت اولیه باز می‌گردد. در برخی دیگر از نیروگاه‌ها از جمله موتورهای احتراق داخلی و توربین گاز، موتور خود سیکل مکانیکی را طی می‌کند اما سیال فعال خود سیکل ترمودینامیکی را طی نخواهد کرد بدین معنی که حالت نهایی سیال متفاوت از حالت ابتدایی سیکل می‌باشد. به چنین سیکل‌هایی، سیکل باز هم گفته می‌شود. در مقابل به نیروگاه‌های بخار سیکل بسته هم اطلاق می‌شود. این حالت‌ها در سیکل تبرید هم وجود دارد. در هر دو نوع سیکل باز و بسته می‌توان عملکرد سیکل و چگونگی افزایش آن را در حالت بسته بررسی نمود. سیکل‌های زیادی در سیستم‌های حرارتی و برودتی وجود دارند که برخی از آن‌ها عبارتند از سیکل کارنو، سیکل رنکین، سیکل با باز گرمایش، سیکل برایتون، سیکل اتو، سیکل دیزل، سیکل استرلینگ، سیکل تبرید تراکمی و سیکل‌های ترکیبی قدرت و تبرید

... می‌باشند. بنابراین این بخش به بررسی سیکل‌هایی که دارای کاربرد بیشتر در تجهیزات حرارتی و برودتی هستند می‌پردازیم. همچنین بخارها و گازهای ایده‌آل را به عنوان سیال فعال لحاظ می‌نماییم. تلاش می‌شود تا نشان دهیم که چگونه می‌توان عملکرد سیکل‌ها را با لحاظ کردن تعدیلات خاص از قبیل بازیاب‌ها، کمپرسورهای چند سری، منبسط کننده‌ها و سرد کننده‌ها واسطه‌ایی بهبود بخشید.

۸-۱ سیکل موتور حرارتی

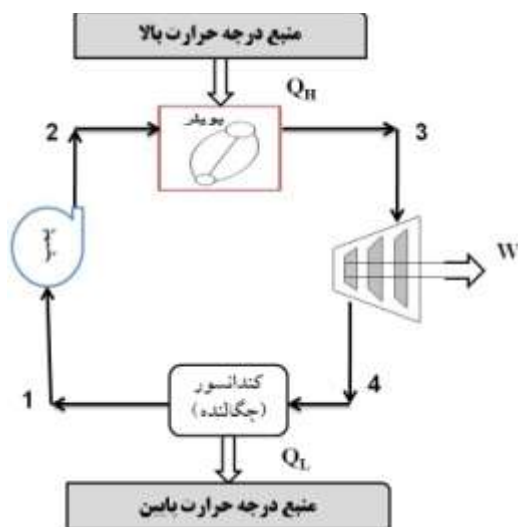
موتورهای حرارتی سیکلی را که دارای چهار فرآیند مجزا هستند را به طور کامل بررسی نمودیم. در فرآیند SSSF بازگشت‌پذیر با ناچیز در نظر گرفتن انرژی جنبشی و پتانسیل، کار محوری ویژه (کار ویژه) با استفاده از فرمول (۸-۱) مشخص می‌شود.

$$w = -\int v dP \quad (8-1)$$

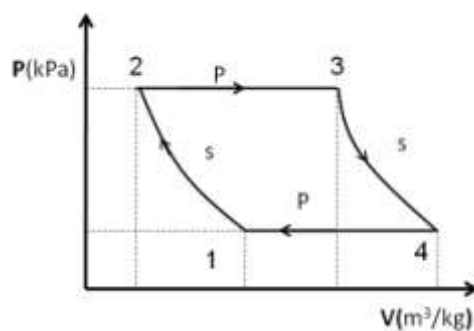
و در فرآیند برگشت‌پذیر ماده تراکم‌پذیر ساده، مقدار کار ویژه برابر است با:

$$w = \int p dv$$

در فرآیند USUF (حالت یکنواخت - جریان یکنواخت) با ثابت در نظر گرفتن فشار، مقدار کار انجام شده صفر می‌باشد. در بررسی یک سیستم تولید توان (شکل ۸-۱) چهار فرآیند SSSF را مشاهده می‌کنیم و هر یک از این فرآیندها ذاتاً برگشت‌پذیر و میزان تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل بسیار اندک می‌باشد. فرض هر دو فرآیند انتقال حرارت (در بویلر و چگالنده) در فشار ثابت انجام می‌شود و دو فرآیند پمپ و توربین آدیاباتیک است که اصطلاحاً به آن فرآیند آیزنتروپیک اطلاق می‌گردد. حال فرآیند را می‌توان بر روی سیکل نشان داد (شکل ۸-۲). اگر تمام سیکل در ناحیه دوفازی انجام گرفته باشد چون فرآیند فشار ثابت به صورت همداست سیکل حاصل سیکل کارنو خواهد بود در غیر این صورت، سیکل حاصله سیکل کارنو نخواهد بود.



شکل ۸-۱. موتور حرارتی در سیکل کارنو



شکل ۸-۲. سیکل تولید توان کارنو

مقدار کار خالص در موتور حرارتی به صورت ذیل محاسبه می‌شود.

$$w_n = \int_1^2 p dv + \int_2^3 p dv + \int_3^4 p dv + \int_4^1 p dv \quad (۲-۸)$$

همان‌طور که از شکل (۲-۸) پیداست، کار خالص خروجی برابر است با سطح

محصول خطوط فرآیندهای ۱-۲-۳-۴-۱ می باشد

۱-۱-۸ راندمان در سیکل تولید توان

در هر سیستم تولید کننده و مصرف کننده قدرت، راندمان سیکل به عنوان نماد و شاخصی برای سنجش وضعیت سیکل تعریف می شود.

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H}$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} \quad (۳-۸)$$

مقدار η همواره کمتر از یک می باشد

مثال (۱-۸): در یک سیکل تولید قدرت، مقدار ۱۰۰ کیلوژول حرارت از یک منبع گرم ستانده و حدود ۵۰ کیلوژول آن به یک منبع سرد داده می شود. مطلوبست محاسبه راندمان سیکل.

$$\eta = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{۵۰}{۱۰۰} = ۰,۵۰$$

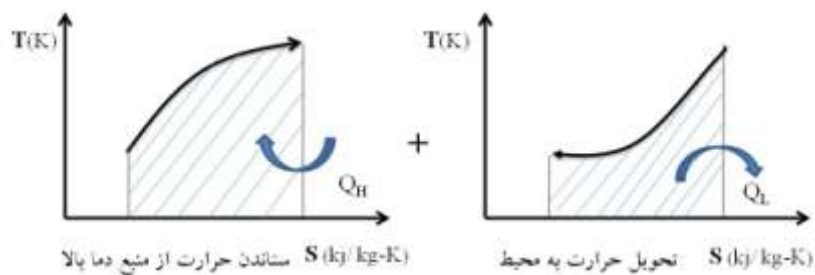
همواره با افزایش Q_H و کاهش Q_L راندمان سیکل تولید قدرت افزایش می یابد و با استفاده از این روش می توان راندمان سیکل ها را بهبود داد. در فرآیند بازگشت پذیر، سطح زیر منحنی دیاگرام (T-S) معرف میزان حرارت انتقال یافته می باشد در چنین فرآیندی، کاهش آنتروپی همراه با گرفتن حرارت از سیستم می باشد (Q_L) و افزایش آنتروپی همراه با دادن حرارت به سیستم (Q_H) است (شکل ۳-۸).

از مجموع دو نمودار دما-آنتروپی در شکل (۳-۸)، سیکل بسته ای به وجود می آید که به سیکل بسته تولید قدرت معروف است و برای یک گاز ایده آل، سیکل بسته قدرت معرف مقدار خالص حرارت سیکل و همچنین مقدار کار خالص مبادله شده بین سیستم و محیط می باشد. لازم به ذکر است که برای یک گاز ایده آل در یک

سیکل‌ها ۱۵۳

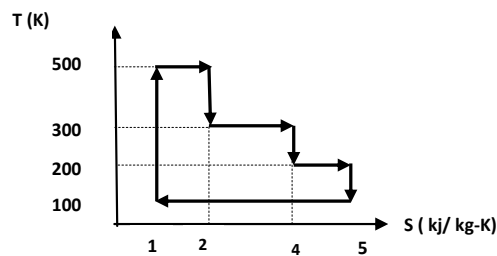
سیکل بسته، مقدار تغییرات انرژی داخلی ($\Delta U=0$) برابر با صفر است. مقدار راندمان سیکل در این حالت برابر است با نسبت مساحت خالص داخل سیکل به مساحت سطح زیر نمودار در جذب حرارت از منبع دما بالا می‌باشد.

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad (۴-۸)$$



شکل ۸-۳. سیکل بازگشت‌پذیر تولید قدرت در نمودار دما-آنترپی

مثال (۸-۲): در سیکل برگشت‌پذیر زیر، بازده سیکل را محاسبه نمایید.



سطح زیر نمودار در جذب حرارت $Q_H =$

$$= (500 \times 1) + (300 \times 2) + (300 \times 1)$$

$$Q_H = 1300$$

مساحت سطح بسته $W =$

$$= (400 \times 1) + (200 \times 2) + (100 \times 1)$$

$$W = 900$$

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{900}{1300} = 70\%$$

۸-۱-۲ سیکل رنکین

این سیکل متناظر با سیکل چهار فرآیند کارنو بوده که اساس آن تولید قدرت است. در سیکل رنکین از تغییر فاز بین بخار و مایع استفاده می‌شود تا اختلاف حجم ویژه بین فرآیندهای تراکم و انبساط حداکثر شود و به عنوان سیکل ایده‌آل برای نیروگاه‌های بخار آب است. این سیکل از یک منبع با دمای بالا انرژی حرارتی را دریافت و به کار تبدیل می‌کند. حال سیکل شکل (۸-۱) را بر روی نمودار T-S نشان می‌دهیم.

سیکل را می‌توان در چهار مرحله به شرح ذیل توصیف نمود:

مرحله شروع سیکل با دریافت مایع اشباع از چگالنده و انتقال آن به دیگ بخار توسط پمپ همراه می‌باشد. پمپ مایع را با افزایش فشار به دیگ بخار ارسال می‌کند. ورودی پمپ باید مایع اشباع باشد و در ناحیه دو فازی قرار نداشته باشد. به واسطه بالا بودن سرعت انتقال، فرآیند پمپ کردن همراه با افزایش دما، آدیاباتیک و بازگشت‌پذیر است که در بنابراین می‌توان پمپ را آیزونتروپیک فرض کرد.

$$Q = 0, \quad \Delta S = 0 \Rightarrow S_2 = S_1$$

چون مایع غیر متراکم است پس فرآیند پمپ کردن فرآیند حجم ثابت است. کار انجام شده حجم ثابت صورت می‌گیرد. برابر است با:

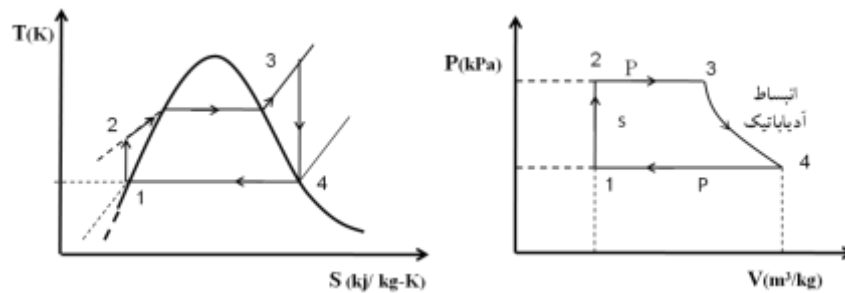
$$|w_p| = \int v dp = v(P_2 - P_1) \quad (8-5)$$

از طرفی کار انجام شده بر اساس فرآیند SSSF برابر با تغییر آنتالپی سیستم است

$$|w_p| = H_2 - H_1$$

در مرحله دیگ بخار، آب در ناحیه مایع متراکم و با فشار ثابت بالا، وارد دیگ

بخار می‌شود. آب حرارت را از منبع با دمای بالا (سوختن سوخته‌های فسیلی) دریافت نموده و وارد ناحیه دو فاز گشته و سپس تبخیر می‌شود و با ادامه حرارت دهی تبخیر کامل شده و وارد ناحیه مافوق گرم می‌شود.



شکل ۸-۴. چهار فرآیند در سیکل رنکین بر روی نمودار P-V و T-S

فشار ورودی و خروجی دیگ برابر است. فرآیند دیگ بخار لزوماً همدم نیست و خروجی آن در ناحیه بخار مافوق گرم قرار دارد. بر اساس قانون اول در فرآیند SSSF در دیگ بخار، تغییرات آنتالپی همان مقدار انرژی گرمایی داده شده به سیستم، که برابر است با:

$$Q_H = H_3 - H_1$$

چون حرارت دریافت می‌کند پس با افزایش آنتروپی همراه می‌باشد و دیگ به تنهایی در تولید و مصرف کار نقشی ندارد و کار انجام شده برابر با صفر است. ماگزیم دمای کاری در سیکل رنکین در ورودی توربین می‌باشد ناحیه ۳-۴ توربین به عنوان تولید کننده کار و مصرف کننده انرژی قرار دارد. بخار با دما و فشار بالا دارای پتانسیل انرژی سازی بالایی در توربین می‌باشد و همانند پمپ فرآیند آدیباتیک و آیزنتروپیک عمل می‌نماید.

$$Q = 0, \quad \Delta S = 0 \Rightarrow S_4 = S_3$$

بعد از ورود بخار گرم با فشار بالا به توربین، افت فشار در قسمت خروجی توربین ایجاد می‌شود. مقدار کار در توربین مطابق قانون اول ترمودینامیک (SSSF)

برابر است با:

$$W_T = H_3 - H_4$$

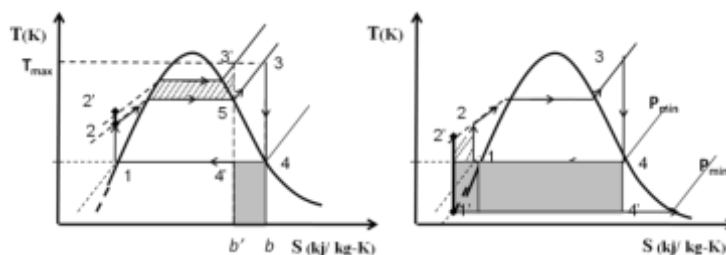
در مرحله چگالنده یا کندانسور، بخار خروجی از توربین را در فشار پایین دریافت و بعد از دفع حرارت (Q_L)، تقطیر می‌نماید و تبدیل به مایع متراکم نموده و تحویل پمپ می‌دهد. فرآیند در فشار ثابت انجام می‌گیرد و مایع تحویلی در ناحیه دو فازی نیست.

جریان هوای محیط می‌تواند منبع سرد (Q_L) باشد و کار انجام شده برابر با تغییر آنتالپی در سیستم می‌باشد. مقدار Q_L منفی می‌باشد و مقدار آنتروپی سیستم کاهش می‌یابد و دخالته در تولید یا مصرف کار سیستم ندارد.

در این قسمت به عوامل مؤثر بر سیکل رنکین می‌پردازیم. همانطور که از سیکل‌ها آموختیم، راندمان سیکل (η) به مقدار Q_L و Q_H در سیستم وابسته می‌باشد (فرمول ۸-۳).

$$\eta_r = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

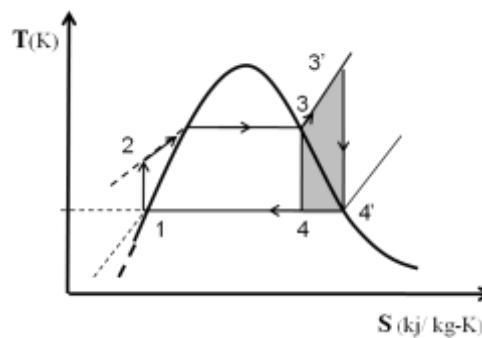
بر اساس راندمان سیکل، با افزایش Q_L راندمان سیکل کم می‌شود. و با کاهش آن راندمان افزایش می‌یابد. افزایش یا کاهش Q_L و Q_H به فشار و دما وابسته می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۵-۸) نشان داده شد با افزایش فشار از ۲ به ۲' در ضمن ثابت نگه داشتن دمای سیکل، کار سیکل از قسمت فوقانی نمودار افزایش و از قسمت راست نمودار (۴-۴'-۴-b-۴) کاهش می‌یابد که همان کاهش Q_L می‌باشد.



شکل ۵-۸. بررسی تغییرات فشار بر عملکرد سیکل رنکین

با توجه به اینکه با افزایش فشار راندمان سیکل افزایش می‌یابد لیکن خروجی توربین در ناحیه دو فازی (4') می‌باشد که کیفیت کمتری دارد. با کاهش فشار، کاهش Q_L را در پی خواهد داشت و منجر به افزایش سطح داخلی (W) می‌شود. کم کردن فشار سیکل به دلیل محدودیت‌های فنی تا حد خاصی امکان پذیر است.

با افزایش دمای خروجی در دیگ بخار، سطح داخلی منحنی کار (W) افزایش یافته و بالطبع افزایش راندمان سیکل را در پی خواهد داشت. مطابق شکل (۸-۶)، سطح زیر منحنی (4-3'-4'-4) به کار خروجی اضافه می‌شود. در این حالت برعکس افزایش فشار، کیفیت بخار خروجی از توربین افزایش می‌یابد.



شکل ۸-۶. اثر افزایش دما بر راندمان سیکل رنکین

مثال (۸-۳): در سیکل رنکین بخار آب با فشار ۴۰۰۰ kPa و دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس از بویلر خارج و وارد توربین می‌شود اگر فشار کندانسور ۱۰ kPa باشد با فرض پایا بودن فرآیند و صرفنظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل، مطلوبست بازده سیکل.

برای محاسبه بازده سیکل باید کار توربین و کار پمپ و همچنین گرمای داده شده به سیستم (بویلر) را محاسبه نماییم. با استفاده از فرمول (۸-۴):

در ورودی: P_1 معلوم، مایع اشباع

در خروجی: P_2 معلوم $\eta_r = \frac{W_{net}}{q_H}$

بر اساس قانون دوم $S_r = S_1$

کار خالص برابر است با: $w = w_t - w_p$

۱. کار پمپ برابر با اختلاف آنتالپی دو نقطه می باشد.

$$w_p = h_r - h_1 = \int_1^r v dp = v(P_r - P_1)$$

$$w_p = 0.0101(4000 - 10) = 4 \rightarrow \text{kJ / kgk}$$

از طرفی

$$h_1 = 191.8 \rightarrow \text{kJ / kg}$$

$$w_p = h_r - h_1 \Rightarrow h_r = 191.8 + 4 = 195.8 \rightarrow \text{kJ / kg}$$

۲. در توربین حالت ورودی: T_3, P_3 معلوم، و در خروجی: P_4 معلوم

بنابراین کار در توربین برابر است با

$$w_p = h_r - h_f$$

بر اساس قانون دوم $S_f = S_r$ ، از جدول:

$$h_r = 3213.6 \rightarrow \text{kJ / kg}, \quad s_r = 6.769 \rightarrow \text{kJ / kgK}$$

$$s_r = S_f = S_f + x s_{fg} = 6.769 = 6.443 + x 0.75 \rightarrow x = 0.82$$

$$h_f = h_f + x h_{fg} = 191.8 + (0.82 \times 2392.8) = 2144.1 \rightarrow \text{kJ / kg}$$

$$w_p = h_r - h_f \Rightarrow = 3213.6 - 2144.1 = 1069.5 \rightarrow \text{kJ / kg}$$

۳. در بویلر حالت ورودی: h_2, P_2 معلوم، و در خروجی: حالت سوم معلوم

$$q_H = h_r - h_r \quad q_H = 3213.6 - 195.8 = 3017.8 \rightarrow \text{kJ / kg}$$

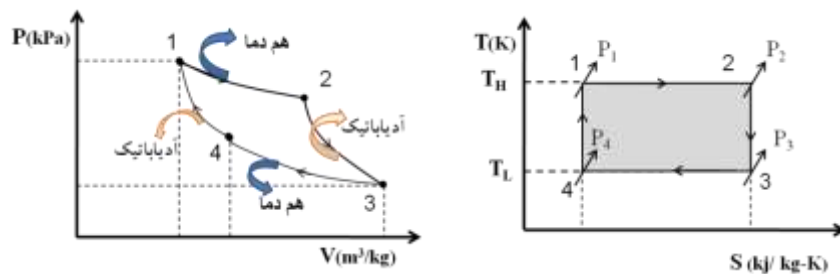
نهایتاً راندمان برابر است با نسبت کار خالص به گرمای داده شده در بویلر

$$\eta_r = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{1069.5 - 4}{3017.8} = 35.3\%$$

$$q_L = h_f - h_1 \quad q_L = 2144/1 - 191/8 = 1952/3 \rightarrow \text{kJ/kg}$$

۸-۱-۱ سیکل کارنو

جزء سیکل‌های استاندارد هوایی است بدین معنی که ماده کاری سیکل گاز است و فاز مایع یا حالت دو فازی در سیکل مشاهده نمی‌شود. مثال بارز سیکل‌های استاندارد هوایی، موتورهای بنزینی، دیزل، و توربین‌های گازی می‌باشند که ورود هوا و سوخت و خروجی محصولات احتراق می‌باشد.



شکل ۸-۷. سیکل استاندارد هوایی کارنو در دو نمودار (P-V) و (T-S)

این سیکل شامل دو فرآیند مجزای هم‌دما و آدیاباتیکی در توربین و کمپرسور می‌باشد که هر کدام به‌طور جداگانه به شرح ذیل می‌باشد (شکل ۸-۷).

۲-۱) انبساط هم‌دما در توربین می‌باشد که با گرفتن حرارت Q_H همراه می‌باشد همان‌طور که می‌دانیم گرفتن حرارت با افزایش آنتروپی سیستم همراه می‌باشد. توربین یک فرآیند برگشت‌پذیر نیز می‌باشد که به واسطه آدیاباتیکی بودن آن مقدار تغییرات انرژی حرارتی صفر می‌باشد. با ورود سیال گرم به توربین، افزایش حجم و کاهش فشار در سیستم ایجاد که به واسطه حالت انبساطی، قدرت در توربین ایجاد می‌شود.

۳-۲) انبساط آیزنتروپیک در توربین که به دلیل ایزوله کامل توربین باشد. در این فرآیند همانند انبساط هم‌دما با تولید قدرت همراه است و افزایش حجم و کاهش فشار را داریم

۴-۳) تراکم هم‌دما در کمپرسور می‌باشد. در این حالت حرارت Q_L به محیط بر می‌گردد. چون سیستم آدیاباتیکی نیست پس منجر به کاهش آنتروپی سیستم می‌شود. به

سبب مصرف قدرت در این مرحله، فرآیند با کاهش حجم و افزایش فشار توام می‌باشد.

۴-۱) تراکم آیزنتروپیک در کمپرسور می‌باشد. کمپرسور در این مرحله کاملاً ایزوله بوده و همچنین به واسطه بازگشت‌پذیر بودن آن آنتروپی سیستم ثابت می‌باشد. فرایند تراکمی همواره با مصرف قدرت و کاهش حجم همراه می‌باشد بر اساس نوع فرآیند رخ داده شده، نمودار (T-S) به فرم مربع یا مستطیل می‌باشد. در سیکل استاندارد هوایی کارنو هیچ فرآیند فشار ثابتی وجود ندارد اما در سیکل کارنوی بخار، چون فرآیند دما ثابت در ناحیه دو فاز قرار دارد پس فرآیند فشار ثابت وجود دارد.

بر اساس نمودار (P-V) حداکثر فشار سیکل در خروج از کمپرسور آیزنتروپیک و ورود به توربین همدمای می‌باشد. افزایش دمای منبع بالا و کاهش دما در منبع پایین منجر به افزایش کار و راندمان سیستم می‌شود. بنابراین کار تولیدی در توربین همدمای بزرگ‌تر از کار مصرفی در کمپرسور همدمای می‌باشد. کار توربین برابر است با:

$$W_T = mRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (۴-۸)$$

راندمان سیکل کارنو (η_k) بر اساس دمای ماگزیمم و مینیمم صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که حرارت بر حسب کلونین می‌باشد.

$$\eta_k = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \Rightarrow \quad \eta_k = 1 - \frac{T_f}{T_i} \quad \text{or} \quad = 1 - \frac{T_r}{T_f}$$

T_4 دمای تراکم کمپرسور آیزنتروپیک، T_3 تراکم همدمای در کمپرسور، T_2 انبساط آیزنتروپیک توربین، T_1 انبساط توربین می‌باشد.

مثال (۴-۸): چرا در یک سیکل کارنو، کار تولیدی در توربین همدمای، بیش از کار مصرفی در کمپرسور همدمای است.

فرآیند ۱ به ۲ یک فرآیند همدمای توربین است و کار در این فرآیند برابر است با:

$$W_T = mRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = mRT_1 \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

فرآیند ۳ به ۴ یک فرآیند همدمای در کمپرسور است

$$W_C = mRT_3 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = mRT_3 \ln\left(\frac{P_3}{P_4}\right)$$

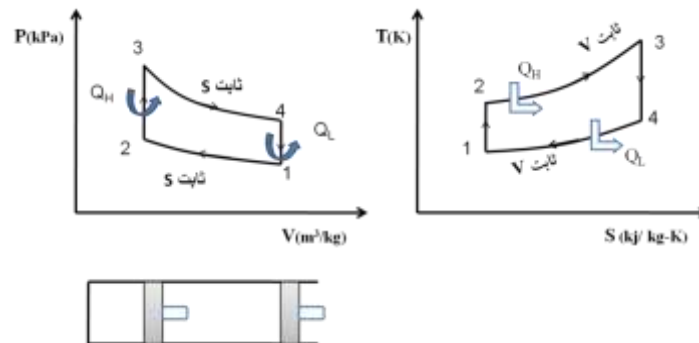
با توجه به اینکه $T_1 > T_3$ می‌باشد و همچنین بر اساس نسبت تساوی فشارها:

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{P_1}{P_2}$$

$$W_T > |W_C|$$

۸-۱-۴ سیکل اتو

جزء سیکل‌های استاندارد هوایی است و در موتورهای احتراق داخلی بکار می‌رود. این سیکل در چهار مرحله به شرح ذیل می‌باشد:



شکل ۸-۸ سیکل استاندارد هوایی اتو در دو نمودار (P-V) و (T-S)

- فرآیند ۱-۲ تراکم آیزنتروپیک و تک‌آنتروپی برای هوا است. پیستون از نقطه مرگ پایین حرکت کرده و در نقطه مرگ بالا پایان می‌یابد. گرما در حجم ثابت به‌طور لحظه‌ای در نقطه مرگ بالا داده می‌شود.

- فرآیند ۳-۲ انتقال حرارت در حجم ثابت است اشتعال مخلوط سوخت هوا - توسط شمع است به عبارتی همان احتراق در موتور می باشد که با انتقال حرارت به سیستم در حجم ثابت و معین همراه می باشد.
 - فرآیند ۴-۳ انبساط آیزونتروپیک و تک آنتروپی است. این مرحله از نقطه مرگ بالا شروع شده و تا نقطه مرگ پایین ادامه می یابد.
 - فرآیند ۱-۴ انتقال حرارت به محیط یا همان تخلیه سیستم می باشد که پیستون در نقطه مرگ پایین است.
- مصرف قدرت در مرحله تراکم و تولید قدرت در انبساط آیزونتروپیک صورت می گیرد. در این مراحل، بر اساس روابط موجود در فرآیند آدیاباتیک ($n=\gamma$) داریم:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^\gamma$$

در مراحل آیزونتروپیک سیکل روابط فوق به صورت فرمول (۷-۸) می باشد.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \quad \text{or} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} \quad (7-8)$$

در مراحل حجم ثابت (از مرحله ۲ به ۳ و همچنین از مرحله ۴ به ۱) این نسبت برابر است با:

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad \text{or} \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

از طرفی نسبت تراکم (r_v) در سیکل اتو از اهمیت بالایی برخوردار است. تراکم عبارت از نسبت حجم ماگزیم به حجم مینیمم است.

$$r_v = \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}}\right) = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

$$\eta_o = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad \Rightarrow \quad \eta_o = 1 - \frac{1}{r_v^{(\gamma-1)}} \quad (8-8)$$

مثال (۵-۸): اگر دمای ورودی در سیکل استاندارد هوایی اتو 30°C باشد و نسبت تراکم ۵ باشد، دمای پس از تراکم با فرض $\gamma = 1/5$ را محاسبه نمایید.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = (r_v)^{\gamma-1} = (5)^{0.5} = 2.23$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 2.23 \Rightarrow T_2 = 2.23 \times 303.2 = 677.94\text{K} = 404.7^{\circ}\text{C}$$

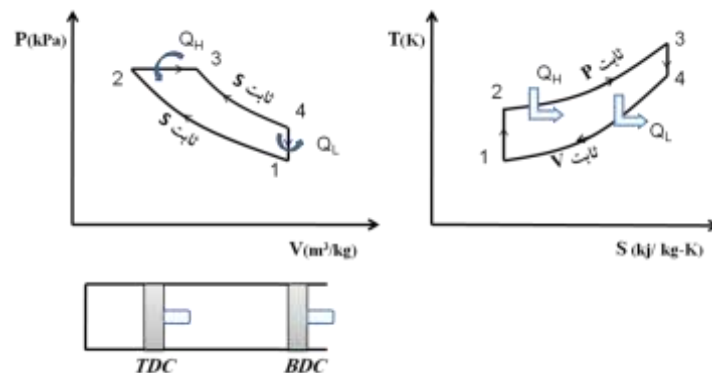
راندمان سیکل اتو (η_o) بر اساس گرمای ویژه هوا عبارت است از:

$$\eta_o = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \Rightarrow \eta_o = 1 - \frac{mC_v(T_4 - T_1)}{mC_v(T_3 - T_1)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_1)}$$

بازده سیکل اتو با افزایش نسبت تراکم افزایش می‌یابد و همچنین در موتورهای اشتعال جرقه با افزایش نسبت تراکم بازده افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که افزایش تراکم باید تا حدی صورت گیرد که حالت کوبش ایجاد نگردد.

۵-۱-۸ سیکل دیزل

این سیکل هم جزء سیکل‌های استاندارد هوایی است و به عنوان سیکل ایده‌آل برای موتورهای دیزل (یا موتورهای تراکمی) می‌باشد. گرما در فشار ثابت و معین به سیال داده می‌شود که همان فرآیند تزریق سوخت در موتور است.



شکل ۵-۹. سیکل استاندارد هوایی دیزل در دو نمودار (P-V) و (T-S)

مراحل مختلف سیکل به شرح ذیل می‌باشد

- فرآیند ۱-۲ تراکم آیزنتروپیک و تک‌آنترپپی برای هوا است. پیستون از نقطه مرگ پایین حرکت کرده و در نقطه مرگ بالا پایان می‌یابد.
 - فرآیند ۲-۳ انتقال حرارت در حجم ثابت است گاز در فرآیند دریافت گرما منبسط می‌شود. انتقال حرارت به سیستم در حجم ثابت با ثابت نگه داشتن فشار سیستم همراه است. در نقطه ۳ دریافت گرما متوقف می‌شود.
 - فرآیند ۳-۴ انبساط آیزنتروپیک و تک‌آنترپپی است و پیستون به نقطه مرگ پایین می‌رسد.
 - فرآیند ۴-۱ انتقال حرارت به محیط یا همان تخلیه سیستم می‌باشد که در حجم ثابت و در نقطه مرگ پایین است.
- همان‌طور که در شکل (۸-۹) مشاهده می‌شود در نمودار (T-S) خطوط فشار ثابت و حجم ثابت همگرا است.
- در همه این مراحل، بر اساس روابط موجود در فرآیند آدیاباتیکی ($n=\gamma$) داریم

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma \quad \text{or} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma$$

راندمان سیکل دیزل (η_d) بر اساس گرمای ویژه هوا عبارت است از:

$$\eta_d = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \Rightarrow \eta_d = 1 - \frac{mC_v(T_2 - T_1)}{mC_p(T_3 - T_1)}$$

$$\eta_d = 1 - \frac{C_v(T_2 - T_1)}{C_p(T_3 - T_1)}$$

$$\eta_d = 1 - \frac{(T_2 - T_1)}{\gamma(T_3 - T_1)} \quad (8-9)$$

در مقایسه بین سیکل اتو و دیزل می‌توان گفت که:

- هر دو سیکل در شروع تراکم دارای حالت یکسان می‌باشند. جابه‌جایی و نسبت تراکم یکسان است.

- سیکل اتو دارای بازده بالاتری نسبت به سیکل دیزل می‌باشد (بر اساس شکل) اما عملاً موتورهای دیزل می‌توانند با نسبت تراکم بیشتری کار کنند و هوا را متراکم‌تر نمایند که این حالت در موتور بنزینی کوبش ایجاد می‌کند.

مثال (۸-۶): در سیکل دیزل، نسبت تراکم آیزنتروپیک و نسبت انبساط آیزنتروپیک چه وضعیتی نسبت به هم دارند.

الف) نسبت تراکم کوچک‌تر از نسبت انبساط

ب) با هم برابرند

ج) نسبت تراکم بزرگ‌تر از نسبت انبساط

هـ) هر سه مورد صحیح است

جواب صحیح ج است

در سیکل دیزل نسبت تراکم آیزنتروپیک بیش از نسبت انبساط آیزنتروپیک است

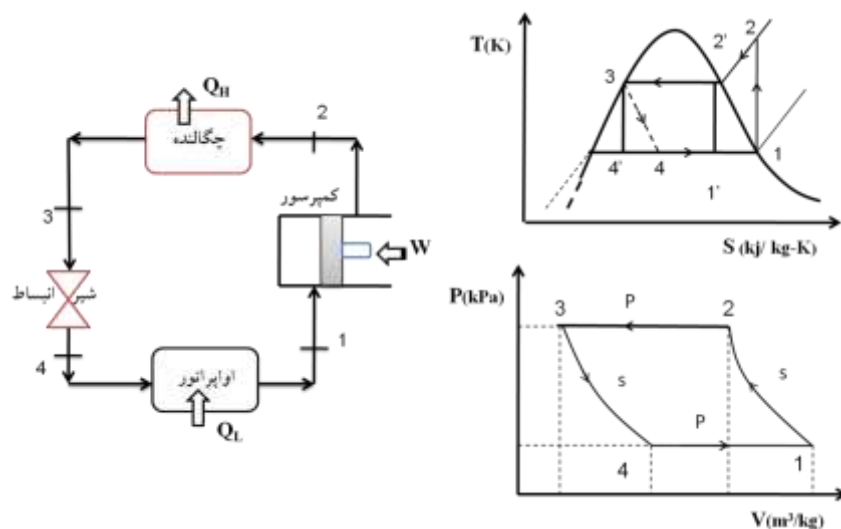
۸-۲ سیکل تبرید تراکمی

در موتورهای گرمایی (سیلندر- پیستونی) سیال عامل می‌تواند در یک سیکل تغییر فاز دهد و یا در تمام سیکل تک فاز باشد. حال سیکل‌های تبریدی عکس سیکل قدرتی رخ می‌دهد. اگر تمام سیکل در داخل محدوده دوفازی رخ دهد سیکل حاصل همان سیکل کارنو است.

در سیکل تبرید تراکمی ماده عامل در طی سیکل تغییر فاز می‌دهد. در شکل (۸-۱۰)، حالت ۱ بخار اشباع در دمای اوپراتور و حالت ۳ مایع اشباع در دمای کندانسور می‌باشد. فرایند ۳-۴ فرایند انبساط تک آنترپی است که در ناحیه دوفازی قرار دارد و غالباً به صورت مایع می‌باشد. در نتیجه کار کمی در این فرایند صورت می‌گیرد. در شیر انبساط فرایند بازگشت ناپذیر رخ می‌دهد.

سیکل تبرید تراکمی بدین گونه است که ابتدا بخار اشباع در فشار کم وارد کمپرسور شده و دچار تراکم می‌شود (فرایند ۱-۲). سپس گرما در فرایند فشار ثابت دفع می‌شود (فرایند ۲-۳). سیال عامل در کندانسور به صورت مایع اشباع در می‌آید و پس از فرایند اختناق آدیاباتیک (فرایند ۳-۴) در فشار ثابت تبخیر و سیکل کامل

می‌شود (فرایند ۴-۱). سیکل فوق شباهت زیادی به سیکل رنکین دارد منتهی در جهت معکوس آن می‌باشد.



شکل ۸-۱۰. سیکل تبرید تراکمی در دو نمودار (P - V) و (T - S)

همان‌طور که از نام سیکل تبرید تراکمی هویداست، حالت تبرید سیستم فوق زمانی است که بخواهیم فضا را در دمای T_1 که کمتر از دمای محیط T_3 است نگه داریم و وظیفه سیستم در این حالت ایجاد q_L می‌باشد و عملکرد آن بر حسب β بیان می‌شود.

$$\beta = \frac{q_L}{w} \quad (۱۰-۸)$$

از حالت تراکمی آن به‌عنوان پمپ گرما هم می‌توان استفاده کرد. در این حالت می‌خواهیم فضا را در دمای T_3 که بالاتر از دمای محیط T_1 نگه داریم. وظیفه سیستم در این حالت ایجاد q_H می‌باشد و ضریب عملکرد آن بر حسب β' رابطه (۸-۱۱) است.

$$\beta' = \frac{q_H}{w} \quad (۱۱-۸)$$

تعداد سیالاتی که برای سیکل تبرید تراکمی بکار می‌روند بیشتر از سیالات

سیکل‌های قدرت می‌باشد. سیالاتی از قبیل آمونیاک و دی اکسید گوگرد که در اوایل ابداع سیکل استفاده می‌شد و به واسطه سمی بودن آن‌ها فعلاً کمتر مورد استفاده است ولی سیالات دیگری که جزء خانواده هیدروکربنهای هالوژنه است از قبیل فرئون و ژناترون استفاده می‌شود. به این گروه از مواد کلروفلوئور کربن یا CFC گویند.

در انتخاب مبرد می‌بایست به دو نکته شامل دمایی که در آن مبرد نیاز است و نوع وسیله‌ایی که از این مبرد استفاده می‌کند، دقت نمود. با تغییر فاز مبرد در فرآیند انتقال گرما، فشار مبرد در جذب و دفع گرما برابر با فشار اشباع است. فشار زیاد به معنی وسیله کوچک‌تر است بطوریکه در برابر فشار مقاوم باشد.

مثال (۷-۸): در یک سیکل تبرید از سیال R-134a استفاده گردید. اگر دمای مبرد در اواپراتور را -2°C و در کندانسور 40°C باشد. مبرد با آهنگ 0.02 kg/s گردش کند. مطلوبست ضریب عملکرد سیستم.
داده مسئله: سیال R-134a از جدول

$$T_1 = -2^{\circ}\text{C} \quad \text{بخار اشباع} \quad h_1 = 386.1 \text{ kJ/kg} \quad P_1 = 133.7$$

$$S_1 = S_2 = 173.9 \text{ kJ/kgK}$$

$$T_2 = 40^{\circ}\text{C} \quad , \quad P_2 = 1017 \text{ kPa}$$

ضریب عملکرد (β) برابر است با:

$$\beta = \frac{q_L}{w}$$

حال مقدار کار داده شده را محاسبه می‌نمائیم.

$$w = h_2 - h_1$$

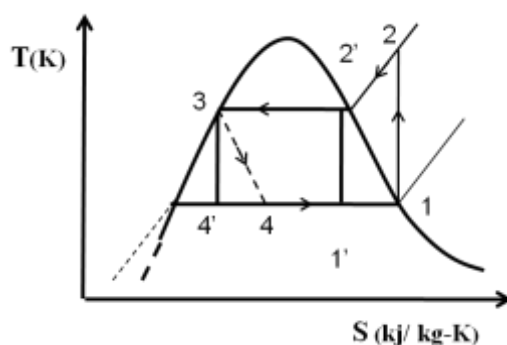
در فشار و آنتروپی مشخص در بعد از کمپرسور، دما برابر است با:

$$P_2 = 1017 \text{ kPa} \quad , \quad S_2 = 173.9 \text{ kJ/kg.K}$$

در فشار فوق و آنتروپی ذکر شده و بر اساس داده‌های جدول، سیال فوق در ناحیه مافوق گرم قرار دارد. بنابراین با استفاده از جدول مافوق گرم R-134a و میان‌یابی مقدار آنتالپی و دما در مرحله دوم (بعد از کمپرسور) محاسبه می‌شود.

$$T_2 = 47.7^\circ\text{C} \quad , \quad h_2 = 428.4 \text{ kJ/kg}$$

$$w = h_2 - h_1 = 428.4 - 386.1 = 42.3 \rightarrow \text{kJ/kg}$$



مقدار حرارت گرفته شده از اواپراتور را نیز محاسبه می‌نمائیم

$$q_L = h_1 - h_4$$

در حالت سوم، دمای بخار اشباع و مایع اشباع برابر است و مایع فقط از بخار به مایع تبدیل شد. در مرحله چهارم (قبل از اواپراتور) شیر انبساط، دما T_3 معلوم و دمای خروجی شیر T_4 نیز معلوم است

$$P_3 = P_4 \quad , \quad h_3 = h_f = 256.5 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 = 256.5 \text{ kJ/kg}$$

$$q_L = h_1 - h_4 = 386.1 - 256.5 = 129.6 \rightarrow \text{kJ/kg}$$

بنابراین در نهایت ضریب عملکرد برابر است با:

$$\beta = \frac{q_L}{w} = \frac{129.6}{42.3} = 3.06$$

فصل نهم

مخلوط‌ها و محلول‌ها در ترمودینامیک

اهداف

در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:

۱. آشنایی با واژه‌های ترمودینامیکی
۲. آشنایی با معیارهای دمایی و معادلات تبدیل
۳. گرما و ویژگی‌های آن در مواد

مقدمه

در ترمودینامیک، ویژه گی مخلوط‌ها و محلول‌ها دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد. در اکثر مسائل و موضوعات ترمودینامیکی مخلوطی از مواد متفاوت مطرح می‌شود که گاهی محلول هم گویند. با توجه به اینکه در اکثر مسائل با مخلوط گازهای ایده‌آل مواجه هستیم، به بررسی مخلوط گازها در فرآیند ترمودینامیکی علی‌الخصوص برای گازهای ایده‌آل که مخلوط ساده‌ای می‌باشد می‌پردازیم.

۹-۱ مخلوط گازهای ایده‌آل

در بررسی اصول اولیه مخلوط‌ها، می‌بایست واکنش‌های شیمیایی حاصل از مخلوط را بررسی کنیم بنابراین قبل از هر گونه بررسی باید با تعاریف مرتبط با مخلوط آشنا بود این پارامترها عبارتند از جزء مولی، جزء جرمی، انرژی داخلی مخلوط، آنتالپی مخلوط،

آنتروپی مخلوط و ظرفیت‌های گرمایی مخلوط می‌باشند.

۹-۱-۱ جزء مولی

مخلوطی از n جزء (i) که هر کدام ماده خالص باشد را در نظر می‌گیریم. جزء مولی (y_i) برای هر جزء مخلوط برابر است با نسبت تعداد جزء مول در مخلوط (n_i) به تعداد کل مول‌های مخلوط (n_t) می‌باشد.

$$y_i = \frac{n_i}{n_t} \quad (۹-۱)$$

اما جرم مولکولی مخلوط (M) برابر است با مجموع

$$\begin{aligned} m &= \sum n_i M_i & \text{and} & & m &= nM \\ nM &= \sum n_i M_i & \Rightarrow & & M &= \sum y_i M_i \end{aligned}$$

n تعداد کل مول‌ها و m جرم کل مخلوط است.

۹-۱-۲ جزء جرمی

هرگاه N جزء از گازها که هر جزء ماده خالص باشد، با هم مخلوط شوند جرم کل (m_t) برابر است با:

$$m_t = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N = \sum m_i$$

جزء جرمی (mf_i) برای جزئی از مخلوط برابر با نسبت جرم جزء در مخلوط (m_i) به جرم کل مخلوط (m_t) تعریف می‌شود و به صورت کسر جرمی در این معادله برابر است با

$$mf_i = \frac{m_i}{m_t} \quad (۹-۲)$$

معادله حالت مخلوط گازهای ایده‌آل بر مبنای جرمی عبارت است از

$$PV = mR_{\text{mix}}T$$

۳-۱-۹ انرژی داخلی مخلوط

مجموع انرژی‌های داخلی اجزاء تشکیل دهنده یک مخلوط (U_i) را انرژی داخلی آن مخلوط (U) گویند.

$$U = \sum U_i \quad \Rightarrow \quad U = \sum m_i u_i \Rightarrow \quad U = \sum n_i \bar{u}_i$$

$$u = \sum mf_i u_i \quad (3-9)$$

(u) انرژی داخلی مخصوص مخلوط

(u_i) انرژی داخلی مخصوص هر جزء

(mf_i) جزء جرمی برای جزئی از مخلوط

($\bar{u}_i$) انرژی داخلی مولی هر جزء

۴-۱-۹ آنتالپی مخلوط

همانند تعریف انرژی داخلی بیان می‌شود. آنتروپی مخصوص مخلوط برابر با مجموع جزء جرمی مخلوط (mf_i) در آنتروپی مخصوص هر جزء (s_i) می‌باشد.

$$h = \sum mf_i h_i$$

۵-۱-۹ آنتروپی مخلوط

همانند تعریف آنتالپی برابر است با مجموع جزء جرمی مخلوط (mf_i) در آنتالپی مخصوص هر جزء (h_i) می‌باشد.

$$s = \sum mf_i s_i$$

آنتروپی مخلوط گازهای ایده‌آل برابر است با:

$$S = ms = m_A s_A + m_B s_B \quad (4-9)$$

آنتروپی مخلوط را می‌توان به صورت مجموع خواص اجزاء بر مبنای مولی نیز بیان کرد.

۹-۱-۶ ظرفیت‌های گرمایی مخلوط

براساس رابطه به‌دست آمده در بخش انرژی داخلی مخلوط، ظرفیت گرمایی برابر است با:

$$\begin{aligned}\Delta U &= \sum \Delta U_i &\Rightarrow & n \bar{c}_v \Delta T = \sum n_i \bar{c}_{vi} \Delta T \\ \bar{c}_v &= \sum y_i \bar{c}_{vi} &\Rightarrow & c_v = \sum m f_i c_{vi} \\ c_p &= \sum m f_i c_{pi}\end{aligned}$$

(c_v) ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت

(c_{vi}) ظرفیت گرمایی ویژه هر جزء در حجم ثابت

(c_p) ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت

(c_{pi}) ظرفیت گرمایی ویژه هر جزء در فشار ثابت

($\hat{c}_v$) ظرفیت گرمایی مولی مخلوط در حجم ثابت

($\hat{c}_p$) ظرفیت گرمایی مولی مخلوط در فشار ثابت

همان‌طور که قبلاً بیان شد ضریب اتمیسیته (γ) برابر است با نسبت ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت به ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت می‌باشد لیکن در مخلوط، ضریب اتمیسیته مخلوط برابر است با نسبت ظرفیت‌های گرمایی مخلوط در فشار ثابت و حجم ثابت بر یکدیگر محاسبه می‌شود.

مثال (۹-۱): مخلوطی از ۰/۲ kg نیتروژن و ۰/۳ kg آرگون داریم. مطلوب است محاسبه نسبت جرمی نیتروژن و آرگون.

$$\begin{aligned}m &= m_1 + m_2 &\Rightarrow & = 0.2 + 0.3 = 0.5 \rightarrow \text{kg} \\ (mf)_N &= \frac{m_1}{m} &\Rightarrow & = \frac{0.2}{0.5} = 0.4\end{aligned}$$

$$(mf)_{Ar} = \frac{m_2}{m} \Rightarrow \frac{0.3}{0.5} = 0.6$$

مثال (۹-۲): مخلوطی از ۰/۲ kg گاز A با ظرفیت گرمایی ویژه ۱/۰۴ و ۰/۳ kg گاز B با ظرفیت گرمایی ویژه ۰/۵۲ در فشار ثابت داریم. مطلوب است محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط در فشار ثابت.

$$c_p = \sum mf_i c_{pi}$$

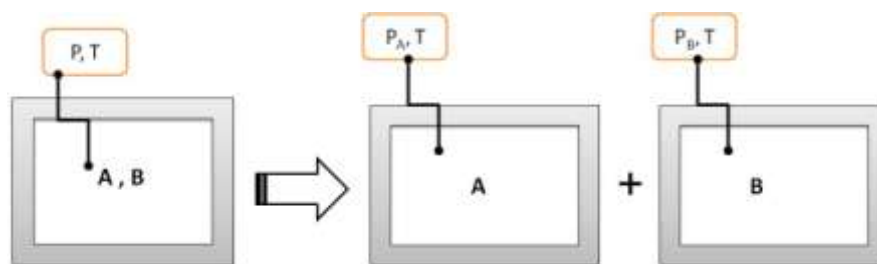
$$c_p = \frac{1}{0.5} (0.2 \times 1.04) + (0.3 \times 0.52) = 0.72 \rightarrow \text{kJ / kg.K}$$

۹-۲ مدل‌های اختلاط

معمولاً الگوهای متفاوتی در زمینه مخلوط گازها و اختلاط آن‌ها به کار می‌رود که متداولترین آن‌ها مدل دالتون و مدل آماگات می‌باشد.

۹-۲-۱ قانون دالتون

غالباً رفتار مخلوطی از گازهایی که با هم ترکیب نمی‌شوند، مورد نظر است. فشار جزئی هر یک از اجزای چنین مخلوط گازی، عبارت از فشاری است که آن جزء از گاز اعمال می‌کرد، اگر تنها گاز موجود در حجم مورد نظر می‌بود. در مدل دالتون، خواص هر جزء مخلوط مانند خواص آن در حالتی در نظر گرفته می‌شود که آن جزء به طور جداگانه و مستقل در دما و حجم مخلوط قرار داشته باشد.



شکل ۹-۱. مدل دالتون و فشارهای جزئی

بنابراین فشارهای جزئی نیز مطرح می‌باشد و با P_A و P_B نشان داده‌ایم.

$$n = n_A + n_B$$

$$\frac{PV}{RT} = \frac{P_A V}{RT} + \frac{P_B V}{RT}$$

در نتیجه

$$P = P_A + P_B \quad \text{یا} \quad P = \sum p_i$$

با در نظر گرفتن روابط گاز ایده‌آل برای مخلوط گازی، می‌توان نوشت:

$$PV = n\bar{R}T$$

همچنین برای هر جزء

$$P_i V = n_i \bar{R}T$$

در نتیجه برای نسبت این دو فرمول می‌توان نوشت

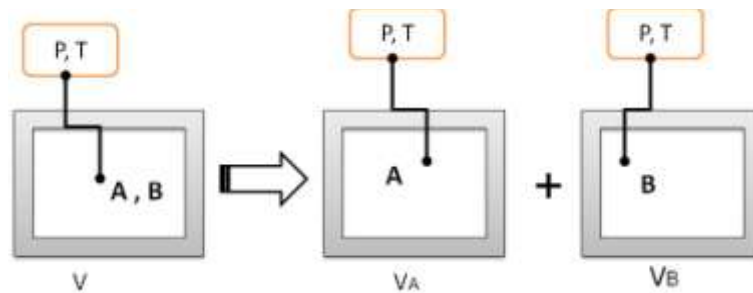
$$\frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n} \quad (۵-۹)$$

$$P_i = y_i P$$

این بدان معنی است که فشار جزئی هر جزء برابر با کسر مولی آن جزء (y_i) ضرب در فشار مخلوط (P) می‌باشد. در مدل اختلاط دالتون هر جزء به‌عنوان جزئی می‌جاء در حجم مخلوط در نظر گرفته می‌شود.

۹-۲-۲ قانون آماگات

در مدل آماگات، خواص هر جزء از مخلوط را در دما و فشار مخلوط مورد بررسی قرار می‌دهیم. بنابراین در این مدل حجم‌های جزئی مطرح می‌باشد (شکل ۹-۲).



شکل ۹-۲. مدل آمگات و حجم‌های جزئی

در این مدل حجم‌های جزئی نیز مطرح می‌باشد و با V_A و V_B نشان داده ایم.

$$n = n_A + n_B$$

$$\frac{PV}{RT} = \frac{PV_A}{RT} + \frac{PV_B}{RT}$$

در نتیجه مشابه فشارهای جزئی می‌توان نوشت

$$V = \sum V_i \quad \text{یا} \quad V = V_A + V_B$$

$$V_i = y_i \times V$$

همواره نسبت حجم هر جزء به حجم مخلوط (V_i/V) را نسبت حجمی (r) گویند.

بنابر این در یک مخلوط گازی مجموع حاصل ضرب نسبت حجمی هر جزء در جرم مولکولی هر جزء ($\sum r_i M_i$) بیانگر جرم مولکولی آن می‌باشد.

$$M = \sum \frac{n_i}{n} M_i = \sum y_i M_i = \sum \frac{V_i}{V} M_i = \sum r_i M_i$$

۹-۳ قانون اول برای مخلوط گاز و بخار

این بخش را با ساده‌ترین مثالی که بیانگر ارائه مدل مخلوطی از گاز ایده‌آل در تماس

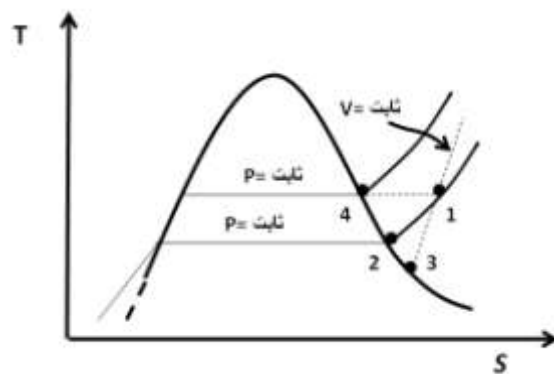
با یکی از فازهای دیگرش باشد شروع می‌کنیم. ابتدا مخلوط هوا و بخار آب را در نظر می‌گیریم. این مخلوط با فاز دیگر آب یعنی مایع یا یخ در تماس است. دو فرض را برای شرایط فوق می‌توان لحاظ نمود.

الف) فاز جامد یا مایع حاوی گازهای نامحلول نیست

ب) فاز گازی را می‌توان به صورت مخلوطی از گازهای ایده‌آل بررسی نمود.

ج) وقتی مخلوط و فاز چگالیده در فشار و دمای معینی هستند، تعادل بین فاز چگالیده و بخار آن تحت تاثیر وجود جزء دیگر قرار نمی‌گیرد. یعنی در هنگام تعادل، فشار جزئی بخار با فشار اشباع دمای مخلوط برابر است.

از جمله موارد مهم در این بخش می‌توان به نقطه شبنم اشاره نمود. نقطه شبنم مخلوط گاز- بخار، دمایی است که در آن بخار هنگام سرمایش در فشار ثابت چگالیده یا منجمد می‌شود و در نمودار (۳-۹) نشان داده شده است.



شکل ۳-۹. مشخصه نقطه شبنم در نمودار آنتروپی-دما

در حالت ۱ بخار مافوق گرم است. حال اگر مخلوط در این فشار ثابت سرد شود به نقطه ۲ خواهد رسید. با کاهش دما در فشار ثابت، چگالش آغاز خواهد شد و حالت ۲ دارای دمایی است که به آن درجه حرارت نقطه شبنم گویند. کاهش دما در مسیر ۱ به ۳ همان مسیر حجم ثابت است که در نقطه ۳ چگالش آغاز می‌شود. مخلوطی از هوا و بخار آب در نقطه ۴ باشد دارای درجه حرارت و فشار اشباع است که به آن هوای اشباع نیز گویند.

منابع

۱. شعبانی بهمن ترمودینامیک، انتشارات آهنگ تهران، (۱۳۸۴).
۲. خسرو ضیایی، ترمودینامیک، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۷۰).
۳. رضوی محمد رضا، هروی حمید، ترمودینامیک مهندسی، انتشارات آستان قدس، (۱۳۸۰).
۴. مقالات اینترنتی مرتبط با موضوعات مختلف.
5. A. Bejan, Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow, Wiley Interscience, New York, 1982.
6. J.E. Ahern, The Energy Method of Energy systems, Wiley, New York, 1980.
7. M.J. Moran and H.N. Shapiro, Fundamental of Engineering Thermodynamics, Wiley, New York, 1988.
8. G.N. Van Wylen and R.E. Sonntag, Fundamental of Classical Thermodynamics, 3rd Edit, Wiley, New York, 1985.
9. K. Wark, Thermodynamics, 5th Edit, McGraw-Hill, New York. 1988.
10. W.J. Yang, Biothermal- Fluid Sciences, Hemisphere, New York, 1979.

جداول ترمودینامیکی

سری الف) تبدیل واحدها و خواص برخی گازها

سری ب) خواص ترمودینامیکی (حجم مخصوص، انرژی داخلی، آنتالپی، و آنتروپی)

سری ج) نمودارهای حالت

سری الف) (تبدیل واحدها و خواص برخی گازها)

جدول الف-۱. تبدیل واحدها (خواص حالت یگانه: واحدهای SI)

Area (A) $1 \text{ mm}^2 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ $1 \text{ cm}^2 = 10. \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.1550 \text{ in}^2$ $1 \text{ m}^2 = 10.7639 \text{ ft}^2$		$1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in}^2$ $1 \text{ in}^2 = 64516 \text{ cm}^2 = 64516 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ $1 \text{ ft}^2 = 0.092903 \text{ m}^2$
Conductivity (k) $1 \text{ W.m.K} = 1 \text{ J/s.m.K}$ $= 0.577789 \text{ But/h.ft.}^{\circ}\text{R}$		$1 \text{ But/h.ft.}^{\circ}\text{R} = 1.730735 \text{ W.m.K}$
Density (ρ) $1 \text{ kg/m}^3 = 0.06242797 \text{ lb.m/ft}^3$ $1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$ $1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/L}$		$1 \text{ lb.m/ft}^3 = 16.01846 \text{ kg/m}^3$
Energy (E, U) $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ kg. m}^2/\text{s}^2$ $1 \text{ J} = 0.737562 \text{ lbf.ft}$ $1 \text{ cal (Int.)} = 4.1868 \text{ J}$ $1 \text{ eV} = 1.6021733 \times 10^{-19} \text{ J}$		$1 \text{ lbf.ft} = 1.355818 \text{ J}$ $1 \text{ Btu (Int.)} = 1.055056 \text{ kJ}$ $= 778.1693 \text{ lbf.ft}$
Force (F) $1 \text{ N} = 0.224809 \text{ lbf}$ $1 \text{ kp} = 9.80664 \text{ N (1kgf)}$		$1 \text{ lbf} = 4.448222 \text{ N}$
Gravitation $G = 9.80665 \text{ m/s}^2$		$G = 32.17405 \text{ ft/s}^2$
Heat capacity (c_p, c_v, C), specific entropy (s) $1 \text{ kJ/kg.k} = 0.238846 \text{ Btu/lb.m.}^{\circ}\text{R}$		$1 \text{ Btu/lb.m.}^{\circ}\text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kg.k}$
Heat flux (per unit area) $1 \text{ w/m}^2 = 0.316998 \text{ Btu/h.ft}^2$		$1 \text{ Btu/h.ft}^2 = 3.15459 \text{ w/m}^2$
Heat-transfer coefficient (h) $1 \text{ W/m}^2.\text{K} = 0.17611 \text{ Btu/h.ft}^2.^{\circ}\text{R}$		$1 \text{ Btu/h.ft}^2.^{\circ}\text{R} = 5.67826 \text{ w/m}^2.\text{K}$
Length (L) $1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m} = 0.1 \text{ cm}$ $1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m} = 10 \text{ mm} = 0.3937 \text{ in}$ $1 \text{ m} = 3.28084 \text{ ft} = 39.370 \text{ in}$ $1 \text{ km} = 0.621371 \text{ mi}$ $1 \text{ mi} = 1609.3 \text{ m (US statute)}$		$1 \text{ ft} = 12 \text{ in}$ $1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm} = 0.0254 \text{ m}$ $1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$ $1 \text{ mi} = 1.609344 \text{ km}$ $1 \text{ yd} = 0.9144 \text{ m}$
Mass (m) $1 \text{ kg} = 2.204623 \text{ lbm}$ $1 \text{ tonne} = 1000 \text{ kg}$ $1 \text{ grain} = 6.47989 \times 10^{-5} \text{ kg}$		$1 \text{ lbm} = 0.453592 \text{ kg}$ $1 \text{ slug} = 14.5939 \text{ kg}$ $1 \text{ ton} = 2000 \text{ lbm}$

جدول الف-١. تبديل واحدها (ادامه)

Moment (torque, T)	
1 N.m = 0.737526 lbf.ft	1 lbf.ft = 1.355818 N.m
Momentum (mV)	
1 kg.m/s = 7.23294 lbf.ft/s = 0.224809 lbf.s	1 lbf.ft/s = 0.138256 kg.m/s
Power (Q, W)	
1 w = 1 J/s = 1 N.m/s = 0.737562 lbf.ft/s	1 lbf.ft/s = 1.355818 W = 4.62624 btu/h
1 kW = 3412.14 Btu/h	1 Btu/s = 1.055056 kW
1 hp (metric) = 0.735499 kW	1 hp (UK) = 0.7457 kw = 550 lbf.ft/s = 2544.43 Btu/h
1 ton of Refrigeration = 3.51685 kW	1 ton of Refrigeration = 12000 btu/h
Pressure (P)	
1 Pa = 1 N/m ² = 1 kg/m.s ²	1 lbf/in ² = 6.894757 kPa
1 bar = 1.0 × 10 ⁵ pa = 100 kPa	1 atm = 14.9549 lbf/in ² = 29.921 in.Hg [32°F] = 33.8995 ft H ₂ O [4°C]
1 atm = 101.325 kPa = 1.01325 bar = 760 mm Hg [0°C] = 10.33256 m H ₂ O [4°C]	
1 torr = 1 mm Hg [0°C] 1 mm Hg [0°C] = 0.133322 kPa 1 m H ₂ O [4°C] = 9.80638 kPa	1 in.Hg [0°C] = 0.49115 lbf/in ² 1 in H ₂ O [4°C] = 0.036126 lbf/in ²
Specific energy (e, u)	
1 kJ/kg = 0.42992 btu/lbm = 334.55 lbf.ft/lbm	1 Btu/lbm = 2.326 kJ/kg 1 lbf.ft/lbm = 2.98907 × 10 ⁻³ kJ/kg = 1.28507 × 10 ⁻³ btu/lbm
Specific kinetic energy (1/2 V²)	
1 m ² /s ² = 0.001 kJ/kg	1 ft ² /s ² = 3.9941 × 10 ⁻³ Btu/lbm
1 kJ/kg = 1000 m ² /s ²	1 Btu/lbm = 25037 ft ² /s ²
Specific potential energy (Zg)	
1 mg _{std} = 9.80665 × 10 ⁻³ kJ/kg = 4.21607 × 10 ⁻³ btu/lbm	1 ft.g _{std} = 1.0 lbf.ft/lbm = 0.002989 kJ/kg
Specific volume (v)	
1 cm ³ /g = 0.001 m ³ /kg 1 cm ³ /g = 1 L/kg 1 m ³ /kg = 16.01846 ft ³ /lbm	1 ft ³ /lbm = 0.062428 m ³ /kg
Temperature (T)	
1 K = 1°C = 1.8 R = 1.8 F TC = TK - 273.15 = (TF - 32)/1.8 TK = TR/1.8	1 R = (5/9) K TF = TR - 459.67 = 1.8 TC + 32 TR = 1.8 TK
Universal Gas Constant	
R = N ₀ K = 8.31451 kJ/Kmol.K = 1.98559 kcal/ kmol.K = 82.0578 atm.L/kmol.K	R = 1.98589 Btu/lbmol.R = 1545.36 lbf.ft/lbmol.R = 0.73024 at.ft ³ /lbmol.R
Velocity (V)	
1 m/s = 3.6 km/h = 3.28084 ft/s 1 km/h = 0.27778 m/s = 0.91134 ft/s	1 ft/s = 0.3048 m/s = 1.09728 km/h 1 mi/h = 1.46667 ft/s = 0.44704 m/s
Volume (V)	
1 m ³ = 35.3147 ft ³ 1 L = 1 dm ³ = 0.001 m ³ = 3.785412 × 10 ⁻³ m ³	1 ft ³ = 2.831685 × 10 ⁻² m ³ 1 in ³ = 1.6387 × 10 ⁻⁵ m ³ 1 Gal (US) = 231.00 in ³

جدول الف-۲. ثابت بحرانی

ماده	فرمول	جرم مولکولی	دما (K)	فشار (MPa)	حجم (m ³ /kg)
امونیاک	NH ₃	17.031	405.5	11.35	0.00426
ارگون	Ar	39.948	150.8	4.87	0.00188
برومین	Br ₂	159.808	588	10.30	0.000796
دی اکسید کربن	CO ₂	44.01	304.1	7.38	0.00212
مونوکسید کربن	CO	28.01	132.9	3.50	0.00333
کلر	Cl ₂	70.906	416.9	7.98	0.00175
فلوئور	F ₂	37.997	144.3	5.22	0.00174
هلیوم	He	4.003	5.19	0.227	0.0143
هیدروژن	H ₂	2.016	33.2	1.30	0.0323
کریپتون	Kr	83.80	209.4	5.50	0.00109
نئون	Ne	20.183	44.4	2.76	0.00206
اکسید نیتروژن	NO	30.006	180	6.48	0.00192
نیتروژن	N ₂	28.013	126.2	3.39	0.0032
دی اکسید نیتروژن	NO ₂	46.006	431	10.1	0.00365
اکسید دی نیتروژن	N ₂ O	44.013	309.6	7.24	0.00221
اکسیژن	O ₂	31.999	154.6	5.04	0.00229
دی اکسید سولفور	SO ₂	64.063	430.8	7.88	0.00191
آب	H ₂ O	18.015	647.3	22.12	0.00317
زنون	Xe	131.30	289.7	5.84	0.000902
استیلن	C ₂ H ₂	26.038	308.3	6.14	0.00433
بنزن	C ₆ H ₆	78.114	562.2	4.89	0.00332
ان-بوتان	C ₄ H ₁₀	58.124	425.2	3.80	0.00439
کلرو دی فلورو اتان (۱۴۲ب)	CH ₃ CClF ₂	100.495	410.3	4.25	0.00230
کلرو دی فلورو اتان (۲۲)	CHClF ₂	86.469	369.3	4.97	0.00191
دی کلرو فلورو اتان (۱۴۱)	CH ₃ CCl ₂ F	116.95	481.5	4.54	0.00215
دی کلروتری فلورو اتان (۲۳)	CHCl ₂ CF ₃	152.93	456.9	3.66	0.00182
دی فلورو اتان (۱۱۵۲)	CHF ₂ CH ₃	66.05	386.4	4.52	0.00272
دی فلورو متان (۳۲)	CF ₂ H ₂	52.024	351.3	5.78	0.00236
اتان	C ₂ H ₆	30.070	305.4	4.88	0.00493
اتیل الکل	C ₂ H ₅ OH	46.069	513.9	6.14	0.00363
اتیلن	C ₂ H ₄	28.054	282.4	5.04	0.00465
ان-هپتان	C ₇ H ₁₆	100.205	540.3	2.74	0.00431
ان-هگزان	C ₆ H ₁₄	86.178	507.5	3.01	0.00429
متان	CH ₄	16.043	190.4	4.60	0.00615
متیل الکل	CH ₃ OH	32.042	512.6	8.09	0.00368
ان-اکتان	C ₈ H ₁₈	114.232	568.8	2.49	0.00431
پنتا فلورو اتان (۱۲۵)	CHF ₂ CF ₃	120.022	339.2	3.62	0.00176
ان-پنتان	C ₅ H ₁₂	72.151	469.7	3.37	0.00421
پروپان	C ₃ H ₈	44.094	369.8	4.25	0.00454
پروپن	C ₃ H ₆	42.081	364.9	4.60	0.00430
تترافلورو اتان (۱۳۴)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	374.2	4.06	0.00197

جدول الف - ۳. خواص برخی از جامداتی انتخابی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

ماده		چگالی (kg/m ³)	گرمای ویژه (kJ/kg.K)
اسفالت	Asphalt	2120	0.92
اجر	Brick, common	1800	0.84
کربن، الماس	Carbon, diamond	3250	0.51
کربن، گرافیت	Carbon, graphite	2000-2500	0.61
ذغال سنگ	Coal	1200-1500	1.26
بتون	Concrete	2200	0.88
شیشه صفحه‌ای	Glass, plate	2500	0.80
شیشه پشم	Glass, wool	200	0.66
گرانیت	Granite	2750	0.89
یخ	Ice (0°C)	917	2.04
کاغذ	Paper	700	1.2
پلکسی گلس	Plexiglass	1180	1.44
پلی استایرن	Polystyrene	920	2.3
پلی ونیل کلراید	Polyvinyl chloride	1380	0.96
لاستیک نرم	Rubber, soft	1100	1.67
شن خشک	Sand, dry	1500	0.8
سنگ نمک	Salt, rock	2100-2500	0.92
سیلیکن	Silicone	2330	0.70
لایه برف	Snow, firm	560	2.1
چوب سخت بلوط	Wood, hard (oak)	720	1.26
چوب نرم کاج	Wood, soft (pine)	510	1.38
پشم	Wool	100	1.72
فلز	Metals		
الومنیوم	Aluminum	2700	0.90
برنج	Brass, 60-40	8400	0.38
مس تجاری	Copper, commercial	8300	0.42
طلا	Gold	19300	0.13
اهن	Iron, cast	7272	0.42
فولاد اهن	Iron, 304 St steel	7820	0.46
سرب	Lead	11340	0.13
منیزیم	Magnesium, 2% Mn	1778	1.00
نیکل	Nickel, 10% Cr	8666	0.44
نقره	Silver, 99.9% Ag	10524	0.24
سدیم	Sodium	971	1.21
قلع	Tin	7304	0.22
تنگستن	Tungsten	19300	0.13
روی	Zinc	7144	0.39

جدول الف-۴. خواص برخی مایعات انتخابی در ۲۵ °C

ماده		چگالی ($p \text{ (kg/m}^3\text{)}$)	گرمای ویژه $C_p \text{ (kJ/kg-K)}$
آلمینیوم	Ammonia	604	4.84
بنزن	Benzene	879	1.72
بوتان	Butane	556	2.47
سی سی ال ۴	CCl_4	1584	0.83
دی اکسید کربن	CO_2	680	2.9
اتانول	Ethanol	783	2.46
گازوئیل	Gasoline	750	2.08
گلیسرین	Glycerin	1260	2.42
نفت سفید	Kerosene	815	2.0
متانول	Methanol	787	2.55
ان-اکتان	n-octane	692	2.23
روغن موتور	Oil engine	885	1.9
نفت سبک	Oil light	910	1.8
پروپان	Propane	510	2.54
R-12	R-12	1310	0.97
R-22	R-22	1190	1.26
R-32	R-32	961	1.94
R-125	R-125	1191	1.41
R-134a	R-134a	1206	1.43
آب	Water	997	4.18
فلزات مایع Liquid metals			
بیسموث	Bismuth, Bi	10040	0.14
سرب	Lead, Pb	10660	0.16
جیوه	Mercury, Hg	13580	0.14
نک	NaK (56/44)	887	1.13
پتاسیم	Potassium, K	828	0.81
سدیم	Sodium, Na	929	1.38
قلع	Tin, Sn	6950	0.24
روی	Zinc, Zn	6570	0.50

جدول الف- ۵. خواص برخی گازهای ایده‌آل در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال

گاز	فرمول	جرم مولکولی	R (kJ/kg.K)	p (kg/m ³)	C _{p0} (kJ/kg.K)	C _{v0} (kJ/kg.K)	K =C _p /C _v
بخار	H ₂ O	18.015	0.4615	0.0231	1.872	1.410	1.327
استیلن	C ₂ H ₂	26.038	0.3193	1.05	1.699	1.380	1.231
هوا	-	28.97	0.287	1.169	1.004	0.717	1.400
امونیاک	NH ₃	17.031	0.4882	0.694	2.130	1.642	1.297
ارگون	Ar	39.948	0.2081	1.613	0.520	0.312	1.667
بوتان	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	2.407	1.716	1.573	1.091
دی‌اکسید کربن	CO ₂	44.01	0.1889	1.775	0.842	0.653	1.289
مونوکسید کربن	CO	28.01	0.2968	1.13	1.041	0.744	1.399
اتان	C ₂ H ₆	30.07	0.2765	1.222	1.766	1.490	1.186
اتانول	C ₂ H ₅ OH	46.069	0.1805	1.883	1.427	1.246	1.145
اتیلن	C ₂ H ₄	29.054	0.2964	1.138	1.548	1.252	1.237
هلیوم	He	4.003	2.0771	0.1615	5.193	3.116	1.667
هیدروژن	H ₂	2.016	4.1243	0.0813	14.209	10.085	1.409
متان	CH ₄	16.043	0.5183	0.648	2.254	1.736	1.299
متانول	CH ₃ OH	32.042	0.2595	1.31	1.405	1.146	1.227
نئون	Ne	20.183	0.4120	0.814	1.03	0.618	1.667
اکسید نیتروژن	NO	30.006	0.2771	1.21	0.993	0.716	1.387
نیتروژن	N ₂	28.013	0.2968	1.13	1.042	0.745	1.400
اکسید دی نیتروژن	N ₂ O	44.013	0.1889	1.775	0.879	0.690	1.274
ان-اکتان	C ₈ H ₁₈	114.23	0.07279	0.092	1.711	1.638	1.044
اکسیژن	O ₂	31.999	0.2598	1.292	0.922	0.662	1.393
پروپان	C ₃ H ₈	44.094	0.1886	1.808	1.679	1.490	1.126
R-12	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	4.98	0.616	0.547	1.126
R-22	CHClF ₂	86.469	0.09616	3.54	0.658	0.562	1.171
R-32	CF ₂ H ₂	52.024	0.1598	2.125	0.822	0.662	1.242
R-125	CHF ₂ CF ₃	120.02	0.06927	4.918	0.791	0.721	1.097
R-134a	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	4.20	0.852	0.771	1.106
دی‌اکسید گوگرد	SO ₂	64.059	0.1298	2.618	0.624	0.494	1.263
تری‌اکسید گوگرد	SO ₃	80.053	0.10386	3.272	0.635	0.531	1.196

جدول الف - ۶. گرمای ویژه در فشار ثابت برای انواع گازهای ایده‌آل

$C_{p0}=C_0+C_1\theta+C_2\theta^2+C_3\theta^3$		(kJ/kg-K)		$\theta = T/1000$		
گاز	فرمول	C_0	C_1	C_2	C_3	
بخار	Steam	H ₂ O	1.79	0.107	0.586	
استیلن	Acetylene	C ₂ H ₂	1.03	2.91	-1.92	-0.2
هوا	Air	-	1.05	-0.365	0.85	0.54
امونیاک	Ammonia	NH ₃	1.60	1.4	1.0	-0.39
ارگون	Argon	Ar	0.52	0	0	0
بوتان	Butane	C ₄ H ₁₀	0.163	5.70	-1.906	-0.7
دی اکسید کربن	Carbon dioxide	CO ₂	0.45	1.67	-1.27	0
مونوکسید کربن	Carbon monoxide	CO	1.10	-0.46	1.0	-0.049
اتان	Ethane	C ₂ H ₆	0.18	5.92	-2.31	0.29
اتانول	Ethanol	C ₂ H ₅ OH	0.2	-4.65	-1.82	0.03
اتیلن	Ethylene	C ₂ H ₄	1.36	5.58	-3.0	0.63
هلیوم	Helium	He	5.193	0	0	0
هیدروژن	Hydrogen	H ₂	13.46	4.6	-6.85	3.79
متان	Methane	CH ₄	1.2	3.25	0.75	-0.71
متانول	Methanol	CH ₃ OH	0.66	2.21	0.81	-0.89
نئون	Neon	Ne	1.03	0	0	0
اکسید نیتروژن	Nitric oxide	NO	0.98	-0.031	0.325	-0.14
نیتروژن	Nitrogen	N ₂	1.11	-0.48	0.96	-0.42
اکسید دی نیتروژن	Nitrous oxide	N ₂ O	0.49	1.65	-1.31	0.42
ان-اکتان	n-octane	C ₈ H ₁₈	-0.053	6.75	-3.67	0.775
اکسیژن	Oxygen	O ₂	0.88	0.0001	0.54	-0.33
پروپان	Propane	C ₃ H ₈	-0.096	6.95	-3.6	0.73
R-12	R-12	CCl ₂ F ₂	0.26	1.47	-1.25	0.36
R-22	R-22	CHClF ₂	0.2	1.87	-1.35	0.35
R-32	R-32	CF ₂ H ₂	0.227	2.27	-0.93	0.041
R-125	R-125	CHF ₂ CF ₃	0.305	1.68	-0.284	0
R-134a	R-134a	CF ₃ CH ₂ F	0.165	2.81	-2.23	1.11
دی اکسید گوگرد	Sulfur dioxide	SO ₂	0.37	1.05	-0.77	0.21
تری اکسید گوگرد	Sulfur trioxide	SO ₃	0.24	1.7	-1.5	0.46

جداول سری ب (خواص ترمودینامیکی آب)

جدول ب-۱. آب اشباع

		حجم مخصوص، m^3/kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
$(^\circ\text{C})$	(kPa)	v_f	v_{fg}	v_g	u_f	u_{fg}	u_g
0.01	0.6113	0.001000	206.131	206.132	0	2375.33	2375.33
5	0.8721	0.001000	147.117	147.118	20.97	2361.27	2382.24
10	1.2276	0.001000	106.376	106.377	41.99	2347.16	2389.15
15	1.705	0.001001	77.924	77.925	62.98	2333.06	2396.04
20	2.339	0.001002	57.7887	57.7897	83.94	2318.98	2402.91
25	3.169	0.001003	43.3583	43.3593	104.86	2304.90	2409.76
30	4.246	0.001004	32.8922	32.8932	125.77	2290.81	2416.58
35	5.628	0.001006	25.2148	25.2158	146.65	2276.71	2423.36
40	7.384	0.001008	19.5219	19.5229	167.53	2262.57	2430.11
45	9.593	0.001010	15.2571	15.2581	188.41	2248.40	2436.81
50	12.350	0.001012	12.0308	12.0318	209.30	2234.17	2443.47
55	15.758	0.001015	9.56734	9.56835	230.19	2219.89	2450.08
60	19.941	0.001017	7.66969	7.67071	251.09	2205.54	2456.63
65	25.03	0.001020	6.19554	6.19656	272.00	2191.12	2463.12
70	31.19	0.001023	5.04114	5.04217	292.93	2176.62	2469.55
75	38.58	0.001026	4.13021	4.13123	313.87	2162.03	2475.91
80	47.39	0.001029	3.40612	3.40715	334.84	2147.36	2482.19
85	57.83	0.001032	2.82654	2.82757	355.82	2132.58	2488.40
90	70.14	0.001036	2.35953	2.36056	376.82	2117.70	2494.52
95	84.55	0.001040	1.98082	1.98186	397.86	2102.70	2500.56
100	101.3	0.001044	1.67185	1.67290	418.91	2087.58	2506.50
105	120.8	0.001047	1.41831	1.41936	440.00	2072.34	2512.34
110	143.3	0.001052	1.20909	1.21014	461.12	2056.96	2518.09
115	169.1	0.001056	1.03552	1.03658	482.28	2041.44	2523.72
120	198.5	0.001060	0.89080	0.89186	503.48	2025.76	2529.24
125	232.1	0.001065	0.76953	0.77059	524.72	2009.91	2534.63
130	270.1	0.001070	0.66744	0.66850	546.00	1993.90	2539.90
135	313.0	0.001075	0.58110	0.58217	567.34	1977.69	2545.03
140	361.3	0.001080	0.50777	0.50885	588.72	1961.30	2550.02
145	415.4	0.001085	0.44524	0.44632	610.16	1944.69	2554.86
150	475.9	0.001090	0.39169	0.39278	631.66	1927.87	2559.54
155	543.1	0.001096	0.34566	0.34676	653.23	1910.82	2564.04
160	617.8	0.001102	0.30596	0.30706	674.85	1893.52	2568.37
165	700.5	0.001108	0.27158	0.27269	696.55	1875.97	2572.51
170	791.7	0.001114	0.24171	0.24283	718.31	1858.14	2576.46
175	892.0	0.001121	0.21568	0.21680	740.16	1840.03	2580.19
180	1002.2	0.001127	0.19292	0.19405	762.08	1821.62	2583.70
185	1122.7	0.001134	0.17295	0.17409	784.08	1802.90	2586.98
190	1254.4	0.001141	0.15539	0.15654	806.17	1783.84	2590.01

جدول ب-۱. آب اشباع (ادامه)

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، kJ/kg-K		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(°C)	(kPa)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0.01	0.6113	0.00	2501.35	2501.35	0	9.1562	9.1562
5	0.8721	20.98	2489.57	2510.54	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	41.99	2477.75	2519.74	0.1510	8.7498	8.9007
15	1.705	62.98	2465.93	2528.91	0.2245	8.5569	8.7813
20	2.339	83.94	2454.12	2538.06	0.2966	8.3706	8.6671
25	3.169	104.87	2442.30	2547.17	0.3673	8.1905	8.5579
30	4.246	125.77	2430.48	2556.25	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	146.66	2418.62	2565.28	0.5052	7.8478	8.3530
40	7.384	167.54	2406.72	2574.26	0.5724	7.6845	8.2569
45	9.593	188.42	2394.77	2583.19	0.6386	7.5261	8.1647
50	12.350	209.31	2382.75	2592.06	0.7037	7.3725	8.0762
55	15.758	230.20	2370.66	2600.86	0.7679	7.2234	7.9912
60	19.941	251.11	2358.48	2609.59	0.8311	7.0784	7.9095
65	25.03	272.03	2346.21	2618.24	0.8934	6.9375	7.8309
70	31.19	292.96	2333.85	2626.80	0.9548	6.8004	7.7552
75	38.58	313.91	2321.37	2635.28	1.0154	6.6670	7.6824
80	47.39	334.88	2308.77	2643.66	1.0752	6.5369	7.6121
85	57.83	355.88	2296.05	2651.93	1.1342	6.4102	7.5444
90	70.14	376.90	2283.19	2660.09	1.1924	6.2866	7.4790
95	84.55	397.94	2270.19	2668.13	1.2500	6.1659	7.4158
100	101.3	419.02	2257.03	2676.05	1.3068	6.0480	7.3548
105	120.8	440.13	2243.70	2683.83	1.3629	5.9328	7.2958
110	143.3	461.27	2230.20	2691.47	1.4184	5.8202	7.2386
115	169.1	482.46	2216.50	2698.96	1.4733	5.7100	7.1832
120	198.5	503.69	2202.61	2706.30	1.5275	5.6020	7.1295
125	232.1	524.96	2188.50	2713.46	1.5812	5.4962	7.0774
130	270.1	546.29	2174.16	2720.46	1.6343	5.3925	7.0269
135	313.0	567.67	2159.59	2727.26	1.6869	5.2907	6.9777
140	361.3	589.11	2144.75	2733.87	1.7390	5.1908	6.9298
145	415.4	610.61	2129.65	2740.26	1.7906	5.0926	6.8832
150	475.9	632.18	2114.26	2746.44	1.8417	4.9960	6.8378
155	543.1	653.82	2098.56	2752.39	1.8924	4.9010	6.7934
160	617.8	675.53	2082.55	2758.09	1.9426	4.8075	6.7501
165	700.5	697.32	2066.20	2763.53	1.9924	4.7153	6.7078
170	791.7	719.20	2049.50	2768.70	2.0418	4.6244	6.6663
175	892.0	741.16	2032.42	2773.58	2.0909	4.5347	6.6256
180	1002.2	763.21	2014.96	2778.16	2.1395	4.4461	6.5857
185	1122.7	785.36	1997.07	2782.43	2.1878	4.3586	6.5464
190	1254.4	807.61	1978.76	2786.37	2.2358	4.2720	6.5078

جدول ب ۲-۱. آب اشباع (ادامه)

		حجم مخصوص، m^3/kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
$(^\circ\text{C})$	(kPa)	v_f	v_{fg}	v_g	u_f	u_{fg}	u_g
195	1397.8	0.001149	0.13990	0.14105	828.36	1764.43	2592.79
200	1553.8	0.001156	0.12620	0.12736	850.64	1744.66	2595.29
205	1723.0	0.001164	0.11405	0.11521	873.02	1724.49	2597.52
210	1906.3	0.001173	0.10324	0.10441	895.51	1703.93	2599.44
215	2104.2	0.001181	0.09361	0.09479	918.12	1682.94	2601.06
220	2317.8	0.001190	0.08500	0.08619	940.85	1661.49	2602.35
225	2547.7	0.001199	0.07729	0.07849	963.72	1639.58	2603.30
230	2794.9	0.001209	0.07037	0.07158	986.72	1617.17	2603.89
235	3060.1	0.001219	0.06415	0.06536	1009.88	1594.24	2604.11
240	3344.2	0.001229	0.05853	0.05976	1033.19	1570.75	2603.95
245	3648.2	0.001240	0.05346	0.05470	1056.69	1546.68	2603.37
250	3973.0	0.001251	0.04887	0.05013	1080.37	1522.00	2602.37
255	4319.5	0.001263	0.04471	0.04598	1104.26	1496.66	2600.93
260	4688.6	0.001276	0.04093	0.04220	1128.37	1470.64	2599.01
265	5081.3	0.001289	0.03748	0.03877	1152.72	1443.87	2596.60
270	5498.7	0.001302	0.03434	0.03564	1177.33	1416.33	2593.66
275	5941.8	0.001317	0.03147	0.03279	1202.23	1387.94	2590.17
280	6411.7	0.001332	0.02884	0.03017	1227.43	1358.66	2586.09
285	6909.4	0.001348	0.02642	0.02777	1252.98	1328.41	2581.38
290	7436.0	0.001366	0.02420	0.02557	1278.89	1297.11	2575.99
295	7992.8	0.001384	0.02216	0.02354	1305.21	1264.67	2569.87
300	8581.0	0.001404	0.02027	0.02167	1331.97	1230.99	2562.96
305	9201.8	0.001425	0.01852	0.01995	1359.22	1195.94	2555.16
310	9856.6	0.001447	0.01690	0.01835	1387.03	1159.37	2546.40
315	10547	0.001472	0.01539	0.01687	1415.44	1121.11	2536.55
320	11274	0.001499	0.01399	0.01549	1444.55	1080.93	2525.48
325	12040	0.001528	0.01267	0.01420	1474.44	1038.57	2513.01
330	12845	0.001561	0.01144	0.01300	1505.24	993.66	2498.91
335	13694	0.001597	0.01027	0.01186	1537.11	945.77	2482.88
340	14586	0.001638	0.00916	0.01080	1570.26	894.26	2464.53
345	15525	0.001685	0.00810	0.00978	1605.01	838.29	2443.30
350	16514	0.001740	0.00707	0.00881	1641.81	776.58	2418.39
355	17554	0.001807	0.00607	0.00787	1681.41	707.11	2388.52
360	18651	0.001892	0.00505	0.00694	1725.19	626.29	2351.47
365	19807	0.002011	0.00398	0.00599	1776.13	526.54	2302.67
370	21028	0.002213	0.00271	0.00493	1843.84	384.69	2228.53
374.1	22089	0.003155	0	0.00315	2029.58	0	2029.58

جدول ب-۱. آب اشباع (ادامه)

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، kJ/kg-K		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(°C)	(kPa)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
195	1397.8	829.96	1959.99	2789.96	2.2835	4.1863	6.4697
200	1553.8	852.43	1940.75	2793.18	2.3308	4.1014	6.4322
205	1723.0	875.03	1921.00	2796.03	2.3779	4.0172	6.3951
210	1906.3	897.75	1900.73	2798.48	2.4247	3.9337	6.3584
215	2104.2	920.61	1879.91	2800.51	2.4713	3.8507	6.3221
220	2317.8	943.61	1858.51	2802.12	2.5177	3.7683	6.2860
225	2547.7	966.77	1836.50	2803.27	2.5639	3.6863	6.2502
230	2794.9	990.10	1813.85	2803.95	2.6099	3.6047	6.2146
235	3060.1	1013.61	1790.53	2804.13	2.6557	3.5233	6.1791
240	3344.2	1037.31	1766.50	2803.81	2.7015	3.4422	6.1436
245	3648.2	1061.21	1741.73	2802.95	2.7471	3.3612	6.1083
250	3973.0	1085.34	1716.18	2801.52	2.7921	3.2802	6.0729
255	4319.5	1109.72	1689.80	2799.51	2.8382	3.1992	6.0374
260	4688.6	1134.35	1662.54	2796.89	2.8837	3.1181	6.0018
265	5081.3	1159.27	1634.34	2793.61	2.9293	3.0368	5.9661
270	5498.7	1184.49	1605.16	2789.65	2.9750	2.9551	5.9301
275	5941.8	1210.05	1574.92	2784.97	3.0208	2.8730	5.8937
280	6411.7	1235.97	1543.55	2779.53	3.0667	2.7903	5.8570
285	6909.4	1262.29	1510.97	2773.27	3.1129	2.7069	5.8198
290	7436.0	1289.04	1477.08	2766.13	3.1593	2.6227	5.7821
295	7992.8	1316.27	1441.78	2758.05	3.2061	2.5375	5.7436
300	8581.0	1344.01	1404.93	2748.94	3.2533	2.4511	5.7044
305	9201.8	1372.33	1366.38	2738.72	3.3009	2.3633	5.6642
310	9856.6	1401.29	1325.97	2727.27	3.3492	2.2737	5.6229
315	10547	1430.97	1283.48	2714.44	3.3981	2.1821	5.5803
320	11274	1461.45	1238.64	2700.08	3.4479	2.0882	5.5361
325	12040	1492.84	1191.13	2683.97	3.4987	1.9913	5.4900
330	12845	1525.29	1140.56	2665.85	3.5506	1.8909	5.4416
335	13694	1558.98	1086.37	2645.35	3.6040	1.7863	5.3903
340	14586	1594.15	1027.86	2622.01	3.6593	1.6763	5.3356
345	15525	1631.17	964.02	2595.19	3.7169	1.5594	5.2763
350	16514	1670.54	893.38	2563.92	3.7776	1.4336	5.2111
355	17554	1713.13	813.59	2526.72	3.8427	1.2951	5.1378
360	18651	1760.48	720.52	2481.00	3.9146	1.1379	5.0525
365	19807	1815.96	605.44	2421.40	3.9983	0.9487	4.9470
370	21028	1890.37	441.75	2332.12	4.1104	0.6868	4.7972
374.1	22089	2099.26	0	2099.26	4.4297	0	4.4297

جدول ب-۱. آب اشباع (ادامه)

		حجم مخصوص، m^3/kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
فشار	دما	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(kPa)	(°C)	v_f	v_{fg}	v_g	u_f	u_{fg}	u_g
0.6113	0.01	0.001000	206.131	206.132	0	2375.3	2375.3
1.0	6.98	0.001000	129.20702	129.20802	29.29	2355.69	2384.98
1.5	13.03	0.001001	87.97913	87.98013	54.70	2338.63	2393.32
2.0	17.50	0.001001	67.00285	67.00385	73.47	2326.02	2399.48
2.5	21.08	0.001002	54.25285	54.25385	88.47	2315.93	2404.40
3.0	24.08	0.001003	45.66402	45.66502	101.03	2307.48	2408.51
4.0	28.96	0.001004	34.79915	34.80015	121.44	2293.73	2415.17
5.0	32.88	0.001005	28.19150	28.19251	137.79	2282.70	2420.49
7.5	40.29	0.001008	19.23674	19.23775	168.76	2261.74	2430.50
10	45.81	0.001010	14.67254	14.67355	191.79	2246.10	2437.89
15	53.97	0.001014	10.02117	10.02218	225.90	2222.83	2448.73
20	60.06	0.001017	7.64835	7.64937	251.35	2205.36	2456.71
25	64.97	0.001020	6.20322	6.20424	271.88	2191.21	2463.08
30	69.10	0.001022	5.22816	5.22918	289.18	2179.22	2468.40
40	75.87	0.001026	3.99243	3.99345	317.51	2159.49	2477.00
50	81.33	0.001030	3.23931	3.24034	340.42	2143.43	2483.85
75	91.77	0.001037	2.21607	2.21711	394.29	2112.39	2496.67
100	99.62	0.001043	1.69296	1.69400	417.33	2088.72	2506.06
125	105.99	0.001048	1.37385	1.37490	444.16	2069.32	2513.48
150	111.37	0.001053	1.15828	1.15933	466.92	2052.72	2519.64
175	116.06	0.001057	1.00257	1.00363	486.78	2038.12	2524.90
200	120.23	0.001061	0.88467	0.88573	504.47	2025.02	2529.49
225	124.00	0.001064	0.79219	0.79325	520.45	2013.10	2533.56
250	127.43	0.001067	0.71765	0.71871	535.08	2002.14	2537.21
275	130.60	0.001070	0.65624	0.65731	548.57	1991.95	2540.53
300	133.55	0.001073	0.60475	0.60582	561.13	1982.43	2543.55
325	136.30	0.001076	0.56093	0.56201	572.88	1973.46	2546.34
350	138.88	0.001079	0.52317	0.52425	583.93	1964.98	2548.92
375	141.32	0.001081	0.49029	0.49137	594.38	1956.93	2551.31
400	143.63	0.001084	0.46138	0.46246	604.29	1949.26	2553.55
450	147.93	0.001088	0.41289	0.41398	622.75	1934.87	2557.62
500	151.86	0.001093	0.37380	0.37489	639.66	1921.57	2561.23
550	155.48	0.001097	0.34159	0.34268	655.30	1909.17	2564.47
600	158.85	0.001101	0.31457	0.31567	669.88	1897.52	2567.40
650	162.01	0.001104	0.29158	0.29268	683.55	1886.51	2570.06
700	164.97	0.001108	0.27176	0.27286	696.43	1876.07	2572.49
750	167.77	0.001111	0.25449	0.25560	708.62	1866.11	2574.73
800	170.43	0.001115	0.23931	0.24043	720.20	1856.58	2576.79

جدول ب-۱. آب اشباع (ادامه)

		kJ/kg، آنتالپی،			kJ/kg-K، آنترپی،		
فشار	دما	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(kPa)	(°C)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0.6113	0.01	0.00	2501.3	2501.3	0	9.1562	9.1562
1.0	6.98	29.29	2484.89	2514.18	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	54.70	2470.59	2525.30	0.1956	8.6322	8.8278
2.0	17.50	73.47	2460.02	2533.49	0.2607	8.4629	8.7236
2.5	21.08	88.47	2451.56	2540.03	0.3120	8.3311	8.6431
3.0	24.08	101.03	2444.47	2545.50	0.3545	8.2231	8.5775
4.0	28.96	121.44	2432.93	2554.37	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	137.79	2423.66	2561.45	0.4763	7.9187	8.3950
7.5	40.29	168.77	2406.02	2574.79	0.5763	7.6751	8.2514
10	45.81	191.81	2392.82	2584.63	0.6492	7.5010	8.1501
15	53.97	225.91	2373.14	2599.06	0.7548	7.2536	8.0084
20	60.06	251.38	2358.33	2609.70	0.8319	7.0766	7.9085
25	64.97	271.90	2346.29	2618.19	0.8930	6.9383	7.8313
30	69.10	289.21	2336.07	2625.28	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	317.55	2319.19	2636.74	1.0258	6.6441	7.6700
50	81.33	340.47	2305.40	2645.87	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.77	384.36	2278.59	2662.96	1.2129	6.2434	7.4563
100	99.62	417.44	2258.02	2675.46	1.3025	6.0568	7.3593
125	105.99	444.30	2241.05	2685.35	1.3739	5.9104	7.2843
150	111.37	467.08	2226.46	2693.54	1.4335	5.7897	7.2232
175	116.06	486.97	2213.57	2700.53	1.4848	5.6868	7.1717
200	120.23	504.68	2201.96	2706.63	1.5300	5.5970	7.1271
225	124.00	520.69	2191.35	2712.04	1.5705	5.5173	7.0878
250	127.43	535.34	2181.55	2716.89	1.6072	5.4455	7.0526
275	130.60	548.87	2172.42	2721.29	1.6407	5.3801	7.0208
300	133.55	561.45	2163.85	2725.30	1.6717	5.3201	6.9918
325	136.30	573.23	2155.76	2728.99	1.7005	5.2646	6.9651
350	138.88	584.31	2148.10	2732.40	1.7274	5.2130	6.9404
375	141.32	594.79	2140.79	2735.58	1.7527	5.1647	6.9174
400	143.63	604.73	2133.81	2738.53	1.7766	5.1193	6.8958
450	147.93	623.24	2120.67	2743.91	1.8206	5.0359	6.8565
500	151.86	640.21	2108.47	2748.67	1.8606	4.9606	6.8212
550	155.48	655.91	2097.04	2752.94	1.8972	4.8920	6.7892
600	158.85	670.54	2086.26	2756.80	1.9311	4.8289	6.7600
650	162.01	684.26	2076.04	2760.30	1.9627	4.7704	6.7330
700	164.97	697.20	2066.30	2763.50	1.9922	4.7158	6.7080
750	167.77	709.45	2056.98	2766.43	2.0199	4.6647	6.6846
800	170.43	721.10	2048.04	2769.13	2.0461	4.6166	6.6627

جدول ب-۱. آب اشباع (ادامه)

		انرژی داخلی، kJ/kg			حجم مخصوص، m ³ /kg		
بخار اشباع	مایع مخلوط	مایع اشباع	بخار اشباع	مایع مخلوط	مایع اشباع	دما	فشار
u_g	u_{fg}	u_f	v_g	v_{fg}	v_f	(°C)	(kPa)
2578.69	1847.45	731.25	0.22698	0.22586	0.001118	172.96	850
2580.46	1838.65	741.81	0.21497	0.21385	0.001121	175.38	900
2582.11	1830.17	751.94	0.20419	0.20306	0.001124	177.69	950
2583.64	1821.97	761.67	0.19444	0.19332	0.001127	179.91	1000
2586.40	1806.32	780.08	0.17753	0.17639	0.001133	184.09	1100
2588.82	1791.55	797.27	0.16333	0.16220	0.001139	187.99	1200
2590.95	1777.53	813.42	0.15125	0.15011	0.001144	191.64	1300
2592.83	1764.15	828.68	0.14084	0.13969	0.001149	195.07	1400
2594.5	1751.3	843.14	0.13177	0.13062	0.001154	198.32	1500
2597.83	1721.39	876.44	0.11349	0.11232	0.001166	205.76	1750
2600.26	1693.84	906.42	0.09963	0.09845	0.001177	212.42	2000
2601.98	1668.18	933.81	0.08875	0.08756	0.001187	218.45	2250
2603.13	1644.04	959.09	0.07998	0.07878	0.001197	223.99	2500
2603.81	1621.16	982.65	0.07275	0.07154	0.001207	229.12	2750
2604.10	1599.34	1004.76	0.06668	0.06546	0.001216	233.90	3000
2604.04	1578.43	1025.62	0.06152	0.06029	0.001226	238.38	3250
2603.70	1558.29	1045.41	0.05707	0.05583	0.001235	242.60	3500
2602.27	1519.99	1082.28	0.04978	0.04853	0.001252	250.40	4000
2597.12	1449.34	1147.78	0.03944	0.03815	0.001286	263.99	5000
2589.69	1384.27	1205.41	0.03244	0.03112	0.001319	275.64	6000
2580.48	1322.97	1257.51	0.02737	0.02602	0.001351	285.88	7000
2569.79	1264.25	1305.54	0.02352	0.02213	0.001384	295.06	8000
2557.75	1207.28	1350.47	0.02048	0.01907	0.001418	303.40	9000
2544.41	1151.40	1393.00	0.01803	0.01657	0.001452	311.06	10000
2529.74	1096.06	1433.68	0.01599	0.01450	0.001489	318.15	11000
2513.67	1040.76	1472.92	0.01426	0.01274	0.001527	324.75	12000
2496.08	984.99	1511.09	0.01278	0.01121	0.001567	330.93	13000
2476.76	928.23	1548.53	0.01149	0.00987	0.001611	336.75	14000
2455.43	869.85	1585.58	0.01034	0.00868	0.001658	342.24	15000
2431.70	809.07	1622.63	0.00931	0.00760	0.001711	347.43	16000
2404.96	744.80	1660.16	0.00836	0.00659	0.001770	352.37	17000
2374.28	675.42	1698.86	0.00749	0.00565	0.001840	357.06	18000
2338.05	598.18	1739.87	0.00666	0.00473	0.001924	361.54	19000
2293.05	507.58	1785.47	0.00583	0.00380	0.002035	365.81	20000
2230.71	388.74	1841.97	0.00495	0.00275	0.002206	369.89	21000
2081.39	108.24	1973.16	0.00353	0.00072	0.002808	373.80	22000
2029.58	0	2029.58	0.00315	0	0.003155	374.14	22089

جدول ب-۱. آب اشباع (ادامه)

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، kJ/kg-K		
فشار	دما	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(kPa)	(°C)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
850	172.96	732.20	2039.43	2771.63	2.0709	4.5711	6.6421
900	175.38	742.82	2031.12	2773.94	2.0946	4.5280	6.6225
950	177.69	753.00	2023.08	2776.08	2.1171	4.4869	6.6040
1000	179.91	762.79	2015.29	2778.08	2.1386	4.4478	6.5864
1100	184.09	781.32	2000.36	2781.68	2.1791	4.3744	6.5535
1200	187.99	798.64	1986.19	2784.82	2.2165	4.3067	6.5233
1300	191.64	814.91	1972.67	2787.58	2.2514	4.2438	6.4953
1400	195.07	830.29	1959.72	2790.00	2.2842	4.1850	6.4692
1500	198.32	844.87	1947.28	2792.15	2.3150	4.1298	6.4448
1750	205.76	878.48	1917.95	2796.43	2.3851	4.0044	6.3895
2000	212.42	908.77	1890.74	2799.51	2.4473	3.8935	6.3408
2250	218.45	936.48	1865.19	2801.67	2.5034	3.7938	6.2971
2500	223.99	962.09	1840.98	2803.07	2.5546	3.7028	6.2574
2750	229.12	985.97	1817.89	2803.86	2.6018	3.6190	6.2208
3000	233.90	1008.41	1795.73	2804.14	2.6456	3.5412	6.1869
3250	238.38	1029.60	1774.37	2803.97	2.6866	3.4685	6.1551
3500	242.60	1049.73	1753.70	2803.43	2.7252	3.4000	6.1252
4000	250.40	1087.29	1714.09	2801.38	2.7963	3.2737	6.0700
5000	263.99	1154.21	1640.12	2794.33	2.9201	3.0532	5.9733
6000	275.64	1213.32	1571.00	2784.33	3.0266	2.8625	5.8891
7000	285.88	1266.97	1505.10	2772.07	3.1210	2.6922	5.8132
8000	295.06	1316.61	1441.33	2757.94	3.2067	2.5365	5.7431
9000	303.40	1363.23	1378.88	2742.11	3.2857	2.3915	5.6771
10000	311.06	1407.53	1317.14	2724.67	3.3595	2.2545	5.6140
11000	318.15	1450.05	1255.55	2705.60	3.4294	2.1233	5.5527
12000	324.75	1491.24	1193.59	2684.83	3.4961	1.9962	5.4923
13000	330.93	1531.46	1130.76	2662.22	3.5604	1.8718	5.4323
14000	336.75	1571.08	1066.47	2637.55	3.6231	1.7485	5.3716
15000	342.24	1610.45	1000.04	2610.49	3.6847	1.6250	5.3097
16000	347.43	1650.00	930.59	2580.59	3.7460	1.4995	5.2454
17000	352.37	1690.25	856.90	2547.15	3.8078	1.3698	5.1776
18000	357.06	1731.97	777.13	2509.09	3.8713	1.2330	5.1044
19000	361.54	1776.43	688.11	2464.54	3.9387	1.0841	5.0227
20000	365.81	1826.18	583.56	2409.74	4.0137	0.9132	4.9269
21000	369.89	1888.30	446.42	2334.72	4.1073	0.6942	4.8015
22000	373.80	2034.92	124.04	2158.97	4.3307	0.1917	4.5224
22089	374.14	2099.26	0	2099.26	4.4297	0	4.4297

جدول ب-۲. آب فوق گرم

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	10 kPa (45.81)				50 kPa (81.33)			
Sat.	14.67355	2437.89	2584.63	8.1501	3.24034	2483.85	2645.87	7.5939
50	14.86920	2443.87	2592.56	8.1749				
100	17.19561	2515.50	2687.46	8.4479	3.41833	2511.61	2682.52	7.6947
150	19.51251	2587.86	2782.99	8.6881	3.88937	2585.61	2780.08	7.9400
200	21.82507	2661.27	2879.52	8.9037	4.35595	2659.85	2877.64	8.1579
250	24.13559	2735.95	2977.31	9.1002	4.82045	2734.97	2975.99	8.3555
300	26.44508	2812.06	3076.51	9.2812	5.28391	2811.33	3075.52	8.5372
400	31.06252	2968.89	3279.51	9.6076	6.20929	2968.43	3278.89	8.8641
500	35.67896	3132.26	3489.05	9.8977	7.13364	3131.94	3488.62	9.1545
600	40.29488	3302.45	3705.40	10.1608	8.05748	3302.22	3705.10	9.4177
700	44.91052	3479.63	3928.73	10.4028	8.98104	3479.45	3928.51	9.6599
800	49.52599	3663.84	4159.10	10.6281	9.90444	3663.70	4158.92	9.8852
900	54.14137	3855.03	4396.44	10.8395	10.82773	3854.91	4396.30	10.0967
1000	58.75669	4053.01	4640.58	11.0392	11.75097	4052.91	4640.46	10.2964
1100	63.37198	4257.47	4891.19	11.2287	12.67418	4257.37	4891.08	10.4858
1200	67.98724	4467.91	5147.78	11.4090	13.59737	4467.82	5147.69	10.6662
1300	72.60250	4683.68	5409.70	14.5810	14.52054	4683.58	5409.61	10.8382
	100 kPa (99.62)				200 kPa (120.23)			
Sat.	1.69400	2506.06	2675.46	7.3593	0.88573	2529.49	2706.63	7.1271
150	1.93636	2582.75	2776.38	7.6133	0.95964	2576.87	2768.80	7.2795
200	2.17226	2658.05	2875.27	7.8342	1.08034	2654.39	2870.46	7.5066
250	2.40604	2733.73	2974.33	8.0332	1.19880	2731.22	2970.98	7.7085
300	2.63876	2810.41	3074.28	8.2157	1.31616	2808.55	3071.79	7.8926
400	3.10263	2967.85	3278.11	8.5434	1.54930	2966.69	3276.55	8.2217
500	3.56547	3131.54	3488.09	8.8341	1.78139	3130.75	3487.03	8.5132
600	4.02781	3301.94	3704.72	9.0975	2.01297	3301.36	3703.96	8.7769
700	4.48986	3479.24	3928.23	9.3398	2.24426	3478.81	3927.66	9.0194
800	4.95174	3663.53	4158.71	9.5652	2.47539	3663.19	4158.27	9.2450
900	5.41353	3854.77	4396.12	9.7767	2.70643	3854.49	4395.77	9.4565
1000	5.87526	4052.78	4640.31	9.9764	2.93740	4052.53	4640.01	9.6563
1100	6.33696	4257.25	4890.95	10.1658	3.16834	4257.01	4890.68	9.8458
1200	6.79863	4467.70	5147.56	10.3462	3.39927	4467.46	5147.32	10.0262
1300	7.26030	4683.47	5409.49	10.5182	3.63018	4683.23	5409.26	10.1982
	300 kPa (133.55)				400 kPa (143.63)			
Sat.	0.60582	2543.55	2725.30	6.9918	0.46246	2553.55	2738.53	6.8958
150	0.63388	2570.79	2760.95	7.0778	0.47084	2564.48	2752.82	6.9299
200	0.71629	2650.65	2865.54	7.3115	0.53422	2646.83	2860.51	7.1706
250	0.79636	2728.69	2967.59	7.5165	0.59512	2726.11	2964.16	7.3788
300	0.87529	2806.69	3069.28	7.7022	0.65484	2804.81	3066.75	7.5661
400	1.03151	2965.53	3274.98	8.0329	0.77262	2964.36	3273.41	7.8984
500	1.18669	3129.95	3485.96	8.3250	0.88934	3129.15	3484.89	8.1912
600	1.34136	3300.79	3703.20	8.5892	0.00555	3300.22	3702.44	8.4557
700	1.49573	3478.38	3927.10	8.8319	1.12147	3477.95	3926.53	8.6987
800	1.64994	3662.85	4157.83	9.0575	1.23722	3662.51	4157.40	8.9244
900	1.80406	3854.20	4395.42	9.2691	1.35288	3853.91	4395.06	9.1361
1000	1.95812	4052.27	4639.71	9.4689	1.46847	4052.02	4639.41	9.3360
1100	2.11214	4256.77	4890.41	9.6585	1.58404	4256.53	4890.15	9.5255
1200	2.26614	4467.23	5147.07	9.8389	1.69958	4466.99	5146.83	9.7059
1300	2.42013	4682.99	5409.03	10.0109	1.81511	4682.75	5408.80	9.8780

جداول ترمودینامیکی ۲۰۱

جدول ب-۲. آب فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
500 kPa (151.86)					600 kPa (158.85)			
Sat.	0.37489	2561.23	2748.67	6.8212	0.31567	2567.40	2756.80	6.7600
200	0.42492	2642.91	2855.37	7.0592	0.35202	2638.91	2850.12	6.9665
250	0.47436	2723.50	2960.68	7.2708	0.39383	2720.86	2957.16	7.1816
300	0.52256	2802.91	3064.20	7.4598	0.43437	2801.00	3061.63	7.3723
350	0.57012	2882.59	3167.65	7.6328	0.47424	2881.12	3165.66	7.5463
400	0.61728	2963.19	3271.83	7.7937	0.51372	2962.02	3270.25	7.7078
500	0.71093	3128.35	3483.82	8.0872	0.59199	3127.55	3482.75	8.0020
600	0.80406	3299.64	3701.67	8.3521	0.66974	3299.07	3700.91	8.2673
700	0.89691	3477.52	3925.97	8.5952	0.74720	3477.08	3925.41	8.5107
800	0.98959	3662.17	4156.96	8.8211	0.82450	3661.83	4156.52	8.7367
900	1.08217	3853.63	4394.71	9.0329	0.90169	3853.34	4394.36	8.9485
1000	1.17469	4051.76	4639.11	9.2328	0.97883	4051.51	4638.81	9.1484
1100	1.26718	4256.29	4889.88	9.4224	1.05594	4256.05	4889.61	9.3381
1200	1.35964	4466.76	5146.58	9.6028	1.13302	4466.52	5146.34	9.5185
1300	1.45210	4682.52	5408.57	9.7749	1.21009	4682.28	5408.34	9.6906
800 kPa (170.43)					1000 kPa (179.91)			
Sat.	0.24043	2576.79	2769.13	6.6627	0.19444	2583.64	2778.08	6.5864
200	0.26080	2630.61	2839.25	6.8158	0.20596	2621.90	2827.86	6.6939
250	0.29314	2715.46	2949.97	7.0384	0.23268	2709.91	2942.59	6.9246
300	0.32411	2797.14	3056.43	7.2327	0.25794	2793.21	3051.15	7.1228
350	0.35439	2878.16	3161.68	7.4088	0.28247	2875.18	3157.65	7.3010
400	0.38426	2959.66	3267.07	7.5715	0.30659	2957.29	3263.88	7.4650
500	0.44331	3125.95	3480.60	7.8672	0.35411	3124.34	3478.44	7.7621
600	0.50184	3297.91	3699.38	8.1332	0.40109	3296.76	3697.85	8.0289
700	0.56007	3476.22	3924.27	8.3770	0.44779	3475.35	3923.14	8.2731
800	0.61813	3661.14	4155.65	8.6033	0.49432	3660.46	4154.78	8.4996
900	0.67610	3852.77	4393.65	8.8153	0.54075	3852.19	4392.94	8.7118
1000	0.73401	4051.00	4638.20	9.0153	0.58712	4050.49	4637.60	8.9119
1100	0.79188	4255.57	4889.08	9.2049	0.63345	4255.09	4888.55	9.1016
1200	0.84974	4466.05	5145.85	9.3854	0.67977	4465.58	5145.36	9.2821
1300	0.90758	4681.81	5407.87	9.5575	0.72608	4681.33	5407.41	9.4542
1200 kPa (187.99)					1400 kPa (195.07)			
Sat.	0.16333	2588.82	2784.82	6.5233	0.14084	2592.83	2790.00	6.4692
200	0.16930	2612.74	2815.90	6.5898	0.14302	2603.09	2803.32	6.4975
250	0.19235	2704.20	2935.01	6.8293	0.16350	2698.32	2927.22	6.7467
300	0.21382	2789.22	3045.80	7.0316	0.18228	2785.16	3040.35	6.9533
350	0.23452	2872.16	3153.59	7.2120	0.20026	2869.12	3149.49	7.1359
400	0.25480	2954.90	3260.66	7.3773	0.21780	2952.50	3257.42	7.3025
500	0.29463	3122.72	3476.28	7.6758	0.25215	3121.10	3474.11	7.6026
600	0.33393	3295.60	3696.32	7.9434	0.28596	3294.44	3694.78	7.8710
700	0.37294	3474.48	3922.01	8.1881	0.31947	3473.61	3920.87	8.1160
800	0.41177	3659.77	4153.90	8.4149	0.35281	3659.09	4153.03	8.3431
900	0.45051	3851.62	4392.23	8.6272	0.38606	3851.05	4391.53	8.5555
1000	0.48919	4049.98	4637.00	8.8274	0.41924	4049.47	4636.41	8.7558
1100	0.52783	4254.61	4888.02	9.0171	0.45239	4254.14	4887.49	8.9456
1200	0.56646	4465.12	5144.87	9.1977	0.48552	4464.65	5144.38	9.1262
1300	0.60507	4680.86	5406.95	9.3698	0.51864	4680.39	5406.49	9.2983

جدول ب-۲. آب فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	1600 kPa (201.40)				1800 kPa (207.15)			
Sat.	0.12380	2595.95	2794.02	6.4217	0.11042	2598.38	2797.13	6.3793
250	0.14184	2692.26	2919.20	6.6732	0.12497	2686.02	2910.96	6.6066
300	0.15862	2781.03	3034.83	6.8844	0.14021	2776.83	3029.21	6.8226
350	0.17456	2866.05	3145.35	7.0693	0.15457	2862.95	3141.18	7.0099
400	0.19005	2950.09	3254.17	7.2373	0.16847	2947.66	3250.90	7.1793
500	0.22029	3119.47	3471.93	7.5389	0.19550	3117.84	3469.75	7.4824
600	0.24998	3293.27	3693.23	7.8080	0.22199	3292.10	3691.69	7.7523
700	0.27937	3472.74	3919.73	8.0535	0.24818	3471.87	3918.59	7.9983
800	0.30859	3658.40	4152.15	8.2808	0.27420	3657.71	4151.27	8.2258
900	0.33772	3850.47	4390.82	8.4934	0.30012	3849.90	4390.11	8.4386
1000	0.36678	4048.96	4635.81	8.6938	0.32598	4048.45	4635.21	8.6390
1100	0.39581	4253.66	4886.95	8.8837	0.35180	4253.18	4886.42	8.8290
1200	0.42482	4464.18	5143.89	9.0642	0.37761	4463.71	5143.40	9.0096
1300	0.45382	4679.92	5406.02	9.2364	0.40340	4679.44	5405.56	9.1817
	2000 kPa (212.42)				2500 kPa (223.99)			
Sat.	0.09963	2600.26	2799.51	6.3408	0.07998	1603.13	2803.07	6.2574
250	0.11144	2679.58	2902.46	6.5452	0.08700	2662.55	2880.06	6.4084
300	0.12547	2772.56	3023.50	6.7663	0.09890	2761.56	3008.81	6.6437
350	0.13857	2859.81	3136.96	6.9562	0.10976	2851.84	3126.24	6.8402
400	0.15120	2945.21	3247.60	7.1270	0.12010	2939.03	3239.28	7.0147
450	0.16353	3030.41	3357.48	7.2844	0.13014	3025.43	3350.77	7.1745
500	0.17568	3116.20	3467.55	7.4316	0.13998	3112.08	3462.04	7.3233
600	0.19960	3290.93	3690.14	7.7023	0.15930	3287.99	3686.25	7.596()
700	0.22323	3470.99	3917.45	7.9487	0.17832	3468.80	3914.59	7.8435
800	0.24668	3657.03	4150.40	8.1766	0.19716	3655.30	4148.20	8.0720
900	0.27004	3849.33	4389.40	8.3895	0.21590	3847.89	4387.64	8.2853
1000	0.29333	4047.94	4634.61	8.5900	0.23458	4046.67	4633.12	8.4860
1100	0.31659	4252.71	4885.89	8.7800	0.25322	4251.52	4884.57	8.6761
1200	0.33984	4463.25	5142.92	8.9606	0.27185	4462.08	5141.70	8.8569
1300	0.36306	4678.97	5405.10	9.1328	0.29046	4677.80	5403.95	9.0291
	3000 kPa (233.90)				4000 kPa (250.40)			
Sat.	0.06668	2604.10	2804.14	6.1869	0.04978	2602.27	2801.38	6.0700
250	0.07058	2644.00	2855.75	6.2871	-	-	-	-
300	0.08114	2750.05	2993.48	6.5389	0.05884	2725.33	2960.68	6.3614
350	0.09053	2843.66	3115.25	6.7427	0.06645	2826.65	3092.43	6.5820
400	0.09936	2932.75	3230.82	6.9211	0.07341	2919.88	3213.51	6.7689
450	0.10787	3020.38	3344.00	7.0833	0.08003	3010.13	3330.23	6.9362
500	0.11619	3107.92	3456.48	7.2337	0.08643	3099.49	3445.21	7.0900
600	0.13243	3285.03	3682.34	7.5084	0.09885	3279.06	3674.44	7.3688
700	0.14838	3466.59	3911.72	7.7571	0.11095	3462.15	3905.94	7.6198
800	0.16414	3653.58	4146.00	7.9862	0.12287	3650.11	4141.59	7.8502
900	0.17980	3846.46	4385.87	8.1999	0.13469	3843.59	4382.34	8.0647
1000	0.19541	4045.40	4631.63	8.4009	0.14645	4042.87	4628.65	8.2661
1100	0.21098	4250.33	4883.26	8.5911	0.15817	4247.96	4880.63	8.4566
1200	0.22652	4460.92	5140.49	8.7719	0.16987	4458.60	5138.07	8.6376
1300	0.24206	4676.63	5402.81	8.9442	0.18156	4674.29	5400.52	8.8099

جداول ترمودینامیکی ۲۰۳

جدول ب-۲. آب فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	5000 kPa (263.99)				6000 kPa (275.64)			
Sat.	0.03944	2597.12	2794.33	5.9733	0.03244	2589.69	2784.33	5.8891
300	0.04532	2697.94	2924.53	6.2083	0.03616	2667.22	2884.19	6.0673
350	0.05194	2808.67	3068.39	6.4492	0.04223	2789.61	3042.97	6.3334
400	0.05781	2906.58	3195.64	6.6458	0.04739	2892.81	3177.17	6.5407
450	0.06330	2999.64	3316.15	6.8185	0.05214	2988.90	3301.76	6.7192
500	0.06857	3090.92	3433.76	6.9758	0.05665	3082.20	3422.12	6.8802
550	0.07368	3181.82	3550.23	7.1217	0.06101	3174.57	3540.62	7.0287
600	0.07869	3273.01	3666.47	7.2588	0.06525	3266.89	3658.40	7.1676
700	0.08849	3457.67	3900.13	7.5122	0.07352	3453.15	3894.28	7.4234
800	0.09811	3646.62	4137.17	7.7440	0.08160	3643.12	4132.74	7.6566
900	0.10762	3840.71	4378.82	7.9593	0.08958	3837.84	4375.29	7.8727
1000	0.11707	4040.35	4625.69	8.1612	0.09749	4037.83	4622.74	8.0751
1100	0.12648	4245.61	4878.02	8.3519	0.10536	4243.26	4875.42	8.2661
1200	0.13587	4456.30	5135.67	8.5330	0.11321	4454.00	5133.28	8.4473
1300	0.14526	4671.96	5398.24	8.7055	0.12106	4669.64	5395.97	8.6199
	8000 kPa (295.06)				10000 kPa (311.06)			
Sat.	0.02352	2569.79	2757.94	5.7431	0.01803	2544.41	2724.67	5.6140
300	0.02426	2590.93	2784.98	5.7905				
350	0.02995	2747.67	2987.30	6.1300	0.02242	2699.16	2923.39	5.9442
400	0.03432	2863.75	3138.28	6.3633	0.02641	2832.38	3096.46	6.2119
450	0.03817	2966.66	3271.99	6.5550	0.02975	2943.32	3240.83	6.4189
500	0.04175	3064.30	3398.27	6.7239	0.03279	3045.77	3373.63	6.5965
550	0.04516	3159.76	3521.01	6.8778	0.03564	3144.54	3500.92	6.7561
600	0.04845	3254.43	3642.03	7.0205	0.03837	3241.68	3625.34	6.9028
700	0.05481	3444.00	3882.47	7.2812	0.04358	3434.72	3870.52	7.1687
800	0.06097	3636.08	4123.84	7.5173	0.04859	3628.97	4114.91	7.4077
900	0.06702	3832.08	4368.26	7.7350	0.05349	3826.32	4361.24	7.6272
1000	0.07301	4032.81	4616.87	7.9384	0.05832	4027.81	4611.04	7.8315
1100	0.07896	4238.60	4870.25	8.1299	0.06312	4233.97	4865.14	8.0236
1200	0.08489	4449.45	5128.54	8.3115	0.06789	4444.93	5123.84	8.2054
1300	0.09080	4665.02	5391.46	8.4842	0.07265	4660.44	5386.99	8.3783
	15000 kPa (342.24)				20000 kPa (365.81)			
Sat.	0.01034	2455.43	2610.49	5.3097	0.00583	2293.05	2409.74	4.9269
350	0.01147	2520.36	2692.41	5.4420				
400	0.01565	2740.70	2975.44	5.8810	0.00994	2619.22	2818.07	5.5539
450	0.01845	2879.47	3156.15	6.1403	0.01270	2806.16	3060.06	5.9016
500	0.02080	2996.52	3308.53	6.3442	0.01477	2942.82	3238.18	6.1400
550	0.02293	3104.71	3448.61	6.5198	0.01656	3062.34	3393.45	6.3347
600	0.02491	3208.64	3582.30	6.6775	0.01818	3174.00	3537.57	6.5048
650	0.02680	3310.37	3712.32	6.8223	0.01969	3281.46	3675.32	6.6582
700	0.02861	3410.94	3840.12	6.9572	0.02113	3386.46	3809.09	6.7993
800	0.03210	3610.99	4092.43	7.2040	0.02385	3592.73	4069.80	7.0544
900	0.03546	3811.89	4343.75	7.4279	0.02645	3797.44	4326.37	7.2830
1000	0.03875	4015.41	4596.63	7.6347	0.02897	4003.12	4582.45	7.4925
1100	0.04200	4222.55	4852.56	7.8282	0.03145	4211.30	4840.24	7.6874
1200	0.04523	4433.78	5112.27	7.0108	0.03391	4422.81	5100.96	7.8706
1300	0.04845	4649.12	5375.94	8.1839	0.03636	4637.95	5365.10	8.0441

جدول ب-۲. آب فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	30000 kPa				40000 kPa			
375	0.001789	1737.75	1791.43	3.9303	0.001641	1677.09	1742.71	3.8289
400	0.002790	2067.34	2151.04	4.4728	0.001908	1854.52	1930.83	4.1134
425	0.005304	2455.06	2614.17	5.1503	0.002532	2096.83	2198.11	4.5028
450	0.006735	2619.30	2821.35	5.4423	0.003693	2365.07	2512.79	4.9459
500	0.008679	2820.67	3081.03	5.7904	0.005623	2678.36	2903.26	5.4699
550	0.010168	2970.31	3275.36	6.0342	0.006984	2869.69	3149.05	5.7784
600	0.011446	3100.53	3443.91	6.2330	0.008094	3022.61	3346.38	6.0113
650	0.012596	3221.04	3598.93	6.4057	0.009064	3158.04	3520.58	6.2054
700	0.013661	3335.84	3745.67	6.5606	0.009942	3283.63	3681.29	6.3750
800	0.015623	3555.60	4024.31	6.8332	0.011523	3517.89	3978.80	6.6662
900	0.017448	3768.48	4291.93	7.0717	0.012963	3739.42	4257.93	6.9150
1000	0.019196	3978.79	4554.68	7.2867	0.014324	3954.64	4527.59	7.1356
1100	0.020903	4189.18	4816.28	7.4845	0.015643	4167.38	4793.08	7.3364
1200	0.022589	4401.29	5078.97	7.6691	0.016940	4380.11	5057.72	7.5224
1300	0.024266	4615.96	5343.95	7.8432	0.018229	4594.28	5323.45	7.6969

جداول ترمودینامیکی ۲۰۵

جدول ب-۳. آب مایع متراکم

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ / kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	500 kPa (151.86)				2000 kPa (212.42)			
Sat.	0.001093	639.66	640.21	1.8606	0.001177	906.42	908.77	2.4473
0.01	0.000999	0.01	0.51	0.0000	0.000999	0.03	2.03	0.0001
20	0.001002	83.91	84.41	0.2965	0.001001	83.82	85.82	0.2962
40	0.001008	167.47	167.98	0.5722	0.001007	167.29	169.30	0.5716
60	0.001017	251.00	251.51	0.8308	0.001016	250.73	252.77	0.8300
80	0.001029	334.73	335.24	1.0749	0.001028	334.38	336.44	1.0739
100	0.001043	418.80	419.32	1.3065	0.001043	418.36	420.45	1.3053
120	0.001060	503.37	503.90	1.5273	0.001059	502.84	504.96	1.5259
140	0.001080	588.66	589.20	1.7389	0.001079	588.02	590.18	1.7373
160	-	-	-	-	0.001101	674.14	676.34	1.9410
180	-	-	-	-	0.001127	761.46	763.71	2.1382
200	-	-	-	-	0.001156	850.30	852.61	2.3301
	5000 kPa (263.99)				10000 kPa (311.06)			
Sat.	0.001286	1147.78	1154.21	2.9201	0.001452	1393.00	1407.53	3.3595
0	0.000998	0.03	5.02	0.0001	0.000995	0.10	10.05	0.0003
20	0.001000	83.64	88.64	0.2955	0.000997	83.35	93.32	0.2945
40	0.001006	166.93	171.95	0.5705	0.001003	166.33	176.36	0.5685
60	0.001015	250.21	255.28	0.8284	0.001013	249.34	259.47	0.8258
80	0.001027	333.69	338.83	1.0719	0.001025	332.56	342.81	1.0687
100	0.001041	417.50	422.71	1.3030	0.001039	416.09	426.48	1.2992
120	0.001058	501.79	507.07	1.5232	0.001055	500.07	510.61	1.5188
140	0.001077	586.74	592.13	1.7342	0.001074	584.67	595.40	1.7291
160	0.001099	672.61	678.10	1.9374	0.001195	670.11	681.07	1.9316
180	0.001124	759.62	765.24	2.1341	0.001120	756.63	767.73	2.1274
200	0.001153	848.08	853.85	2.3254	0.001148	844.49	855.97	2.3178
220	0.001187	938.43	944.36	2.5128	0.001181	934.07	945.88	2.5038
240	0.001226	1031.34	1037.47	2.6978	0.001219	1025.94	1038.13	2.6872
260	0.001275	1127.92	1134.30	2.8829	0.001265	1121.03	1133.68	2.8698
280	-	-	-	-	0.001322	1220.90	1334.11	3.0547
300	-	-	-	-	0.001397	1328.34	1342.31	3.2468

جدول ب-۳. آب مایع متراکم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	15000 kPa (342.24)				20000 kPa (365.81)			
Sat.	0.001658	1585.58	1610.45	3.6847	0.002035	1785.47	1826.18	4.0137
0	0.000993	0.15	15.04	0.0004	0.000990	0.20	20.00	0.0004
20	0.000995	83.05	97.97	0.2934	0.000993	82.75	102.61	0.2922
40	0.001001	165.73	180.75	0.5665	0.000999	165.15	185.14	0.5646
60	0.001011	248.49	263.65	0.8231	0.001008	247.66	267.82	0.8205
80	0.001022	331.46	346.79	1.0655	0.001020	330.38	350.78	1.0623
100	0.001036	414.72	430.26	1.2954	0.001034	413.37	434.04	1.2917
120	0.001052	498.39	514.17	1.5144	0.001050	496.75	517.74	1.5101
140	0.001071	582.64	598.70	1.7241	0.001068	580.67	602.03	1.7192
160	0.001092	667.69	684.07	1.9259	0.001089	665.34	687.11	1.9203
180	0.001116	753.74	770.48	2.1209	0.001112	750.94	773.18	2.1146
200	0.001143	841.04	858.18	2.3103	0.001139	837.70	860.47	2.3031
220	0.001175	929.89	947.52	2.4952	0.001169	925.89	949.27	2.4869
240	0.001211	1020.82	1038.99	2.6770	0.001205	1015.94	1040.04	2.6673
260	0.001255	1114.59	1133.41	2.8575	0.001246	1108.53	1133.45	2.8459
280	0.001308	1212.47	1232.09	3.0392	0.001297	1204.69	1230.62	3.0248
300	0.001377	1316.58	1337.23	3.2259	0.001360	1306.10	1333.29	3.2071
320	0.001472	1431.05	1453.13	3.4246	0.001444	1415.66	1444.53	3.3978
340	0.001631	1567.42	1591.88	3.6545	0.001568	1539.64	1571.01	3.6074
360	-	-	-	-	0.001823	1702.78	1739.23	3.8770
	30000 kPa				50000 kPa			
0	0.000986	0.25	29.82	0.0001	0.000977	0.20	49.03	-0.0014
20	0.000989	82.16	111.82	0.2898	0.000980	80.98	130.00	0.2847
40	0.000995	164.01	193.87	0.5606	0.000987	161.84	211.20	0.5526
60	0.001004	246.03	276.16	0.8153	0.000996	242.96	292.77	0.8051
80	0.001016	328.28	358.75	1.0561	0.001007	324.32	374.68	1.0439
100	0.001029	410.76	441.63	1.2844	0.001020	405.86	456.87	1.2703
120	0.001044	493.58	524.91	1.5017	0.001035	487.63	539.37	1.4857
140	0.001062	576.86	608.73	1.7097	0.001052	569.76	622.33	1.6915
160	0.001082	660.81	693.27	1.9095	0.001070	652.39	705.91	1.8890
180	0.001105	745.57	778.71	2.1024	0.001091	735.68	790.24	2.0793
200	0.001130	831.34	865.24	2.2892	0.001115	819.73	875.46	2.2634
220	0.001159	918.32	953.09	2.4710	0.001141	904.67	961.71	2.4419
240	0.001192	1006.84	1042.60	2.6489	0.001170	990.69	1049.20	2.6158
260	0.001230	1097.38	1134.29	2.8242	0.001203	1078.06	1138.23	2.7860
280	0.001275	1190.69	1228.96	2.9985	0.001242	1167.19	1229.26	2.9536
300	0.001330	1287.89	1327.80	3.1740	0.001286	1258.66	1322.95	3.1200
320	0.001400	1390.64	1432.63	3.3538	0.001339	1353.23	1420.17	3.2867
340	0.001492	1501.71	1546.47	3.5425	0.001403	1451.91	1522.07	3.4556
360	0.001627	1626.57	1675.36	3.7492	0.001484	1555.97	1630.16	3.6290
380	0.001869	1781.35	1837.43	4.0010	0.001588	1667.13	1746.54	3.8100
0	0.000986	0.25	29.82	0.0001	0.000977	0.20	49.03	-0.0014

جدول ب-۴. آب جامد اشباع

		حجم مخصوص، m^3/kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
$(^{\circ}C)$	(kPa)	v_f	$v_{f,g}$	v_g	u_f	$u_{f,g}$	u_g
0.01	0.6113	0.0010908	206.152	206.153	-333.40	2708.7	2375.3
0	0.6108	0.0010908	206.314	206.315	-333.42	2708.7	2375.3
-2	0.5177	0.0010905	241.662	241.663	-337.61	2710.2	2372.5
-4	0.4376	0.0010901	283.798	283.799	-341.78	2711.5	2369.8
-6	0.3689	0.0010898	334.138	334.139	-345.91	2712.9	2367.0
-8	0.3102	0.0010894	394.413	394.413	-350.02	2714.2	2364.2
-10	0.2601	0.0010891	466.756	466.757	-354.09	2715.5	2361.4
-12	0.2176	0.0010888	553.802	553.803	-358.14	2716.8	2358.7
-14	0.1815	0.0010884	658.824	658.824	-362.16	2718.0	2355.9
-16	0.1510	0.0010881	785.906	785.907	-366.14	2719.2	2353.1
-18	0.1252	0.0010878	940.182	940.183	-370.10	2720.4	2350.3
-20	0.10355	0.0010874	1128.112	1128.113	-374.03	2721.6	2347.5
-22	0.08535	0.0010871	1357.863	1357.864	-377.93	2722.7	2344.7
-24	0.07012	0.0010868	1639.752	1639.753	-381.80	2723.7	2342.0
-26	0.05741	0.0010864	1986.775	1986.776	-385.64	2724.8	2339.2
-28	0.04684	0.0010861	2415.200	2415.201	-389.45	2725.8	2336.4
-30	0.03810	0.0010854	2945.227	2945.228	-393.23	2726.8	2333.6
-32	0.03090	0.0010854	3601.822	3601.823	-396.98	2727.8	2330.8
-34	0.02499	0.0010851	4416.252	4416.253	-400.71	2728.7	2328.0
-36	0.02016	0.0010848	5430.115	5430.116	-404.40	2729.6	2325.2
-38	0.01618	0.0010844	6707.021	6707.022	-408.06	2730.5	2322.4
-40	0.01286	0.0010841	8366.395	8366.396	-411.70	2731.3	2319.6

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، $kJ/kg-K$		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
$(^{\circ}C)$	(kPa)	h_f	$h_{f,g}$	h_g	h_f	$h_{f,g}$	h_g
0.01	0.6113	-333.40	2834.7	2501.3	-1.2210	10.3772	9.1562
0	0.6108	-333.42	2834.8	2501.3	-1.2211	10.3776	9.1565
-2	0.5177	-337.61	2835.3	2497.6	-1.2369	10.4562	9.2193
-4	0.4376	-341.78	2835.7	2494.0	-1.2526	10.5358	9.2832
-6	0.3689	-345.91	2836.2	2490.3	-1.2683	10.6165	9.3482
-8	0.3102	-350.02	2836.6	2486.6	-1.2839	10.6982	9.4143
-10	0.2601	-354.09	2837.0	2482.9	-1.2995	10.7809	9.4815
-12	0.2176	-358.14	2837.3	2479.2	-1.3150	10.8648	9.5498
-14	0.1815	-362.16	2837.6	2475.5	-1.3306	10.9498	9.6192
-16	0.1510	-366.14	2837.9	2471.8	-1.3461	11.0359	9.6898
-18	0.1252	-370.10	2838.2	2468.1	-1.3617	11.1233	9.7616
-20	0.10355	-374.03	2838.4	2464.3	-1.3772	11.2120	9.8348
-22	0.08535	-377.93	2838.6	2460.6	-1.3928	11.3020	9.9093
-24	0.07012	-381.80	2838.7	2456.9	-1.4083	11.3935	9.9852
-26	0.05741	-385.64	2838.9	2453.2	-1.4239	11.4864	10.0625
-28	0.04684	-389.45	2839.0	2449.5	-1.4394	11.5808	10.1413
-30	0.03810	-393.23	2839.0	2445.8	-1.4550	11.6765	10.2215
-32	0.03090	-396.98	2839.1	2442.1	-1.4705	11.7733	10.3028
-34	0.02499	-400.71	2839.1	2438.4	-1.4860	11.8713	10.3853
-36	0.02016	-404.40	2839.1	2434.7	-1.5014	11.9704	10.4690
-38	0.01618	-408.06	2839.0	2431.0	-1.5168	12.0714	10.5546
-40	0.01286	-411.70	2838.9	2427.2	-1.5321	12.1768	10.6447

جداول سری ب (خواص ترمودینامیکی آمونیاک)

جدول ب-۵. آمونیاک اشباع

		حجم مخصوص، m^3/kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
$(^\circ\text{C})$	(kPa)	v_f	v_{fg}	v_g	u_f	u_{fg}	u_g
-50	40.9	0.001424	2.62557	2.62700	-43.82	1309.1	1265.2
-45	54.5	0.001437	2.00489	2.00632	-22.01	1293.5	1271.4
-40	71.7	0.001450	1.55111	1.55256	-0.10	1277.6	1277.4
-35	93.2	0.001463	1.21466	1.21613	21.93	1261.3	1283.3
-30	119.5	0.001476	0.96192	0.96339	44.08	1244.8	1288.9
-25	151.6	0.001490	0.76970	0.77119	66.36	1227.9	1294.3
-20	190.2	0.001504	0.62184	0.62334	88.76	1210.7	1299.5
-15	236.3	0.001519	0.50686	0.50838	111.30	1193.2	1304.5
-10	290.9	0.001534	0.41655	0.41808	133.96	1175.2	1309.2
-5	354.9	0.001550	0.34493	0.34648	156.76	1157.0	1313.7
0	429.6	0.001566	0.28763	0.28920	179.69	1138.3	1318.0
5	515.9	0.001583	0.24140	0.24299	202.77	1119.2	1322.0
10	615.2	0.001600	0.20381	0.20541	225.99	1099.7	1325.7
15	728.6	0.001619	0.17300	0.17462	249.36	1079.7	1329.1
20	857.5	0.001638	0.14758	0.14922	272.89	1059.3	1332.2
25	1003.2	0.001658	0.12647	0.12813	296.59	1038.4	1335.0
30	1167.0	0.001680	0.10881	0.11049	320.46	1016.9	1337.4
35	1350.4	0.001702	0.09397	0.09567	344.50	994.9	1339.4
40	1554.9	0.001725	0.08141	0.08313	368.74	972.2	1341.0
45	1782.0	0.001750	0.07073	0.07248	393.19	948.9	1342.1
50	2033.1	0.001777	0.06159	0.06337	417.87	924.8	1342.7
55	2310.1	0.001804	0.05375	0.05555	442.79	899.9	1342.7
60	2614.4	0.001834	0.04697	0.04880	467.99	874.2	1342.1
65	2947.8	0.001866	0.04109	0.04296	493.51	847.4	1340.9
70	3312.0	0.001900	0.03597	0.03787	519.39	819.5	1338.9
75	3709.0	0.001937	0.03148	0.03341	545.70	790.4	1336.1
80	4140.5	0.001978	0.02753	0.02951	572.50	759.9	1332.4
85	4608.6	0.002022	0.02404	0.02606	599.90	727.8	1327.7
90	5115.3	0.002071	0.02093	0.02300	627.99	693.7	1321.7
95	5662.9	0.002126	0.01815	0.02028	656.95	657.4	1314.4
100	6253.7	0.002188	0.01565	0.01784	686.96	618.4	1305.3
105	6890.4	0.002261	0.01337	0.01564	718.30	575.9	1294.2
110	7575.7	0.002347	0.01128	0.01363	751.37	529.1	1280.5
115	8313.3	0.002452	0.00933	0.01178	786.82	476.2	1263.1
120	9107.2	0.002589	0.00744	0.01003	825.77	414.5	1240.3
125	9963.5	0.002783	0.00554	0.00833	870.69	337.7	1208.4
130	10891.6	0.003122	0.00337	0.00649	929.29	226.9	1156.2
132.3	11333.2	0.004255	0	0.00426	1037.62	0	1037.6

جدول ب-۵. آمونیاک اشباع (ادامه)

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، kJ/kg-K		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(°C)	(kPa)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
-50	40.9	-43.76	1416.3	1372.6	-0.1916	6.3470	6.1554
-45	54.5	-21.94	1402.8	1380.8	-0.0950	6.1484	6.0534
-40	71.7	0	1388.8	1388.8	0	5.9567	5.9567
-35	93.2	22.06	1374.5	1396.5	0.0935	5.7715	5.8650
-30	119.5	44.26	1359.8	1404.0	0.1856	5.5922	5.7778
-25	151.6	66.58	1344.6	1411.2	0.2763	5.4185	5.6947
-20	190.2	89.05	1329.0	1418.0	0.3657	5.2498	5.6155
-15	236.3	111.66	1312.9	1424.6	0.4538	5.0859	5.5397
-10	290.9	134.41	1296.4	1430.1	0.5408	4.9265	5.4673
-5	354.9	157.31	1279.4	1436.7	0.6266	4.7711	5.3977
0	429.6	180.36	1261.8	1442.2	0.7114	4.6195	5.3309
5	515.9	203.58	1243.7	1447.3	0.7951	4.4715	5.2666
10	615.2	226.97	1225.1	1452.0	0.8779	4.3266	5.2045
15	728.6	250.54	1205.8	1456.3	0.9598	4.1846	5.1444
20	857.5	274.30	1185.9	1460.2	1.0408	4.0452	5.0860
25	1003.2	298.25	1165.2	1463.5	1.1210	3.9083	5.0293
30	1167.0	322.42	1143.9	1466.3	1.2005	3.7734	4.9738
35	1350.4	346.80	1121.8	1468.6	1.2792	3.6403	4.9196
40	1554.9	371.43	1098.8	1470.2	1.3574	3.5088	4.8662
45	1782.0	396.31	1074.9	1471.2	1.4350	3.3786	4.8136
50	2033.1	421.48	1050.0	1471.5	1.5121	3.2493	4.7614
55	2310.1	446.96	1024.1	1471.0	1.5888	3.1208	4.7095
60	2614.4	472.79	997.0	1469.7	1.6652	2.9925	4.6577
65	2947.8	499.01	968.5	1467.5	1.7415	2.8642	4.6057
70	3312.0	525.69	938.7	1464.4	1.8178	2.7354	4.5533
75	3709.0	552.88	907.2	1460.1	1.8943	2.6058	4.5001
80	4140.5	580.69	873.9	1454.6	1.9712	2.4746	4.4458
85	4608.6	609.21	838.6	1447.8	2.0488	2.3413	4.3901
90	5115.3	638.59	800.8	1439.4	2.1273	2.2051	4.3325
95	5662.9	668.99	760.2	1429.2	2.2073	2.0650	4.2723
100	6253.7	700.64	716.2	1416.9	2.2893	1.9195	4.2088
105	6890.4	733.87	668.1	1402.0	2.3740	1.7667	4.1407
110	7575.7	769.15	614.6	1383.7	2.4625	1.6040	4.0665
115	8313.3	807.21	553.8	1361.0	2.5566	1.4267	3.9833
120	9107.2	849.36	482.3	1331.7	2.6593	1.2268	3.8861
125	9963.5	898.42	393.0	1291.4	2.7775	0.9870	3.7645
130	1089.2	963.29	263.7	1227.0	2.9326	0.6540	3.5866
132.3	1133.3	1085.85	0	1085.9	3.2316	0	3.2316

جدول ب-۶. آمونیاک فوق گرم

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ / kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	50 kPa (-46.53)				100 kPa (-33.60)			
Sat.	2.1752	1269.6	1378.3	6.0839	1.1381	1284.9	1398.7	5.8401
-30	2.3447	1296.2	1413.4	6.2333	1.1573	1291.0	1406.7	5.8734
-20	2.4463	1312.3	1434.6	6.3187	1.2101	1307.8	1428.8	5.9626
-10	2.5471	1328.4	1455.7	6.4006	1.2621	1324.6	1450.8	6.0477
0	2.6474	1344.5	1476.9	6.4795	1.3136	1341.3	1472.6	6.1291
10	2.7472	1360.7	1498.1	6.5556	1.3647	1357.9	1494.4	6.2073
20	2.8466	1377.0	1519.3	6.6293	1.4153	1374.5	1516.1	6.2826
30	2.9458	1393.3	1540.6	6.7008	1.4657	1391.2	1537.7	6.3553
40	3.0447	1409.8	1562.0	6.7703	1.5158	1407.9	1559.5	6.4258
50	3.1435	1426.3	1583.5	6.8379	1.5658	1424.7	1581.2	6.4943
60	3.2421	1443.0	1605.1	6.9038	1.6156	1441.5	1603.1	6.5609
70	3.3406	1459.9	1626.9	6.9682	1.6653	1458.5	1625.1	6.6258
80	3.4390	1476.9	1648.8	7.0312	1.7148	1475.6	1647.1	6.6892
100	3.6355	1511.4	1693.2	7.1533	1.8137	1510.3	1691.7	6.8120
120	3.8318	1546.6	1738.2	7.2708	1.9124	1545.7	1736.9	6.9300
140	4.0280	1582.5	1783.9	7.3842	2.0109	1581.7	1782.8	7.0439
160	4.2240	1619.2	1830.4	7.4941	2.1093	1618.5	1829.4	7.1540
180	4.4199	1656.7	1877.7	7.6008	2.2075	1656.0	1876.8	7.2609
200	4.6157	1694.9	1925.7	7.7045	2.3057	1694.3	1924.9	7.3648
	150 kPa (-25.22)				200 kPa (-18.86)			
Sat.	0.7787	1294.1	1410.9	5.6983	0.5946	1300.6	1419.6	5.5979
-20	0.7977	1303.3	1422.9	5.7465	-	-	-	-
-10	0.8336	1320.7	1445.7	5.8349	0.6193	1316.7	1440.6	5.6791
0	0.8689	1337.9	1468.3	5.9189	0.6465	1334.5	1463.8	5.7659
10	0.9037	1355.0	1490.6	5.9992	0.6732	1352.1	1486.8	5.8484
20	0.9382	1372.0	1512.8	6.0761	0.6995	1369.5	1509.4	5.9270
30	0.9723	1389.0	1534.9	6.1502	0.7255	1386.8	1531.9	6.0025
40	1.0062	1406.0	1556.9	6.2217	0.7513	1404.0	1554.3	6.0751
50	1.0398	1423.0	1578.9	6.2910	0.7769	1421.3	1576.6	6.1453
60	1.0734	1440.0	1601.0	6.3583	0.8023	1438.5	1598.9	6.2133
70	1.1068	1457.2	1623.2	6.4238	0.8275	1455.8	1621.3	6.2794
80	1.1401	1474.4	1645.4	6.4877	0.8527	1473.1	1643.7	6.3437
100	1.2065	1509.3	1690.2	6.6112	0.9028	1508.2	1688.8	6.4679
120	1.2726	1544.8	1735.6	6.7297	0.9527	1543.8	1734.4	6.5869
140	1.3386	1580.9	1781.7	6.8439	1.0024	1580.1	1780.6	6.7015
160	1.4044	1617.8	1828.4	6.9544	1.0519	1617.0	1827.4	6.8123
180	1.4701	1655.4	1875.9	7.0615	1.1014	1654.7	1875.0	6.9196
200	1.5357	1693.7	1924.1	7.1656	1.1507	1693.2	1923.3	7.0239
220	1.6013	1732.9	1973.1	7.2670	1.2000	1732.4	1972.4	7.1255

جدول ب-۶. آمونیاک فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	300 kPa (-9.24)				400 kPa (-1.89)			
Sat	0.40607	1309.9	1431.7	5.4565	0.30942	1316.4	1440.2	5.3559
0	0.42382	1327.5	1454.7	5.5420	0.31227	1320.2	1445.1	5.3741
10	0.44251	1346.1	1478.9	5.6290	0.32701	1339.9	1470.7	5.4663
20	0.46077	1364.4	1502.6	5.7113	0.34129	1359.1	1495.6	5.5525
30	0.47870	1382.3	1526.0	5.7896	0.35520	1377.7	1519.8	5.6338
40	0.49636	1400.1	1549.0	5.8645	0.36884	1396.1	1543.6	5.7111
50	0.51382	1417.8	1571.9	5.9365	0.38226	1414.2	1567.1	5.7850
60	0.53111	1435.4	1594.7	6.0060	0.39550	1432.2	1590.4	5.8560
70	0.54827	1453.0	1617.5	6.0732	0.40860	1450.1	1613.6	5.9244
80	0.56532	1470.6	1640.2	6.1385	0.42160	1468.0	1636.7	5.9907
100	0.59916	1506.1	1685.8	6.2642	0.44732	1503.9	1682.8	6.1179
120	0.63276	1542.0	1731.8	6.3842	0.47279	1540.1	1729.2	6.2390
140	0.66618	1578.5	1778.3	6.4996	0.49808	1576.8	1776.0	6.3552
160	0.69946	1615.6	1825.4	6.6109	0.52323	1614.1	1823.4	6.4671
180	0.73263	1653.4	1873.2	6.7188	0.54827	1652.1	1871.4	6.5755
200	0.76572	1692.0	1921.7	6.8235	0.57321	1690.8	1920.1	6.6806
220	0.79872	1731.3	1970.9	6.9254	0.59809	1730.3	1969.5	6.7828
240	0.83167	1771.4	2020.9	7.0247	0.62289	1770.5	2019.6	6.8825
260	0.86455	1812.2	2071.6	7.1217	0.64764	1811.4	2070.5	6.9797
	500 kPa (4.13)				600 kPa (9.28)			
Sat	0.25035	1321.3	1446.5	5.2776	0.21038	1325.2	1451.4	5.2133
0	0.25757	1333.5	1462.3	5.3340	0.21115	1326.7	1453.4	5.2205
10	0.26949	1353.6	1488.3	5.4244	0.22154	1347.9	1480.8	5.3156
20	0.28103	1373.0	1513.5	5.5090	0.23152	1368.2	1507.1	5.4037
30	0.29227	1392.0	1538.1	5.5889	0.24118	1387.8	1532.5	5.4862
40	0.30328	1410.6	1562.2	5.6647	0.25059	1406.9	1557.3	5.5641
50	0.31410	1429.0	1586.1	5.7373	0.25981	1425.7	1581.6	5.6383
60	0.32478	1447.3	1609.6	5.8070	0.26888	1444.3	1605.7	5.7094
70	0.33535	1465.4	1633.1	5.8744	0.27783	1462.8	1629.5	5.7778
80	0.35621	1501.7	1679.8	6.0031	0.29545	1499.5	1676.8	5.9081
100	0.37681	1538.2	1726.6	6.1253	0.31281	1536.3	1724.0	6.0314
120	0.39722	1575.2	1773.8	6.2422	0.32997	1573.5	1771.5	6.1491
140	0.41748	1612.7	1821.4	6.3548	0.34699	1611.2	1819.4	6.2623
160	0.43764	1650.8	1869.6	6.4636	0.36389	1649.5	1867.8	6.3717
180	0.45771	1689.6	1918.5	6.5691	0.38071	1688.5	1916.9	6.4776
200	0.47770	1729.2	1968.1	6.6717	0.39745	1728.2	1966.6	6.5806
220	0.25035	1321.3	1446.5	5.2776	0.21038	1325.2	1451.4	5.2133
240	0.49763	1769.5	2018.3	6.7717	0.41412	1768.6	2017.0	6.6808
260	0.51749	1810.6	2069.3	6.8692	0.43073	1809.8	2068.2	6.7786

جدول ب-۶. آمونیاک فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	800 kPa (17.85)				1000 kPa (24.90)			
Sat.	0.15958	1330.9	1458.6	5.1110	0.12852	1334.9	1463.4	5.0304
20	0.16138	1335.8	1464.9	5.1328	-	-	-	-
30	0.16947	1358.0	1493.5	5.2287	0.13206	1347.1	1479.1	5.0826
40	0.17720	1379.0	1520.8	5.3171	0.13868	1369.8	1508.5	5.1778
50	0.18465	1399.3	1547.0	5.3996	0.14499	1391.3	1536.3	5.2654
60	0.19189	1419.0	1572.5	5.4774	0.15106	1412.1	1563.1	5.3471
70	0.19896	1438.3	1597.5	5.5513	0.15695	1432.2	1589.1	5.4240
80	0.20590	1457.4	1622.1	5.6219	0.16270	1451.9	1614.6	5.4971
100	0.21949	1495.0	1670.6	5.7555	0.17389	1490.5	1664.3	5.6342
120	0.23280	1532.5	1718.7	5.8811	0.18477	1528.6	1713.4	5.7622
140	0.24590	1570.1	1766.9	6.0006	0.19545	1566.8	1762.2	5.8834
160	0.25886	1608.2	1815.3	6.1150	0.20597	1605.2	1811.2	5.9992
180	0.27170	1646.8	1864.2	6.2254	0.21638	1644.2	1860.5	6.1105
200	0.28445	1686.1	1913.6	6.3322	0.22669	1683.7	1910.4	6.2182
220	0.29712	1726.0	1963.7	6.4358	0.23693	1723.9	1960.8	6.3226
240	0.30973	1766.7	2014.5	6.5367	0.24710	1764.8	2011.9	6.4241
260	0.32228	1808.1	2065.9	6.6350	0.25720	1806.4	2063.6	6.5229
280	0.33477	1850.2	2118.0	6.7310	0.26726	1848.8	2116.0	6.6194
300	0.34722	1893.1	2170.9	6.8248	0.27726	1891.8	2169.1	6.7137
	1200 kPa (30.94)				1400 kPa (36.26)			
Sat.	0.10751	1337.8	1466.8	4.9635	0.09231	1339.8	1469.0	4.9060
40	0.11287	1360.0	1495.4	5.0564	0.09432	1349.5	1481.6	4.9463
50	0.11846	1383.0	1525.1	5.1497	0.09942	1374.2	1513.4	5.0462
60	0.12378	1404.8	1553.3	5.2357	0.10423	1397.2	1543.1	5.1370
70	0.12890	1425.8	1580.5	5.3159	0.10882	1419.2	1571.5	5.2209
80	0.13387	1446.2	1606.8	5.3916	0.11324	1440.3	1598.8	5.2994
100	0.14347	1485.8	1658.0	5.5325	0.12172	1481.0	1651.4	5.4443
120	0.15275	1524.7	1708.0	5.6631	0.12986	1520.7	1702.5	5.5775
140	0.16181	1563.3	1757.5	5.7860	0.13777	1559.9	1752.8	5.7023
160	0.17071	1602.2	1807.1	5.9031	0.14552	1599.2	1802.9	5.8208
180	0.17950	1641.5	1856.9	6.0156	0.15315	1638.8	1853.2	5.9343
200	0.18819	1681.3	1907.1	6.1241	0.16068	1678.9	1903.8	6.0437
220	0.19680	1721.8	1957.9	6.2292	0.16813	1719.6	1955.0	6.1495
240	0.20534	1762.9	2009.3	6.3313	0.17551	1761.0	2006.7	6.2523
260	0.21382	1804.7	2061.3	6.4308	0.18283	1803.0	2059.0	6.3523
280	0.22225	1847.3	2114.0	6.5278	0.19010	1845.8	2111.9	6.4498
300	0.23063	1890.6	2167.3	6.6225	0.19732	1889.3	2165.5	6.5450
320	0.23897	1934.6	2221.3	6.7151	0.20450	1933.5	2219.8	6.6380

جدول ب-۶. آمونیاک فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	1600 kPa(41.03l)				2000 kPa (49.37)			
Sat.	0.08079	1341.2	1470.5	4.8553	0.06444	1342.6	1471.5	4.7680
50	0.08506	1364.9	1501.0	4.9510	0.06471	1344.5	1473.9	4.7754
60	0.08951	1389.3	1532.5	5.0472	0.06875	1372.3	1509.8	4.8848
70	0.09372	1412.3	1562.3	5.1351	0.07246	1397.8	1542.7	4.9821
80	0.09774	1434.3	1590.6	5.2167	0.07595	1421.6	1573.5	5.0707
100	0.10539	1476.2	1644.8	5.3659	0.08248	1466.1	1631.1	5.2294
200	0.11268	1516.6	1696.9	5.5018	0.08861	1508.3	1685.5	5.3714
140	0.11974	1556.4	1748.0	5.6286	0.09447	1549.3	1738.2	5.5022
160	0.12662	1596.1	1798.7	5.7485	0.10016	1589.9	1790.2	5.6251
180	0.13339	1636.1	1849.5	5.8631	0.10571	1630.6	1842.0	5.7420
200	0.14005	1676.5	1900.5	5.9734	0.11116	1671.6	1893.9	5.8540
220	0.14663	1717.4	1952.0	6.0800	0.11652	1713.1	1946.1	5.9621
240	0.15314	1759.0	2004.1	6.1834	0.12182	1755.2	1998.8	6.0668
260	0.15959	1801.3	2056.7	6.2839	0.12705	1797.9	2052.0	6.1685
280	0.16599	1844.3	2109.9	6.3819	0.13224	1841.3	2105.8	6.2675
300	0.17234	1888.0	2163.7	6.4775	0.13737	1885.4	2160.1	6.3641
320	0.17865	1932.4	2218.2	6.5710	0.14246	1930.2	2215.1	6.4583
340	0.18492	1977.5	2273.4	6.6624	0.14751	1975.6	2270.7	6.5505
360	0.19115	2023.3	2329.1	6.7519	0.15253	2021.8	2326.8	6.6406
	5000 kPa (88.90)				10000 kPa (125.20)			
Sat.	0.02365	1323.2	1441.4	4.3454	0.00826	1206.8	1289.4	3.7587
100	0.02636	1369.7	1501.5	4.5091	-	-	-	-
120	0.03024	1435.1	1586.3	4.7306	-	-	-	-
140	0.03350	1489.8	1657.3	4.9068	0.01195	1341.8	1461.3	4.1839
160	0.03643	1539.5	1721.7	5.0591	0.01461	1432.2	1578.3	4.4610
180	0.03916	1586.9	1782.7	5.1968	0.01666	1500.6	1667.2	4.6617
200	0.04174	1633.1	1841.8	5.3245	0.01842	1560.3	1744.5	4.8287
220	0.04422	1678.9	1900.0	5.4450	0.02001	1615.8	1816.0	4.9767
240	0.04662	1724.8	1957.9	5.5600	0.02150	1669.2	1884.2	5.1123
260	0.04895	1770.9	2015.6	5.6704	0.02290	1721.6	1950.6	5.2392
280	0.05123	1817.4	2073.6	5.7771	0.02424	1773.6	2015.9	5.3596
300	0.05346	1864.5	2131.8	5.8805	0.02552	1825.5	2080.7	5.4746
320	0.05565	1912.1	2190.3	5.9809	0.02676	1877.6	2145.2	5.5852
340	0.05779	1960.3	2249.2	6.0786	0.02796	1930.0	2209.6	5.6921
360	0.05990	2009.1	2308.6	6.1738	0.02913	1982.8	2274.1	5.7955
380	0.06198	2058.5	2368.4	6.2668	0.03026	2036.1	2338.7	5.8960
400	0.06403	2108.4	2428.6	6.3576	0.03137	2089.8	2403.5	5.9937
420	0.06606	2159.0	2489.3	6.4464	0.03245	2143.9	2468.5	6.0888
440	0.06806	2210.1	2550.4	6.5334	0.03351	2198.5	2533.7	6.1815

جداول سری ب (خواص ترمودینامیکی R-12)

جدول ب-۶. R-12 اشباع

		حجم مخصوص، m^3/kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
($^{\circ}\text{C}$)	(kPa)	v_f	v_{fg}	v_g	u_f	u_{fg}	u_g
-90	2.8	0.000608	4.41494	4.41555	-43.29	177.20	133.91
-80	6.2	0.000617	2.13773	2.13835	-34.73	172.54	137.82
-70	12.3	0.000627	1.12665	1.12728	-26.14	167.94	141.81
-60	22.6	0.000637	0.63727	0.63791	-17.50	163.36	145.86
-50	39.1	0.000648	0.38246	0.38310	-8.80	158.76	149.95
-45	50.4	0.000654	0.30203	0.30268	-4.43	156.44	152.01
-40	64.2	0.000659	0.24125	0.24191	-0.04	154.11	154.07
-35	80.7	0.000666	0.19473	0.19540	4.37	151.77	156.13
-30	100.4	0.000672	0.15870	0.15937	8.79	149.40	158.19
-29.8	101.3	0.000672	0.15736	0.15803	8.98	149.30	158.28
-25	123.7	0.000679	0.13049	0.13117	13.24	147.01	160.25
-20	150.9	0.000685	0.10816	0.10885	17.71	144.59	162.31
-15	182.6	0.000693	0.09033	0.09102	22.20	142.15	164.35
-10	219.1	0.000700	0.07595	0.07665	26.72	139.67	166.39
-5	261.0	0.000708	0.06426	0.06496	31.26	137.16	168.42
0	308.6	0.000716	0.05467	0.05539	35.83	134.61	170.44
5	362.6	0.000724	0.04676	0.04749	40.43	132.01	172.44
10	423.3	0.000733	0.04018	0.04091	45.06	129.36	174.42
15	491.4	0.000743	0.03467	0.03541	49.73	126.65	176.38
20	567.3	0.000752	0.03003	0.03078	54.45	123.87	178.32
25	651.6	0.000763	0.02609	0.02685	59.21	121.03	180.23
30	744.9	0.000774	0.02273	0.02351	64.02	118.09	182.11
35	847.7	0.000786	0.01986	0.02064	68.88	115.06	183.95
40	960.7	0.000798	0.01737	0.01817	73.82	111.92	185.74
45	1084.3	0.000811	0.01522	0.01603	78.83	108.66	187.49
50	1219.3	0.000826	0.01334	0.01417	83.93	105.24	189.17
55	1366.3	0.000841	0.01170	0.01254	89.12	101.66	190.78
60	1525.9	0.000858	0.01025	0.01111	94.43	97.88	192.31
65	1698.8	0.000877	0.00897	0.00985	99.87	93.86	193.73
70	1885.8	0.000897	0.00783	0.00873	105.46	89.56	195.03
75	2087.5	0.000920	0.00680	0.00772	111.23	84.94	196.17
80	2304.6	0.000946	0.00588	0.00682	117.21	79.90	197.11
85	2538.0	0.000976	0.00503	0.00600	123.45	74.34	197.80
90	2788.5	0.001012	0.00425	0.00526	130.02	68.12	198.14
95	3056.9	0.001056	0.00351	0.00456	137.01	60.98	197.99
100	3344.1	0.001113	0.00279	0.00390	144.59	52.48	197.07
105	3650.9	0.001197	0.00205	0.00324	153.15	41.58	194.73
110	3978.5	0.001364	0.00110	0.00246	164.12	24.08	188.20
112.0	4116.8	0.001792	0	0.00179	176.06	0	176.06

جدول ب-۶. R-12 اشباع (ادامه)

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، kJ/kg-K		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(°C)	(kPa)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
-90	2.8	-43.28	189.75	146.46	-0.2086	1.0359	0.8273
-80	6.2	-34.72	185.74	151.02	-0.1631	0.9616	0.7484
-70	12.3	-26.13	181.76	155.64	-0.1198	0.8947	0.7749
-60	22.6	-17.49	177.77	160.29	-0.0783	0.8340	0.7557
-50	39.1	-8.78	173.73	164.95	-0.0384	0.7785	0.7401
-45	50.4	-4.40	171.68	167.28	-0.0190	0.7524	0.7334
-40	64.2	0	169.59	169.59	0	0.7274	0.7274
-35	80.7	4.42	167.48	171.90	0.0187	0.7032	0.7219
-30	100.4	8.86	165.34	174.20	0.0371	0.6799	0.7170
-29.8	101.3	9.05	165.24	174.29	0.0379	0.6790	0.7168
-25	123.7	13.33	163.15	176.48	0.0552	0.6574	0.7126
-20	150.9	17.82	160.92	178.74	0.0731	0.6356	0.7087
-15	182.6	22.33	158.64	180.97	0.0906	0.6145	0.7051
-10	219.1	26.87	156.31	183.19	0.1080	0.5940	0.7019
-5	261.0	31.45	153.93	185.37	0.1251	0.5740	0.6991
0	308.6	36.05	151.48	187.53	0.1420	0.5545	0.6965
5	362.6	40.69	148.96	189.65	0.1587	0.5355	0.6942
10	423.3	45.37	146.37	191.74	0.1752	0.5169	0.6921
15	491.4	50.10	143.68	193.78	0.1915	0.4986	0.6902
20	567.3	54.87	140.91	195.87	0.2078	0.4806	0.6884
25	651.6	59.70	138.03	197.73	0.2239	0.4629	0.6868
30	744.9	64.59	135.03	199.62	0.2399	0.4454	0.6853
35	847.7	69.55	131.90	201.45	0.2559	0.4280	0.6839
40	960.7	74.59	128.61	203.20	0.2718	0.4107	0.6825
45	1084.3	79.71	125.16	204.87	0.2877	0.3934	0.6811
50	1219.3	84.94	121.51	206.45	0.3037	0.3760	0.6797
55	1366.3	90.27	117.65	207.92	0.3197	0.3585	0.6782
60	1525.9	95.74	113.52	209.26	0.3358	0.3407	0.6765
65	1698.8	101.36	109.10	210.46	0.3521	0.3226	0.6747
70	1885.8	107.15	104.33	211.48	0.3686	0.3040	0.6726
75	2087.5	113.15	99.14	212.29	0.3854	0.2847	0.6702
80	2304.6	119.39	93.44	212.83	0.4027	0.2646	0.6672
85	2538.0	125.93	87.11	213.04	0.4204	0.2432	0.6636
90	2788.5	132.84	79.96	212.80	0.4389	0.2202	0.6590
95	3056.9	140.23	71.71	211.94	0.4583	0.1948	0.6531
100	3344.1	148.31	61.81	210.12	0.4793	0.1656	0.6449
105	3650.9	157.52	49.05	206.57	0.5028	0.1297	0.6325
110	3978.5	169.55	28.44	197.99	0.5333	0.0742	0.6076
112.0	4116.8	183.43	0	183.43	0.5689	0	0.5689

جدول ب-٧. R-12 فوق گرم

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	50 kPa (-45.18)				100 kPa (-33.10)			
Sat.	0.30515	151.94	167.19	0.7336	0.15999	158.15	174.15	0.7171
-30	0.32738	159.18	175.55	0.7691	0.16006	158.20	174.21	0.7174
-20	0.34186	164.08	181.17	0.7917	0.16770	163.22	179.99	0.7406
-10	0.35623	169.08	186.89	0.8139	0.17522	168.32	185.84	0.7633
0	0.37051	174.18	192.70	0.8356	0.18265	173.50	191.77	0.7854
10	0.38472	179.38	198.61	0.8568	0.18999	178.77	197.77	0.8070
20	0.39886	184.67	204.62	0.8776	0.19728	184.13	203.85	0.8281
30	0.41296	190.06	210.71	0.8981	0.20451	189.57	210.02	0.8488
40	0.42701	195.54	216.89	0.9181	0.21169	195.09	216.26	0.8691
50	0.44103	201.11	223.16	0.9378	0.21884	200.70	222.58	0.8889
60	0.45502	206.76	229.51	0.9572	0.22596	206.39	228.98	0.9084
70	0.46898	212.50	235.95	0.9762	0.23305	212.15	235.46	0.9276
80	0.48292	218.31	242.46	0.9949	0.24011	218.00	242.01	0.9464
90	0.49684	224.21	249.05	1.0133	0.24716	223.91	248.63	0.9649
100	0.51074	230.18	255.71	1.0314	0.25419	229.90	255.32	0.9831
110	0.52463	236.22	262.45	1.0493	0.26121	235.96	262.08	1.0009
120	0.53851	242.33	269.26	1.0668	0.26821	242.09	268.91	1.0185
	200 kPa (-12.53)				400 kPa (-8.15)			
Sat.	0.08354	165.36	182.07	0.7035	0.04321	173.69	190.97	0.6928
0	0.08861	172.08	189.80	0.7325				
10	0.09255	177.51	196.02	0.7548	0.04363	174.76	192.21	0.6972
20	0.09642	183.00	202.28	0.7766	0.04584	180.57	198.91	0.7204
30	0.10023	188.55	208.60	0.7978	0.04797	186.39	205.58	0.7428
40	0.10399	194.17	214.97	0.8184	0.05005	192.23	212.25	0.7645
50	0.10771	199.86	221.41	0.8387	0.05207	198.11	218.94	0.7855
60	0.11140	205.62	227.90	0.8585	0.05406	204.03	225.65	0.8060
70	0.11506	211.45	234.46	0.8779	0.05601	209.99	232.40	0.8259
80	0.11869	217.35	241.09	0.8969	0.05794	216.01	239.19	0.8454
90	0.12230	223.31	247.77	0.9156	0.05985	222.08	246.02	0.8645
100	0.12590	229.34	254.53	0.9339	0.06173	228.20	252.89	0.8831
110	0.12948	235.44	261.34	0.9519	0.06360	234.37	259.81	0.9015
120	0.13305	241.60	268.21	0.9696	0.06546	240.60	266.79	0.9194
130	0.13661	247.82	275.15	0.9870	0.06730	246.89	273.81	0.9370
140	0.14016	254.11	282.14	1.0042	0.06913	253.22	280.88	0.9544
150	0.14370	260.45	289.19	1.0210	0.07095	259.61	287.99	0.9714

جدول ب-۷. R-12 فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	500 kPa (15.60)				1000 kPa (41.64)			
Sat.	0.03482	176.62	194.03	0.6899	0.01744	186.32	203.76	0.6820
30	0.03746	185.23	203.96	0.7235				
40	0.03921	191.20	210.81	0.7457				
50	0.04091	197.19	217.64	0.7672	0.01837	191.95	210.32	0.7026
60	0.04257	203.20	224.48	0.7881	0.01941	198.56	217.97	0.7259
70	0.04418	209.24	231.33	0.8083	0.02040	205.09	225.49	0.7481
80	0.04577	215.32	238.21	0.8281	0.02134	211.57	232.91	0.7695
90	0.04734	221.44	245.11	0.8473	0.02225	218.03	240.28	0.7900
100	0.04889	227.61	252.05	0.8662	0.02313	224.48	247.61	0.8100
110	0.05041	233.83	259.03	0.8847	0.02399	230.94	254.93	0.8293
120	0.05193	240.09	266.06	0.9028	0.02483	237.41	262.25	0.8482
130	0.05343	246.41	273.12	0.9205	0.02566	243.91	269.57	0.8665
140	0.05492	252.77	280.23	0.9379	0.02647	250.43	276.90	0.8845
150	0.05640	259.19	287.39	0.9550	0.02728	256.98	284.26	0.9021
160	0.05788	265.65	294.59	0.9718	0.02807	263.56	291.63	0.9193
170	0.05934	272.16	301.83	0.9884	0.02885	270.18	299.04	0.9362
180	0.06080	278.72	309.12	1.0046	0.02963	276.84	306.47	0.9528
	1500 kPa (59.22)				2000 kPa (72.88)			
Sat.	0.01132	192.08	209.06	0.6768	0.00813	195.70	211.97	0.6713
70	0.01226	200.05	218.44	0.7046	-	-	-	-
80	0.01305	207.16	226.73	0.7284	0.00870	201.61	219.02	0.6914
90	0.01377	214.11	234.77	0.7508	0.00941	209.41	228.23	0.7171
100	0.01446	220.95	242.65	0.7722	0.01003	216.87	236.94	0.7408
110	0.01512	227.73	250.41	0.7928	0.01061	224.11	245.34	0.7630
120	0.01575	234.47	258.10	0.8126	0.01116	231.21	253.53	0.7841
130	0.01636	241.20	265.74	0.8318	0.01168	238.22	261.58	0.8043
140	0.01696	247.91	273.35	0.8504	0.01217	245.18	269.53	0.8238
150	0.01754	254.63	280.94	0.8686	0.01265	252.10	277.41	0.8426
160	0.01811	261.36	288.52	0.8863	0.01312	259.00	285.24	0.8609
170	0.01867	268.10	296.11	0.9036	0.01357	265.90	293.04	0.8787
180	0.01922	274.87	303.70	0.9205	0.01401	272.79	300.82	0.8961
190	0.01977	281.65	311.31	0.9371	0.01445	279.69	308.59	0.9131
200	0.02031	288.47	318.93	0.9534	0.01488	286.61	316.36	0.9297
210	0.02084	295.31	326.58	0.9694	0.01530	293.54	324.14	0.9459
220	0.02137	302.19	334.24	0.9851	0.01572	300.49	331.92	0.9619

جداول سری ب (خواص ترمودینامیکی R-12)

جدول ب-۸ R-22 اشباع

		حجم مخصوص، m^3/kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
$(^\circ\text{C})$	(kPa)	v_f	v_{fg}	v_g	u_f	u_{fg}	u_g
-70	20.5	0.000670	0.94027	0.94094	-30.62	230.13	199.51
-65	28.0	0.000676	0.70480	0.70547	-25.68	227.21	201.54
-60	37.5	0.000682	0.53647	0.53715	-20.68	224.25	203.57
-55	49.5	0.000689	0.41414	0.41483	-15.62	221.21	205.59
-50	64.4	0.000695	0.32386	0.32456	-10.50	218.11	207.61
-45	82.7	0.000702	0.25629	0.25699	-5.32	214.94	209.62
-40.8	101.3	0.000708	0.21191	0.21261	-0.87	212.18	211.31
-40	104.9	0.000709	0.20504	0.20575	-0.07	211.68	211.60
-35	131.7	0.000717	0.16568	0.16640	5.23	208.34	213.57
-30	163.5	0.000725	0.13512	0.13584	10.61	204.91	215.52
-25	201.0	0.000733	0.11113	0.11186	16.04	201.39	217.44
-20	244.8	0.000741	0.09210	0.09284	21.55	197.78	219.32
-15	295.7	0.000750	0.07688	0.07763	27.11	194.07	221.18
-10	354.3	0.000759	0.06458	0.06534	32.74	190.25	222.99
-5	421.3	0.000768	0.05457	0.05534	38.44	186.33	224.77
0	497.6	0.000778	0.04636	0.04714	44.20	182.30	226.50
5	583.8	0.000789	0.03957	0.04036	50.03	178.15	228.17
10	680.7	0.000800	0.03391	0.03471	55.92	173.87	229.79
15	789.1	0.000812	0.02918	0.02999	61.88	169.47	231.35
20	909.9	0.000824	0.02518	0.02600	67.92	164.92	232.85
25	1043.9	0.000838	0.02179	0.02262	74.04	160.22	234.26
30	1191.9	0.000852	0.01889	0.01974	80.23	155.35	235.59
35	1354.8	0.000867	0.01640	0.01727	86.53	150.30	236.82
40	1533.5	0.000884	0.01425	0.01514	92.92	145.02	237.94
45	1729.0	0.000902	0.01238	0.01328	99.42	139.50	238.93
50	1942.3	0.000922	0.01075	0.01167	106.06	133.70	239.76
55	2174.4	0.000944	0.00931	0.01025	112.85	127.56	240.41
60	2426.6	0.000969	0.00803	0.00900	119.83	121.01	240.84
65	2699.9	0.000997	0.00689	0.00789	127.04	113.94	240.98
70	2995.9	0.001030	0.00586	0.00689	134.54	106.22	240.76
75	3316.1	0.001069	0.00491	0.00598	142.44	97.61	240.05
80	3662.3	0.001118	0.00403	0.00515	150.92	87.71	238.63
85	4036.8	0.001183	0.00317	0.00436	160.32	75.78	236.10
90	4442.5	0.001282	0.00228	0.00356	171.51	59.90	231.41
95	4883.5	0.001521	0.00103	0.00255	188.93	29.89	218.83
96.0	4969.0	0.001906	0	0.00191	203.07	0	203.07

جدول ب-۸ R-22 اشباع (ادامه)

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، kJ/kg-K		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(°C)	(kPa)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
-70	20.5	-30.61	249.43	218.82	-0.1401	1.2277	1.0876
-65	28.0	-25.66	246.93	221.27	-0.1161	1.1862	1.0701
-60	37.5	-20.65	244.35	223.70	-0.0924	1.1463	1.0540
-55	49.5	-15.59	241.70	226.12	-0.0689	1.1079	1.0390
-50	64.4	-10.46	238.96	228.51	-0.0457	1.0708	1.0251
-45	82.7	-5.26	236.13	230.87	-0.0227	1.0349	1.0122
-40.8	101.3	-0.80	233.65	232.85	-0.0034	1.0053	1.0019
-40	104.9	0	233.20	233.20	0	1.0002	1.0002
-35	131.7	5.33	230.16	235.48	0.0225	0.9664	0.9889
-30	163.5	10.73	227.00	237.73	0.0449	0.9335	0.9784
-25	201.0	16.19	223.73	239.92	0.0670	0.9015	0.9685
-20	244.8	21.73	220.33	242.06	0.0890	0.8703	0.9593
-15	295.7	27.33	216.80	244.13	0.1107	0.8398	0.9505
-10	354.3	33.01	213.13	246.14	0.1324	0.8099	0.9422
-5	421.3	38.76	209.32	248.09	0.1538	0.7806	0.9344
0	497.6	44.59	205.36	249.95	0.1751	0.7518	0.9269
5	583.8	50.49	201.25	251.73	0.1963	0.7235	0.9197
10	680.7	56.46	196.96	253.42	0.2173	0.6956	0.9129
15	789.1	62.52	192.49	255.02	0.2382	0.6680	0.9062
20	909.9	68.67	187.84	256.51	0.2590	0.6407	0.8997
25	1043.9	74.91	182.97	257.88	0.2797	0.6137	0.8934
30	1191.9	81.25	177.87	259.12	0.3004	0.5867	0.8871
35	1354.8	87.70	172.52	260.22	0.3210	0.5598	0.8809
40	1533.5	94.27	166.88	261.15	0.3417	0.5329	0.8746
45	1729.0	100.98	160.91	261.90	0.3624	0.5058	0.8682
50	1942.3	107.85	154.58	262.43	0.3832	0.4783	0.8615
55	2174.4	114.91	147.80	262.71	0.4042	0.4504	0.8546
60	2426.6	122.18	140.50	262.68	0.4255	0.4217	0.8472
65	2699.9	129.73	132.55	262.28	0.4472	0.3920	0.8391
70	2995.9	137.63	123.77	261.40	0.4695	0.3607	0.8302
75	3316.1	145.99	113.90	259.89	0.4927	0.3272	0.8198
80	3662.3	155.01	102.47	257.49	0.5173	0.2902	0.8075
85	4036.8	165.09	88.60	253.69	0.5445	0.2474	0.7918
90	4442.5	177.20	70.04	247.24	0.5767	0.1929	0.7695
95	4883.5	196.36	34.93	231.28	0.6273	0.0949	0.7222
96.0	4969.0	212.54	0	212.54	0.6708	0	0.6708

جدول ب-۹. R-22 فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	50 kPa (-54.80)				100 kPa (-41.03)			
Sat.	0.41077	205.67	226.21	1.0384	0.21525	211.19	232.72	1.0026
-40	0.44063	212.69	234.72	1.0762	0.21633	211.70	233.34	1.0052
-30	0.46064	217.57	240.60	1.1008	0.22675	216.68	239.36	1.0305
-20	0.48054	222.56	246.59	1.1250	0.23706	221.76	245.47	1.0551
-10	0.50036	227.66	252.68	1.1485	0.24728	226.94	251.67	1.0791
0	0.52010	232.87	258.87	1.1717	0.25742	232.21	257.96	1.1026
10	0.53977	238.19	265.18	1.1943	0.26748	237.60	264.35	1.1256
20	0.55939	243.62	271.59	1.2166	0.27750	243.08	270.83	1.1481
30	0.57897	249.17	278.12	1.2385	0.28747	248.67	277.42	1.1702
40	0.59851	254.82	284.74	1.2600	0.29739	254.36	284.10	1.1919
50	0.61801	260.58	291.48	1.2811	0.30729	260.16	290.89	1.2132
60	0.63749	266.44	298.32	1.3020	0.31715	266.06	297.77	1.2342
70	0.65694	272.42	305.26	1.3225	0.32699	272.06	304.76	1.2548
80	0.67636	278.50	312.31	1.3428	0.33680	278.16	311.84	1.2752
90	0.69577	284.68	319.47	1.3627	0.34660	284.37	319.03	1.2952
100	0.71516	290.96	326.72	1.3824	0.35637	290.67	326.31	1.3150
110	0.73454	297.34	334.07	1.4019	0.36614	297.07	333.69	1.3345
	150 kPa (-32.02)				200 kPa (-25.12)			
Sat.	0.14727	214.74	236.83	0.9826	0.11237	217.39	239.87	0.9688
-20	0.15585	220.94	244.32	1.0129	0.11520	220.10	243.14	0.9818
-10	0.16288	226.20	250.63	1.0373	0.12065	225.44	249.57	1.0068
0	0.16982	231.55	257.02	1.0612	0.12600	230.87	256.07	1.0310
10	0.17670	236.99	263.50	1.0844	0.13129	236.38	262.63	1.0546
20	0.18352	242.53	270.06	1.1072	0.13651	241.97	269.27	1.0776
30	0.19028	248.17	276.71	1.1295	0.14168	247.66	275.99	1.1002
40	0.19701	253.90	283.45	1.1514	0.14681	253.43	282.80	1.1222
50	0.20370	259.73	290.29	1.1729	0.15190	259.31	289.69	1.1439
60	0.21036	265.67	297.22	1.1940	0.15696	265.27	296.66	1.1652
70	0.21700	271.70	304.25	1.2148	0.16200	271.33	303.73	1.1861
80	0.22361	277.83	311.37	1.2353	0.16701	277.49	310.89	1.2066
90	0.23020	284.05	318.58	1.2554	0.17200	283.74	318.14	1.2269
100	0.23678	290.38	325.90	1.2753	0.17697	290.09	325.48	1.2468
110	0.24333	296.80	333.30	1.2948	0.18193	296.53	332.91	1.2665
120	0.24988	303.32	340.80	1.3142	0.18688	303.06	340.44	1.2858
130	0.25642	309.93	348.39	1.3332	0.19181	309.69	348.05	1.3050

جدول ب-۹. R-22 فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m³/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	300 kPa (-14.61)				400 kPa (-6.52)			
Sat.	0.07657	221.32	244.29	0.9499	0.05817	224.23	247.50	0.9367
-10	0.07834	223.88	247.38	0.9617				
0	0.08213	229.47	254.10	0.9868	0.06013	228.00	252.05	0.9536
10	0.08583	235.11	260.86	1.0111	0.06306	233.80	259.02	0.9787
20	0.08947	240.83	267.67	1.0347	0.06591	239.64	266.01	1.0029
30	0.09305	246.62	274.53	1.0577	0.06871	245.55	273.03	1.0265
40	0.09659	252.48	281.46	1.0802	0.07146	251.51	280.09	1.0494
50	0.10009	258.43	288.46	1.1022	0.07416	257.54	287.21	1.0717
60	0.10355	264.47	295.54	1.1238	0.07683	263.65	294.39	1.0936
70	0.10699	270.59	302.69	1.1449	0.07947	269.84	301.63	1.1150
80	0.11040	276.80	309.92	1.1657	0.08209	276.11	308.94	1.1361
90	0.11379	283.10	317.24	1.1861	0.08468	282.46	316.33	1.1567
100	0.11716	289.49	324.64	1.2062	0.08725	288.89	323.80	1.1770
110	0.02052	295.97	332.13	1.2260	0.08981	295.41	331.34	1.1969
120	0.12387	302.54	339.70	1.2455	0.09236	302.02	338.96	1.2165
130	0.12720	309.20	347.36	1.2648	0.09489	308.71	346.66	1.2359
140	0.13052	315.95	355.10	1.2837	0.09741	315.48	354.45	1.2550
	500 kPa (0.15)				600 kPa (5.88)			
Sat.	0.04692	226.55	250.00	0.9267	0.03929	228.46	252.04	0.9185
10	0.04936	232.43	257.11	0.9522	0.04018	231.00	255.11	0.9295
20	0.05175	238.42	264.30	0.9772	0.04228	237.15	262.52	0.9552
30	0.05408	244.44	271.48	1.0013	0.04431	243.30	269.89	0.9799
40	0.05636	250.51	278.69	1.0247	0.04628	249.48	277.25	1.0038
50	0.05859	256.63	285.93	1.0474	0.04820	255.70	284.62	1.0270
60	0.06079	262.82	293.22	1.0696	0.05008	261.97	292.02	1.0495
70	0.06295	269.08	300.55	1.0913	0.05193	268.30	299.46	1.0715
80	0.06509	275.40	307.95	1.1126	0.05375	274.69	306.94	1.0930
90	0.06721	281.81	315.41	1.1334	0.05555	281.14	314.48	1.1140
100	0.06930	288.29	322.94	1.1539	0.05733	287.67	322.07	1.1347
110	0.07138	294.85	330.54	1.1740	0.05909	294.27	329.73	1.1549
120	0.07345	301.49	338.21	1.1937	0.06084	300.95	337.46	1.1748
130	0.07550	308.21	345.96	1.2132	0.06258	307.71	345.26	1.1944
140	0.07755	315.02	353.79	1.2324	0.06430	314.54	353.12	1.2137
150	0.07958	321.90	361.69	1.2513	0.06601	321.46	361.07	1.2327
160	0.08160	328.87	369.67	1.2699	0.06772	328.45	369.08	1.2514

جدول ب-۹. R-22 فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	800 kPa (15.47)				1000 kPa (23.42)			
Sat.	0.02958	231.50	255.16	0.9056	0.02364	233.82	257.46	0.8954
20	0.03037	234.44	258.74	0.9179				
30	0.03203	240.91	266.53	0.9440	0.02460	238.31	262.91	0.9136
40	0.03363	247.34	274.24	0.9690	0.02599	245.05	271.04	0.9400
50	0.03518	253.77	281.91	0.9931	0.02732	251.72	279.05	0.9651
60	0.03667	260.21	289.55	1.0164	0.02860	258.37	286.97	0.9893
70	0.03814	266.69	297.20	1.0391	0.02984	265.02	294.86	1.0126
80	0.03957	273.21	304.87	1.0611	0.03104	271.69	302.73	1.0352
90	0.04097	279.79	312.57	1.0826	0.03221	278.39	310.60	1.0572
100	0.04236	286.42	320.30	1.1036	0.03336	285.12	318.49	1.0786
110	0.04373	293.11	328.09	1.1242	0.03449	291.91	326.41	1.0996
120	0.04508	299.86	335.93	1.1444	0.03561	298.75	334.36	1.1200
130	0.04641	306.69	343.82	1.1642	0.03671	305.65	342.36	1.1401
140	0.04774	313.59	351.78	1.1837	0.03780	312.61	350.41	1.1599
150	0.04905	320.56	359.80	1.2029	0.03887	319.64	358.51	1.1792
160	0.05036	327.60	367.89	1.2218	0.03994	326.74	366.68	1.1983
170	0.05166	334.72	376.04	1.2404	0.04100	333.90	374.90	1.2171
	1200 kPa (30.26)				1400 kPa (36.31)			
Sat.	0.01960	235.66	259.10	0.8868	0.01668	237.12	260.48	0.8792
40	0.02085	242.58	267.60	0.9141	0.01712	239.89	263.86	0.8901
50	0.02205	249.55	276.01	0.9405	0.01825	247.22	272.77	0.9181
60	0.02319	256.43	284.26	0.9657	0.01930	254.38	281.40	0.9444
70	0.02428	263.28	292.42	0.9898	0.02029	261.45	289.86	0.9694
80	0.02534	270.10	300.51	1.0131	0.02125	268.45	298.20	0.9934
90	0.02636	276.94	308.57	1.0356	0.02217	275.44	306.47	1.0165
100	0.02736	283.79	316.62	1.0574	0.02306	282.42	314.70	1.0388
110	0.02833	290.68	324.68	1.0788	0.02393	289.42	322.92	1.0606
120	0.02929	297.61	332.76	1.0996	0.02477	296.44	331.13	1.0817
130	0.03024	304.59	340.87	1.1199	0.02561	303.50	339.35	1.1024
140	0.03117	311.62	349.02	1.1399	0.02643	310.61	347.60	1.1226
150	0.03208	318.71	357.21	1.1595	0.02723	317.76	355.89	1.1424
160	0.03299	325.86	365.45	1.1787	0.02803	324.97	364.21	1.1618
170	0.03389	333.07	373.74	1.1977	0.02882	332.23	372.57	1.1809
180	0.03479	340.35	382.09	1.2163	0.02960	339.55	380.99	1.1997
190	0.03567	347.69	390.50	1.2346	0.03037	346.94	389.45	1.2182

جدول ب-۹. R-22 فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	1600 kPa (41.75)				2000 kPa (51.28)			
Sat.	0.01446	238.30	261.43	0.8724	0.01129	239.95	262.53	0.8598
50	0.01535	244.70	269.26	0.8969				
60	0.01635	252.20	278.36	0.9246	0.01213	247.29	271.56	0.8873
70	0.01728	259.52	287.17	0.9507	0.01301	255.29	281.31	0.9161
80	0.01817	266.73	295.80	0.9755	0.01381	263.02	290.64	0.9429
90	0.01901	273.88	304.30	0.9992	0.01456	270.57	299.70	0.9682
100	0.01983	281.00	312.73	1.0221	0.01528	278.02	308.57	0.9923
110	0.02061	288.12	321.10	1.0442	0.01596	285.40	317.32	1.0155
120	0.02138	295.25	329.46	1.0658	0.01662	292.75	325.99	1.0378
130	0.02213	302.39	337.81	1.0867	0.01726	300.09	334.61	1.0594
140	0.02287	309.57	346.16	1.1072	0.01788	307.44	343.20	1.0805
150	0.02359	316.79	354.54	1.1272	0.01849	314.80	351.78	1.1010
160	0.02430	324.06	362.95	1.1469	0.01909	322.19	360.37	1.1211
170	0.02501	331.37	371.39	1.1661	0.01967	329.62	368.97	1.1407
180	0.02570	338.74	379.87	1.1851	0.02025	337.09	377.60	1.1600
190	0.02639	346.17	388.40	1.2037	0.02082	344.61	386.25	1.1788
200	0.02707	353.66	396.97	1.2220	0.02138	352.17	394.94	1.1974
	3000 kPa (70.09)				4000 kPa (84.53)			
Sat.	0.00688	240.75	261.38	0.8300	0.00443	236.40	254.13	0.7935
80	0.00775	251.29	274.53	0.8678				
90	0.00847	260.65	286.04	0.9000	0.00504	245.48	265.63	0.8254
100	0.00910	269.37	296.66	0.9288	0.00580	257.78	281.00	0.8672
110	0.00967	277.72	306.74	0.9555	0.00641	268.13	293.75	0.9009
120	0.01021	285.84	316.47	0.9805	0.00692	277.58	305.27	0.9306
130	0.01072	293.80	325.96	1.0044	0.00739	286.52	316.08	0.9578
140	0.01120	301.67	335.27	1.0272	0.00782	295.14	326.42	0.9831
150	0.01166	309.47	344.47	1.0492	0.00823	303.54	336.45	1.0071
160	0.01211	317.24	353.58	1.0705	0.00861	311.81	346.25	1.0300
170	0.01255	325.00	362.65	1.0912	0.00898	319.97	355.89	1.0520
180	0.01298	332.75	371.68	1.1113	0.00933	328.08	365.41	1.0732
190	0.01339	340.52	380.70	1.1310	0.00968	336.15	375.85	1.0939
200	0.01380	348.31	389.71	1.1502	0.01001	344.20	384.24	1.1139
210	0.01420	356.12	398.73	1.1691	0.01033	352.25	393.59	1.1335
220	0.01460	363.98	407.77	1.1876	0.01065	360.31	402.93	1.1526
230	0.01499	371.87	416.83	1.2058	0.01097	368.38	412.25	1.1713

جداول سری ب (خواص ترمودینامیکی R-134a)

جدول ب-۱۰. R-134a اشباع

		حجم مخصوص، m ³ /kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(°C)	(kPa)	v_f	v_{fg}	v_g	u_f	u_{fg}	u_g
-70	8.3	0.000675	1.97207	1.97274	119.46	218.74	338.20
-65	11.7	0.000679	1.42915	1.42983	123.18	217.76	340.94
-60	16.3	0.000684	1.05199	1.05268	127.52	216.19	343.71
-55	22.2	0.000689	0.78609	0.78678	132.36	214.14	346.50
-50	29.9	0.000695	0.59587	0.59657	137.60	211.71	349.31
-45	39.6	0.000701	0.45783	0.45853	143.15	208.99	352.15
-40	51.8	0.000708	0.35625	0.35696	148.95	206.05	355.00
-35	66.8	0.000715	0.28051	0.28122	154.93	202.93	357.86
-30	85.1	0.000722	0.22330	0.22402	161.06	199.67	360.73
-26.3	101.3	0.000728	0.18947	0.19020	165.73	197.16	362.89
-25	107.2	0.000730	0.17957	0.18030	167.30	196.31	363.61
-20	133.7	0.000738	0.14576	0.14649	173.65	192.85	366.50
-15	165.0	0.000746	0.11932	0.12007	180.07	189.32	369.39
-10	201.7	0.000755	0.09845	0.09921	186.57	185.70	372.27
-5	244.5	0.000764	0.08181	0.08257	193.14	182.01	375.15
0	294.0	0.000773	0.06842	0.06919	199.77	178.24	378.01
5	350.9	0.000783	0.05755	0.05833	206.48	174.38	380.85
10	415.8	0.000794	0.04866	0.04945	213.25	170.42	383.67
15	489.5	0.000805	0.04133	0.04213	220.10	166.35	386.45
20	572.8	0.000817	0.03524	0.03606	227.03	162.16	389.19
25	666.3	0.000829	0.03015	0.03098	234.04	157.83	391.87
30	771.0	0.000843	0.02587	0.02671	241.14	153.34	394.48
35	887.6	0.000857	0.02224	0.02310	248.34	148.68	397.02
40	1017.0	0.000873	0.01915	0.02002	255.65	143.81	399.46
45	1160.2	0.000890	0.01650	0.01739	263.08	138.71	401.79
50	1318.1	0.000908	0.01422	0.01512	270.63	133.35	403.98
55	1491.6	0.000928	0.01224	0.01316	278.33	127.68	406.01
60	1681.8	0.000951	0.01051	0.01146	286.19	121.66	407.85
65	1889.9	0.000976	0.00899	0.00997	294.24	115.22	409.46
70	2117.0	0.001005	0.00765	0.00866	302.51	108.27	410.78
75	2364.4	0.001038	0.00645	0.00749	311.06	100.68	411.74
80	2633.6	0.001078	0.00537	0.00645	319.96	92.26	412.22
85	2926.2	0.001128	0.00437	0.00550	329.35	82.67	412.01
90	3244.5	0.001195	0.00341	0.00461	339.51	71.24	410.75
95	3591.5	0.001297	0.00243	0.00373	351.17	56.25	407.42
100	3973.2	0.001557	0.00108	0.00264	368.55	28.19	396.74
101.2	4064.0	0.001969	0	0.00197	382.97	0	382.97

جدول ب-۱۰. R-134a اشباع (ادامه)

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، kJ/kg-K		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(°C)	(kPa)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
-70	8.3	119.47	235.15	354.62	0.6645	1.1575	1.8220
-65	11.7	123.18	234.55	357.73	0.6825	1.1268	1.8094
-60	16.3	127.53	233.33	360.86	0.7031	1.0947	1.7978
-55	22.2	132.37	231.63	364.00	0.7256	1.0618	1.7874
-50	29.9	137.62	229.54	367.16	0.7493	1.0286	1.7780
-45	39.6	143.18	227.14	370.32	0.7740	0.9956	1.7695
-40	51.8	148.98	224.50	373.48	0.7991	0.9629	1.7620
-35	66.8	154.98	221.67	376.64	0.8245	0.9308	1.7553
-30	85.1	161.12	218.68	379.80	0.8499	0.8994	1.7493
-26.3	101.3	165.80	216.36	382.16	0.8690	0.8763	1.7453
-25	107.2	167.38	215.57	382.95	0.8754	0.8687	1.7441
-20	133.7	173.74	212.34	386.08	0.9007	0.8388	1.7395
-15	165.0	180.19	209.00	389.20	0.9258	0.8096	1.7354
-10	201.7	186.72	205.56	392.28	0.9507	0.7812	1.7319
-5	244.5	193.32	202.02	395.34	0.9755	0.7534	1.7288
0	294.0	200.00	198.36	398.36	1.0000	0.7262	1.7262
5	350.9	206.75	194.57	401.32	1.0243	0.6995	1.7239
10	415.8	213.58	190.65	404.23	1.0485	0.6733	1.7218
15	489.5	220.49	186.58	407.07	1.0725	0.6475	1.7200
20	572.8	227.49	182.35	409.84	1.0963	0.6220	1.7183
25	666.3	234.59	177.92	412.51	1.1201	0.5967	1.7168
30	771.0	241.79	173.29	415.08	1.1437	0.5716	1.7153
35	887.6	249.10	168.42	417.52	1.1673	0.5465	1.7139
40	1017.0	256.54	163.28	419.82	1.1909	0.5214	1.7123
45	1160.2	264.11	157.85	421.96	1.2145	0.4962	1.7106
50	1318.1	271.83	152.08	423.91	1.2381	0.4706	1.7088
55	1491.6	279.72	145.93	425.65	1.2619	0.4447	1.7066
60	1681.8	287.79	139.33	427.13	1.2857	0.4182	1.7040
65	1889.9	296.09	132.21	428.30	1.3099	0.3910	1.7008
70	2117.0	304.64	124.47	429.11	1.3343	0.3627	1.6970
75	2364.4	313.51	115.94	429.45	1.3592	0.3330	1.6923
80	2633.6	322.79	106.40	429.19	1.3849	0.3013	1.6862
85	2926.2	332.65	95.45	428.10	1.4117	0.2665	1.6782
90	3244.5	343.38	82.31	425.70	1.4404	0.2267	1.6671
95	3591.5	355.83	64.98	420.81	1.4733	0.1765	1.6498
100	3973.2	374.74	32.47	407.21	1.5228	0.0870	1.6098
101.2	4064.0	390.98	0	390.98	1.5658	0	1.5658

جدول ب-۱۱. R-134a فوق گرم

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	50 kPa (-40.67)				100 kPa (-26.54)			
Sat.	0.36889	354.61	373.06	1.7629	0.19257	362.73	381.98	1.7456
-20	0.40507	368.57	388.82	1.8279	0.19860	367.36	387.22	1.7665
-10	0.42222	375.53	396.64	1.8582	0.20765	374.51	395.27	1.7978
0	0.43921	382.63	404.59	1.8878	0.21652	381.76	403.41	1.8281
10	0.45608	389.90	412.70	1.9170	0.22527	389.14	411.67	1.8578
20	0.47287	397.32	420.96	1.9456	0.23392	396.66	420.05	1.8869
30	0.48958	404.90	429.38	1.9739	0.24250	404.31	428.56	1.9155
40	0.50623	412.64	437.96	2.0017	0.25101	412.12	437.22	1.9436
50	0.52284	420.55	446.70	2.0292	0.25948	420.08	446.03	1.9712
60	0.53941	428.63	455.60	2.0563	0.26791	428.20	454.99	1.9985
70	0.55595	436.86	464.66	2.0831	0.27631	436.47	464.10	2.0255
80	0.57247	445.26	473.88	2.1096	0.28468	444.89	473.36	2.0521
90	0.58896	453.82	483.26	2.1358	0.29302	453.47	482.78	2.0784
100	0.60544	462.53	492.81	2.1617	0.30135	462.21	492.35	2.1044
110	0.62190	471.41	502.50	2.1874	0.30967	471.11	502.07	2.1301
120	0.63835	480.44	512.36	2.2128	0.31797	480.16	511.95	2.1555
130	0.65479	489.63	522.37	2.2379	0.32626	489.36	521.98	2.1807
	150 kPa (-17.29)				200 kPa (-10.22)			
Sat.	0.13139	368.06	387.77	1.7372	0.10002	372.15	392.15	1.7320
-10	0.13602	373.44	393.84	1.7606	0.10013	372.31	392.34	1.7328
0	0.14222	380.85	402.19	1.7917	0.10501	379.91	400.91	1.7647
10	0.14828	388.36	410.60	1.8220	0.10974	387.55	409.50	1.7956
20	0.15424	395.98	419.11	1.8515	0.11436	395.27	418.15	1.8256
30	0.16011	403.71	427.73	1.8804	0.11889	403.10	426.87	1.8549
40	0.16592	411.59	436.47	1.9088	0.12335	411.04	435.71	1.8836
50	0.17168	419.60	445.35	1.9367	0.12776	419.11	444.66	1.9117
60	0.17740	427.76	454.37	1.9642	0.13213	427.31	453.74	1.9394
70	0.18308	436.06	463.53	1.9913	0.13646	435.65	462.95	1.9666
80	0.18874	444.52	472.83	2.0180	0.14076	444.14	472.30	1.9935
90	0.19437	453.13	482.28	2.0444	0.14504	452.78	481.79	2.0200
100	0.19999	461.89	491.89	2.0705	0.14930	461.56	491.42	2.0461
110	0.20559	470.80	501.64	2.0963	0.15355	470.50	501.21	2.0720
120	0.21117	479.87	511.54	2.1218	0.15777	479.58	511.13	2.0976
130	0.21675	489.08	521.60	2.1470	0.16199	488.81	521.21	2.1229
140	0.22231	498.45	531.80	2.1720	0.16620	498.19	531.43	2.1479

جدول ب-۱۱. R-134a فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	300 kPa (0.56)				400 kPa (8.84)			
Sat.	0.06787	378.33	398.69	1.7259	0.05136	383.02	403.56	1.7223
10	0.07111	385.84	407.17	1.7564	0.05168	383.98	404.65	1.7261
20	0.07441	393.80	416.12	1.7874	0.05436	392.22	413.97	1.7584
30	0.07762	401.81	425.10	1.8175	0.05693	400.45	423.22	1.7895
40	0.08075	409.90	434.12	1.8468	0.05940	408.70	432.46	1.8195
50	0.08382	418.09	443.23	1.8755	0.06181	417.03	441.75	1.8487
60	0.08684	426.39	452.44	1.9035	0.06417	425.44	451.10	1.8772
70	0.08982	434.82	461.76	1.9311	0.06648	433.95	460.55	1.9051
80	0.09277	443.37	471.21	1.9582	0.06877	442.58	470.09	1.9325
90	0.09570	452.07	480.78	1.9850	0.07102	451.34	479.75	1.9595
100	0.09861	460.90	490.48	2.0113	0.07325	460.22	489.52	1.9860
110	0.10150	469.87	500.32	2.0373	0.07547	469.24	499.43	2.0122
120	0.10437	478.99	510.30	2.0631	0.07767	478.40	509.46	2.0381
130	0.10723	488.26	520.43	2.0885	0.07985	487.69	519.63	2.0636
140	0.11008	497.66	530.69	2.1136	0.08202	497.13	529.94	2.0889
150	0.11292	507.22	541.09	2.1385	0.08418	506.71	540.38	2.1139
160	0.11575	516.91	551.64	2.1631	0.08634	516.43	550.97	2.1386
	500 kPa (15.66)				600 kPa (21.52)			
Sat.	0.04126	386.82	407.45	1.7198	0.03442	390.01	410.66	1.7179
20	0.04226	390.52	411.65	1.7342				
30	0.04446	398.99	421.22	1.7663	0.03609	397.44	419.09	1.7461
40	0.04656	407.44	430.72	1.7971	0.03796	406.11	428.88	1.7779
50	0.04858	415.91	440.20	1.8270	0.03974	414.75	438.59	1.8084
60	0.05055	424.44	449.72	1.8560	0.04145	423.41	448.28	1.8379
70	0.05247	433.06	459.29	1.8843	0.04311	432.13	457.99	1.8666
80	0.05435	441.77	468.94	1.9120	0.04473	440.93	467.76	1.8947
90	0.05620	450.59	478.69	1.9392	0.04632	449.82	477.61	1.9222
100	0.05804	459.53	488.55	1.9660	0.04788	458.82	487.55	1.9492
110	0.05985	468.60	498.52	1.9924	0.04943	467.94	497.59	1.9758
120	0.06164	477.79	508.61	2.0184	0.05095	477.18	507.75	2.0019
130	0.06342	487.13	518.83	2.0440	0.05246	486.55	518.03	2.0277
140	0.06518	496.59	529.19	2.0694	0.05396	496.05	528.43	2.0532
150	0.06694	506.20	539.67	2.0945	0.05544	505.69	538.95	2.0784
160	0.06869	515.95	550.29	2.1193	0.05692	515.46	549.61	2.1033
170	0.07043	525.83	561.04	2.1438	0.05839	525.36	560.40	2.1279

جدول ب-۱۱. R-134a فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	800 kPa (31.30)				1000 kPa (39.37)			
Sat.	0.02571	395.15	415.72	1.7150	0.02038	399.16	419.54	1.7125
40	0.02711	403.17	424.86	1.7446	0.02047	399.78	420.25	1.7148
50	0.02861	412.23	435.11	1.7768	0.02185	409.39	431.24	1.7494
60	0.03002	421.20	445.22	1.8076	0.02311	418.78	441.89	1.7818
70	0.03137	430.17	455.27	1.8373	0.02429	428.05	452.34	1.8127
80	0.03268	439.17	465.31	1.8662	0.02542	437.29	462.70	1.8425
90	0.03394	448.22	475.38	1.8943	0.02650	446.53	473.03	1.8713
100	0.03518	457.35	485.50	1.9218	0.02754	455.82	483.36	1.8994
110	0.03639	466.58	495.70	1.9487	0.02856	465.18	493.74	1.9268
120	0.03758	475.92	505.99	1.9753	0.02956	474.62	504.17	1.9537
130	0.03876	485.37	516.38	2.0014	0.03053	484.16	514.69	1.9801
140	0.03992	494.94	526.88	2.0271	0.03150	493.81	525.30	2.0061
150	0.04107	504.64	537.50	2.0525	0.03244	503.57	536.02	2.0318
160	0.04221	514.46	548.23	2.0775	0.03338	513.46	546.84	2.0570
170	0.04334	524.42	559.09	2.1023	0.03431	523.46	557.77	2.0820
180	0.04446	534.51	570.08	2.1268	0.03523	533.60	568.83	2.1067
	1200 kPa (46.31)				1400 kPa (52.42)			
Sat.	0.01676	402.37	422.49	1.7102	0.01414	404.98	424.78	1.7077
50	0.01724	406.15	426.84	1.7237	-	-	-	-
60	0.01844	416.08	438.21	1.7584	0.01503	413.03	434.08	1.7360
70	0.01953	425.74	449.18	1.7908	0.01608	423.20	445.72	1.7704
80	0.02055	435.27	459.92	1.8217	0.01704	433.09	456.94	1.8026
90	0.02151	444.74	470.55	1.8514	0.01793	442.83	467.93	1.8333
100	0.02244	454.20	481.13	1.8801	0.01878	452.50	478.79	1.8628
110	0.02333	463.71	491.70	1.9081	0.01958	462.17	489.59	1.8914
120	0.02420	473.27	502.31	1.9354	0.02036	471.87	500.38	1.9192
130	0.02504	482.91	512.97	1.9621	0.02112	481.63	511.19	1.9463
140	0.02587	492.65	523.70	1.9884	0.02186	491.46	522.05	1.9730
150	0.02669	502.48	534.51	2.0143	0.02258	501.37	532.98	1.9991
160	0.02750	512.43	545.43	2.0398	0.02329	511.39	543.99	2.0248
170	0.02829	522.50	556.44	2.0649	0.02399	521.51	555.10	2.0502
180	0.02907	532.68	567.57	2.0898	0.02468	531.75	566.30	2.0752

جدول ب-۱۱. R-134a فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(°C)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	1600 kPa (57.90)				2000 kPa (67.48)			
Sat.	0.01215	407.11	426.54	1.7051	0.00930	410.15	428.75	1.6991
60	0.01239	409.49	429.32	1.7135				
70	0.01345	420.37	441.89	1.7507	0.00958	413.37	432.53	1.7101
80	0.01438	430.72	453.72	1.7847	0.01055	425.20	446.30	1.7497
90	0.01522	440.79	465.15	1.8166	0.01137	436.20	458.95	1.7850
100	0.01601	450.71	476.33	1.8469	0.01211	446.78	471.00	1.8177
110	0.01676	460.57	487.39	1.8762	0.01279	457.12	482.69	1.8487
120	0.01748	470.42	498.39	1.9045	0.01342	467.34	494.19	1.8783
130	0.01817	480.30	509.37	1.9321	0.01403	477.51	505.57	1.9069
140	0.01884	490.23	520.38	1.9591	0.01461	487.68	516.90	1.9346
150	0.01949	500.24	531.43	1.9855	0.01517	497.89	528.22	1.9617
160	0.02013	510.33	542.54	2.0115	0.01571	508.15	539.57	1.9882
170	0.02076	520.52	553.73	2.0370	0.01624	518.48	550.96	2.0142
180	0.02138	530.81	565.02	2.0622	0.01676	528.89	562.42	2.0398
	3000 kPa (86.20)				4000 kPa (100.33)			
Sat.	0.00528	411.83	427.67	1.6759	0.00252	394.86	404.94	1.6036
90	0.00575	418.93	436.19	1.6995	-	-	-	-
100	0.00665	433.77	453.73	1.7472	-	-	-	-
110	0.00734	446.48	468.50	1.7862	0.00428	429.74	446.84	1.7148
120	0.00792	458.27	482.04	1.8211	0.00500	445.97	465.99	1.7642
130	0.00845	469.58	494.91	1.8535	0.00556	459.63	481.87	1.8040
140	0.00893	480.61	507.39	1.8840	0.00603	472.19	496.29	1.8394
150	0.00937	491.49	519.62	1.9133	0.00644	484.15	509.92	1.8720
160	0.00980	502.30	531.70	1.9415	0.00683	495.77	523.07	1.9027
170	0.01021	513.09	543.71	1.9689	0.00718	507.19	535.92	1.9320
180	0.01060	523.89	555.69	1.9956	0.00752	518.51	548.57	1.9603
	60000				10000			
90	0.001059	328.34	334.70	1.4081	0.000991	320.72	330.62	1.3856
100	0.001150	346.71	353.61	1.4595	0.001040	336.45	346.85	1.4297
110	0.001307	368.06	375.90	1.5184	0.001100	352.74	363.73	1.4744
120	0.001698	396.59	406.78	1.5979	0.001175	369.69	381.44	1.5200
130	0.002396	426.81	441.18	1.6843	0.001272	387.44	400.16	1.5670
140	0.002985	448.34	466.25	1.7458	0.001400	405.97	419.98	1.6155
150	0.003439	465.19	485.82	1.7926	0.001564	424.99	440.63	1.6649
160	0.003814	479.89	502.77	1.8322	0.001758	443.77	461.34	1.7133
170	0.004141	493.45	518.30	1.8676	0.001965	461.65	481.30	1.7589
180	0.004435	506.35	532.96	1.9004	.002172	478.40	500.12	1.8009

جداول سری ب (خواص ترمودینامیکی نیتروژن اشباع)

جدول ب-۱۲. نیتروژن اشباع

		حجم مخصوص، m^3/kg			انرژی داخلی، kJ/kg		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(K)	(kPa)	v_f	v_{fg}	v_g	u_f	u_{fg}	u_g
63.1	12.5	0.001150	1.48074	1.48189	-150.92	196.86	45.94
65	17.4	0.001160	1.09231	1.09347	-147.19	194.37	47.17
70	38.6	0.001191	0.52513	0.52632	-137.13	187.54	50.40
75	76.1	0.001223	0.28052	0.28174	-127.04	180.47	53.43
77.3	101.3	0.001240	0.21515	0.21639	-122.27	177.04	54.76
80	137.0	0.001259	0.16249	0.16375	-116.86	173.06	56.20
85	229.1	0.001299	0.10018	0.10148	-106.55	165.20	58.65
90	360.8	0.001343	0.06477	0.06611	-96.06	156.76	60.70
95	541.1	0.001393	0.04337	0.04476	-85.35	147.60	62.25
100	779.2	0.001452	0.02975	0.03120	-74.33	137.50	63.17
105	1084.6	0.001522	0.02066	0.02218	-62.89	126.18	63.29
110	1467.6	0.001610	0.01434	0.01595	-50.81	113.11	62.31
115	1939.3	0.001729	0.00971	0.01144	-37.66	97.36	59.70
120	2513.0	0.001915	0.00608	0.00799	-22.42	76.63	54.21
125	3208.0	0.002355	0.00254	0.00490	-0.83	40.73	39.90
126.2	3397.8	0.003194	0	0.00319	18.94	0	18.94
		آنتالپی، kJ/kg			آنترپی، kJ/kg-K		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(K)	(kPa)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
63.1	12.5	-150.91	215.39	64.48	2.4234	3.4109	5.8343
65	17.4	-147.17	213.38	66.21	2.4816	3.2828	5.7645
70	38.6	-137.09	207.79	70.70	2.6307	2.9684	5.5991
75	76.1	-126.95	201.82	74.87	2.7700	2.6909	5.4609
77.3	101.3	-122.15	198.84	76.69	2.8326	2.5707	5.4033
80	137.0	-116.69	195.32	78.63	2.9014	2.4415	5.3429
85	229.1	-106.25	188.15	81.90	3.0266	2.2135	5.2401
90	360.8	-95.58	180.13	84.55	3.1466	2.0015	5.1480
95	541.1	-84.59	171.07	86.47	3.2627	1.8007	5.0634
100	779.2	-73.20	160.68	87.48	3.3761	1.6068	4.9829
105	1084.6	-61.24	148.59	87.35	3.4883	1.4151	4.9034
110	1467.6	-48.45	134.15	85.71	3.6017	1.2196	4.8213
115	1939.3	-34.31	116.19	81.88	3.7204	1.0104	4.7307
120	2513.0	-17.61	91.91	74.30	3.8536	0.7659	4.6195
125	3208.0	6.73	48.88	55.60	4.0399	0.3910	4.4309
126.2	3397.8	29.79	0	29.79	4.2193	0	4.2193

جدول ب-۱۳. نیتروژن فوق گرم

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	100 kPa (77.24 K)				200 kPa (83.62 K)			
Sat.	0.21903	54.70	76.61	5.4059	0.11520	58.01	81.05	5.2673
100	0.29103	72.84	101.94	5.6944	0.14252	71.73	100.24	5.4775
120	0.35208	87.94	123.15	5.8878	0.17397	87.14	121.93	5.6753
140	0.41253	102.95	144.20	6.0501	0.20476	102.33	143.28	5.8399
160	0.47263	117.91	165.17	6.1901	0.23519	117.40	164.44	5.9812
180	0.53254	132.83	186.09	6.3132	0.26542	132.41	185.49	6.1052
200	0.59231	147.74	206.97	6.4232	0.29551	147.37	206.48	6.2157
220	0.65199	162.63	227.83	6.5227	0.35552	162.31	227.41	6.3155
240	0.71161	177.51	248.67	6.6133	0.35546	177.23	248.32	6.4064
260	0.77118	192.39	269.51	6.6967	0.38535	192.14	269.21	6.4900
280	0.83072	207.26	290.33	6.7739	0.41520	207.04	290.08	6.5674
300	0.89023	222.14	311.16	6.8457	0.44503	221.93	310.94	6.6393
350	1.03891	259.35	363.24	7.0063	0.51952	259.18	363.09	6.8001
400	1.18752	296.66	415.41	7.1456	0.59392	296.52	415.31	6.9369
450	1.33607	334.16	467.77	7.2690	0.66827	334.04	467.70	7.0630
500	1.48458	371.95	520.41	7.3799	0.74258	371.85	520.37	7.1740
600	1.78154	448.79	626.94	7.5741	0.89114	448.71	626.94	7.3682
700	2.07845	527.74	735.58	7.7415	1.03965	527.68	735.61	7.5357
800	2.37532	609.07	846.60	7.8897	1.18812	609.02	846.64	7.6839
900	2.67217	692.79	960.01	8.0232	1.33657	692.75	960.07	7.8175
1000	2.96900	778.78	1075.68	8.1451	1.48501	778.74	1075.75	7.9393
	400 kPa (91.22 K)				600 kPa (96.37 K)			
Sat.	0.05992	61.13	85.10	5.1268	0.04046	62.57	86.85	5.0411
100	0.06806	69.30	96.52	5.2466	0.04299	66.41	92.20	5.0957
120	0.08486	85.48	119.42	5.4556	0.05510	83.73	116.79	5.3204
140	0.10085	101.06	141.40	5.6250	0.06620	99.85	139.47	5.4953
160	0.11647	116.38	162.96	5.7690	0.07689	115.34	161.47	5.6422
180	0.13186	131.55	184.30	5.8947	0.08734	130.69	183.10	5.7696
200	0.14712	146.64	205.49	6.0063	0.09766	145.91	204.50	5.8823
220	0.16228	161.68	226.59	6.1069	0.10788	161.04	225.76	5.9837
240	0.17738	176.67	247.62	6.1984	0.11803	176.11	246.92	6.0757
260	0.19243	191.64	268.61	6.2824	0.12813	191.13	268.01	6.1601
280	0.20745	206.58	289.56	6.3600	0.13820	206.13	289.05	6.2381
300	0.22244	221.52	310.50	6.4322	0.14824	221.11	310.06	6.3105
350	0.25982	258.85	362.78	6.5934	0.17326	258.52	362.48	6.4722
400	0.29712	296.25	415.10	6.7331	0.19819	295.97	414.89	6.6121
450	0.33437	333.81	467.56	6.8567	0.22308	333.57	467.42	6.7359
500	0.37159	371.65	520.28	6.9678	0.24792	371.45	520.20	6.8471
600	0.44595	448.55	626.93	7.1622	0.29755	448.40	626.93	7.0416
700	0.52025	527.55	735.65	7.3298	0.34712	527.43	735.70	7.2093
800	0.59423	608.92	846.73	7.4781	0.39666	608.82	846.82	7.3576
900	0.66878	692.67	960.19	7.6117	0.44618	692.59	960.30	7.4912
1000	0.74302	778.68	1075.89	7.7335	0.49568	778.61	1076.02	7.6131

جدول ب-۱۳. نیتروژن فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	800 kPa (100.38 K)				1000 kPa (103.73 K)			
اشباع	0.03038	63.21	87.52	4.9768	0.02416	63.35	87.51	4.9237
120	0.04017	81.88	114.02	5.2191	0.03117	79.91	111.08	5.1357
140	0.04886	98.41	137.50	5.4002	0.03845	97.02	135.47	5.3239
160	0.05710	114.28	159.95	5.5501	0.04522	113.20	158.42	5.4772
180	0.06509	129.82	181.89	5.6793	0.05173	128.94	180.67	5.6082
200	0.07293	145.17	203.51	5.7933	0.05809	144.43	202.52	5.7234
220	0.08067	160.40	224.94	5.8954	0.06436	159.76	224.11	5.8263
240	0.08835	175.54	246.23	5.9880	0.07055	174.98	245.53	5.9194
260	0.09599	190.63	267.42	6.0728	0.07670	190.13	266.83	6.0047
280	0.10358	205.68	288.54	6.1511	0.08281	205.23	288.04	6.0833
300	0.11115	220.70	309.62	6.2238	0.08889	220.29	309.18	6.1562
350	0.12998	258.19	362.17	6.3858	0.10401	257.86	361.87	6.3187
400	0.14873	295.69	414.68	6.5260	0.11905	295.42	414.47	6.4591
500	0.18609	371.25	520.12	6.7613	0.14899	371.04	520.04	6.6947
600	0.22335	448.24	626.93	6.9560	0.17883	448.09	626.92	6.8895
700	0.26056	527.31	735.76	7.1237	0.20862	527.19	735.81	7.0573
800	0.29773	608.73	846.91	7.2721	0.23837	608.63	847.00	7.2057
900	0.33488	692.52	960.42	7.4058	0.26810	692.44	960.54	7.3394
1000	0.37202	778.55	1076.16	7.5277	0.29782	778.49	1076.30	7.4614

جدول ب-۱۳. نیتروژن فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	1500 kPa (110.38 K)				2000 kPa (115.58 K)			
Sat.	0.01555	62.17	85.51	4.8148	0.01100	59.25	81.25	4.7193
120	0.01899	74.26	102.75	4.9650	0.01260	66.90	92.10	4.8116
140	0.02452	93.36	130.15	5.1767	0.01752	89.37	124.40	5.0618
160	0.02937	110.44	154.50	5.3394	0.02144	107.55	150.43	5.2358
180	0.03393	126.71	177.60	5.4755	0.02503	124.42	174.48	5.3775
200	0.03832	142.56	200.03	5.5937	0.02844	140.66	197.53	5.4989
220	0.04260	158.14	222.05	5.6987	0.03174	156.52	219.99	5.6060
240	0.04682	173.57	243.80	5.7933	0.03496	172.15	242.08	5.7021
260	0.05099	188.87	265.36	5.8796	0.03814	187.62	263.90	5.7894
280	0.05512	204.10	286.78	5.9590	0.04128	202.97	285.53	5.8696
300	0.05922	219.27	308.10	6.0325	0.04440	218.24	307.03	5.9438
350	0.06940	257.03	361.13	6.1960	0.05209	256.21	360.39	6.1083
400	0.07949	294.73	413.96	6.3371	0.05971	294.05	413.47	6.2500
450	0.08953	332.53	466.82	6.4616	0.06727	331.95	466.49	6.3750
500	0.09953	370.54	519.84	6.5733	0.07480	370.05	519.65	6.4870
600	0.11948	447.71	626.92	6.7685	0.08980	447.33	626.93	6.6825
700	0.13937	526.89	735.94	6.9365	0.10474	526.59	736.07	6.8507
800	0.15923	608.39	847.22	7.0851	0.11965	608.14	847.45	6.9994
900	0.17906	692.24	960.83	7.2189	0.13454	692.04	961.13	7.1333
1000	0.19889	778.32	1076.65	7.3409	0.14942	778.16	1077.01	7.2553
	3000 kPa (123.61)				10000 kPa			
Sat.	0.00582	46.03	63.47	4.5032				
140	0.01038	79.98	111.13	4.8706	0.00200	0.84	20.87	4.0373
160	0.01350	101.35	141.85	5.0763	0.00291	47.44	76.52	4.4088
180	0.01614	119.68	168.09	5.2310	0.00402	82.44	122.65	4.6813
200	0.01857	136.78	192.49	5.3596	0.00501	108.21	158.35	4.8697
220	0.02088	153.24	215.88	5.4711	0.00590	129.86	188.88	5.0153
240	0.02312	169.30	238.66	5.5702	0.00672	149.42	216.64	5.1362
260	0.02531	185.10	261.02	5.6597	0.00749	167.77	242.72	5.2406
280	0.02746	200.72	283.09	5.7414	0.00824	185.34	267.69	5.3331
300	0.02958	216.21	304.94	5.8168	0.00895	202.38	291.90	5.4167
350	0.03480	254.57	358.96	5.9834	0.01067	243.57	350.26	5.5967
400	0.03993	292.70	412.50	6.1264	0.01232	283.59	406.79	5.7477
500	0.05008	369.06	519.29	6.3647	0.01551	362.42	517.48	5.9948
600	0.06013	446.57	626.95	6.5609	0.01861	441.47	627.58	6.1955
700	0.07012	525.99	736.35	6.7295	0.02167	521.96	738.65	6.3667
800	0.08008	607.67	847.92	6.8785	0.02470	604.42	851.43	6.5172
900	0.09003	691.65	961.73	7.0125	0.02771	689.02	966.15	6.6523
1000	0.09996	777.85	1077.72	7.1347	0.03072	775.68	1082.84	6.7753

جداول سری ب (خواص ترمودینامیکی متان)

جدول ب-۱۴. متان اشباع

		انرژی داخلی، kJ/kg			حجم مخصوص، m ³ /kg		
		بخار اشباع	مایع مخلوط	مایع اشباع	بخار اشباع	مایع مخلوط	مایع اشباع
(K)	(kPa)	u_f	u_{fg}	u_g	v_f	v_{fg}	v_g
90.7	11.7	-358.10	496.59	138.49	0.002215	3.97941	3.98163
95	19.8	-343.79	488.62	144.83	0.002243	2.44845	0.45069
100	34.4	-326.90	478.96	152.06	0.002278	1.47657	0.47885
105	56.4	-309.79	468.89	159.11	0.002315	0.93780	0.94012
110	88.2	-292.50	458.41	165.91	0.002353	0.62208	0.62443
111.7	101.3	-286.74	454.85	168.10	0.002367	0.54760	0.54997
115	132.3	-275.05	447.48	172.42	0.002395	0.42800	0.43040
120	191.6	-257.45	436.02	178.57	0.002439	0.30367	0.3061
125	269.0	-239.66	423.97	184.32	0.002486	0.22108	0.2235
130	367.6	-221.65	411.25	189.60	0.002537	0.16448	0.1670
135	490.7	-203.40	397.77	194.37	0.002592	0.12458	0.1271
140	641.6	-184.86	383.42	198.56	0.002653	0.09575	0.0984
145	823.7	-165.97	368.06	202.09	0.002719	0.07445	0.0771
150	1040.5	-146.65	351.53	204.88	0.002794	0.05839	0.0611
155	1295.6	-126.82	333.61	206.79	0.002877	0.04605	0.0489
160	1592.8	-106.35	314.01	207.66	0.002974	0.03638	0.0393
165	1935.9	-85.06	292.30	207.24	0.003086	0.02868	0.0317
170	2329.3	-62.67	267.81	205.14	0.003222	0.02241	0.0256
175	2777.6	-38.75	239.47	200.72	0.003393	0.01718	0.0205
180	3286.4	-12.43	205.16	192.73	0.003623	0.01266	0.0162
185	3863.2	18.47	159.49	177.96	0.003977	0.00846	0.0124
190	4520.5	69.10	67.010	136.11	0.004968	0.00300	0.0079
190.6	4599.2	101.46	0	101.46	0.006148	0	0.0061

جدول ب-۱۴. متان اشباع (ادامه)

		آنتالپی، kJ/kg			آنتروپی، kJ/kg-K		
دما	فشار	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع	مایع اشباع	مایع مخلوط	بخار اشباع
(K)	(kPa)	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
90.7	11.7	-358.07	543.12	185.05	4.2264	5.9891	10.2155
95	19.8	-343.75	537.18	193.43	4.3805	5.6545	10.035
100	34.4	-326.83	529.77	202.94	4.5538	5.2977	9.8514
105	56.4	-309.66	521.82	212.16	4.7208	4.9697	9.6905
110	88.2	-292.29	513.29	221.00	4.8817	4.6663	9.5480
111.7	101.3	-286.50	510.33	223.83	4.9336	4.5706	9.5042
115	132.3	-274.74	504.12	229.38	5.0368	4.3836	9.4205
120	191.6	-256.98	494.20	237.23	5.1867	4.1184	9.3051
125	269.0	-238.99	483.44	244.45	5.3321	3.8675	9.1996
130	367.6	-220.72	471.72	251.00	5.4734	3.6286	9.1020
135	490.7	-202.13	458.90	256.77	5.6113	3.3993	9.0106
140	641.6	-183.16	444.85	261.69	5.7464	3.1775	8.9239
145	823.7	-163.73	429.38	265.66	5.8794	2.9613	8.8406
150	1040.5	-143.74	412.29	268.54	6.0108	2.7486	8.7594
155	1295.6	-123.09	393.27	270.18	6.1415	2.5372	8.6787
160	1592.8	-101.61	371.96	270.35	6.2724	2.3248	8.5971
165	1935.9	-79.08	347.82	268.74	6.4046	2.1080	8.5126
170	2329.3	-55.17	320.02	264.85	6.5399	1.8824	8.4224
175	2777.6	-29.33	287.20	257.87	6.6811	1.6411	8.3223
180	3286.4	-0.53	246.77	246.25	6.8333	1.3710	8.2043
185	3863.2	33.83	192.16	226.00	7.0095	1.0387	8.0483
190	4520.5	91.56	80.58	172.14	7.3015	0.4241	7.7256
190.6	4599.2	129.74	0	129.74	7.4999	0	7.4999

جدول ب-۱۵. متان فوق گرم

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	100 kPa (111.50 K)				200 kPa (120.61 K)			
Sat.	0.55665	167.90	223.56	9.5084	0.29422	179.30	238.14	9.2918
125	0.63126	190.21	253.33	9.7606	0.30695	186.80	248.19	9.3736
150	0.76586	230.18	306.77	10.1504	0.37700	227.91	303.31	9.7759
175	0.89840	269.72	359.56	10.4759	0.44486	268.05	357.02	10.1071
200	1.02994	309.20	412.19	10.7570	0.51165	307.88	410.21	10.3912
225	1.16092	348.90	464.99	11.0058	0.57786	347.81	463.38	10.6417
250	1.29154	389.12	518.27	11.2303	0.64370	388.19	516.93	10.8674
275	1.42193	430.17	572.36	11.4365	0.70931	429.36	571.22	11.0743
300	1.55215	472.36	627.58	11.6286	0.77475	471.65	626.60	11.2670
325	1.68225	516.00	684.23	11.8100	0.84008	515.37	683.38	11.4488
350	1.81226	561.34	742.57	11.9829	0.90530	560.77	741.83	11.6220
375	1.94220	608.58	802.80	12.1491	0.97046	608.07	802.16	11.7885
400	2.07209	657.89	865.10	12.3099	1.03557	657.41	864.53	11.9495
425	2.20193	709.36	929.55	12.4661	1.10062	708.92	929.05	12.1059
	400 kPa (131.42 K)				600 kPa (138.72 K)			
Sat.	0.15427	191.01	252.72	9.0754	0.10496	197.54	260.51	8.9458
150	0.18233	223.16	296.09	9.3843	0.11717	218.08	288.38	9.1390
175	0.21799	264.61	351.81	9.7280	0.14227	261.03	346.39	9.4970
200	0.25246	305.19	406.18	10.0185	0.16603	302.44	402.06	9.7944
225	0.28631	345.61	460.13	10.2726	0.18911	343.37	456.84	10.0525
250	0.31978	386.32	514.23	10.5007	0.21180	384.44	511.52	10.2830
275	0.35301	427.74	568.94	10.7092	0.23424	426.11	566.66	10.4931
300	0.38606	470.23	624.65	10.9031	0.25650	468.80	622.69	10.6882
325	0.41899	514.10	681.69	11.0857	0.27863	512.82	680.00	10.8716
350	0.45183	559.63	740.36	11.2595	0.30067	558.48	738.88	11.0461
375	0.48460	607.03	800.87	11.4265	0.32264	605.99	799.57	11.2136
400	0.51731	656.47	863.39	11.5879	0.34456	655.52	862.25	11.3754
425	0.54997	708.05	928.04	11.7446	0.36643	707.18	927.04	11.5324
450	0.58260	761.85	994.89	11.8974	0.38826	761.05	994.00	11.6855
475	0.61520	817.89	1063.97	12.0468	0.41006	817.15	1063.18	11.8351
500	0.64778	876.18	1135.29	12.1931	0.43184	875.48	1134.59	11.9816
525	0.68033	936.67	1208.81	12.3366	0.45360	936.03	1208.18	12.1252

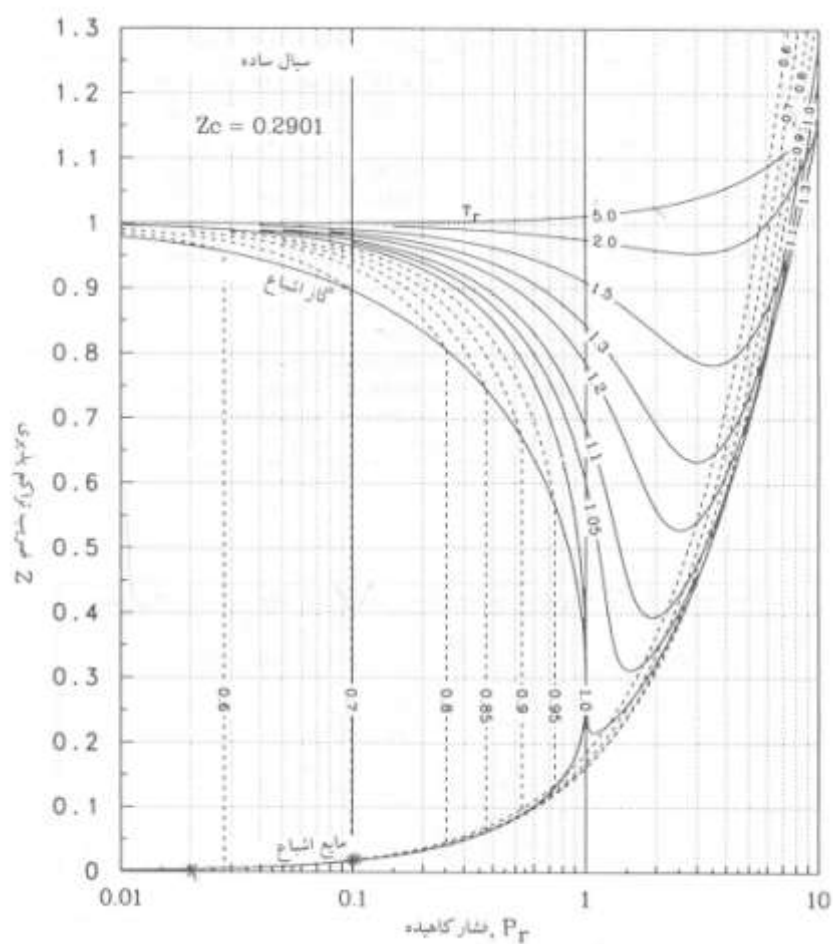
جدول ب-۱۵. متان فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	800 kPa (144.40 K)				1000 kPa (149.13 K)			
Sat.	0.07941	201.70	265.23	8.8505	0.06367	204.45	268.12	8.7735
150	0.08434	212.53	280.00	8.9509	0.06434	206.28	270.62	8.7902
175	0.10433	257.30	340.76	9.3260	0.08149	253.38	334.87	9.1871
200	0.12278	299.62	397.85	9.6310	0.09681	296.73	393.53	9.5006
225	0.14050	341.10	453.50	9.8932	0.11132	338.79	450.11	9.7672
250	0.15781	382.53	508.78	10.1262	0.12541	380.61	506.01	10.0028
275	0.17485	424.47	564.35	10.3381	0.13922	422.82	562.04	10.2164
300	0.19172	467.36	620.73	10.5343	0.15285	465.91	618.76	10.4138
325	0.20845	511.55	678.31	10.7186	0.16635	510.26	676.61	10.5990
350	0.22510	557.33	737.41	10.8938	0.17976	556.18	735.94	10.7748
375	0.24167	604.95	798.28	11.0617	0.19309	603.91	797.00	10.9433
400	0.25818	654.57	861.12	11.2239	0.20636	653.62	859.98	11.1059
425	0.27465	706.31	926.03	11.3813	0.21959	705.44	925.03	11.2636
450	0.29109	760.24	993.11	11.5346	0.23279	759.44	992.23	11.4172
475	0.30749	816.40	1062.40	11.6845	0.24595	815.66	1061.61	11.5672
500	0.32387	874.79	1133.89	11.8311	0.25909	874.10	1133.19	11.7141
525	0.34023	935.38	1207.56	11.9749	0.27221	934.73	1206.95	11.8580
550	0.35657	998.14	1283.45	12.1161	0.28531	997.53	1282.84	11.9992
	1500 kPa (158.52 K)				2000 kPa (165.86 K)			
Sat.	0.04196	207.53	270.47	8.6215	0.03062	207.01	268.25	8.4975
175	0.05078	242.64	318.81	8.9121	0.03504	229.90	299.97	8.6839
200	0.06209	289.13	382.26	9.2514	0.04463	280.91	370.17	9.0596
225	0.07239	332.85	441.44	9.5303	0.05289	326.64	432.43	9.3532
250	0.08220	375.70	499.00	9.7730	0.06059	370.67	491.84	9.6036
275	0.09171	418.65	556.21	9.9911	0.06796	414.40	550.31	9.8266
300	0.10103	462.27	613.82	10.1916	0.07513	458.59	608.85	10.0303
325	0.11022	507.04	672.37	10.3790	0.08216	503.80	668.12	10.2200
350	0.11931	553.30	732.26	10.5565	0.08909	550.40	728.58	10.3992
375	0.12832	601.30	793.78	10.7263	0.09594	598.69	790.57	10.5703
400	0.13728	651.24	857.16	10.8899	0.10274	648.87	854.34	10.7349
425	0.14619	703.26	922.54	11.0484	0.10949	701.08	920.06	10.8942
450	0.15506	757.43	990.02	11.2027	0.11620	755.43	987.84	11.0491
475	0.16391	813.80	1059.66	11.3532	0.12289	811.94	1057.72	11.2003
500	0.17273	872.37	1131.46	11.5005	0.12955	870.64	1129.74	11.3480
525	0.18152	933.12	1205.41	11.6448	0.13619	931.51	1203.88	11.4927
550	0.19031	996.02	1281.48	11.7864	0.14281	994.51	1280.13	11.6346

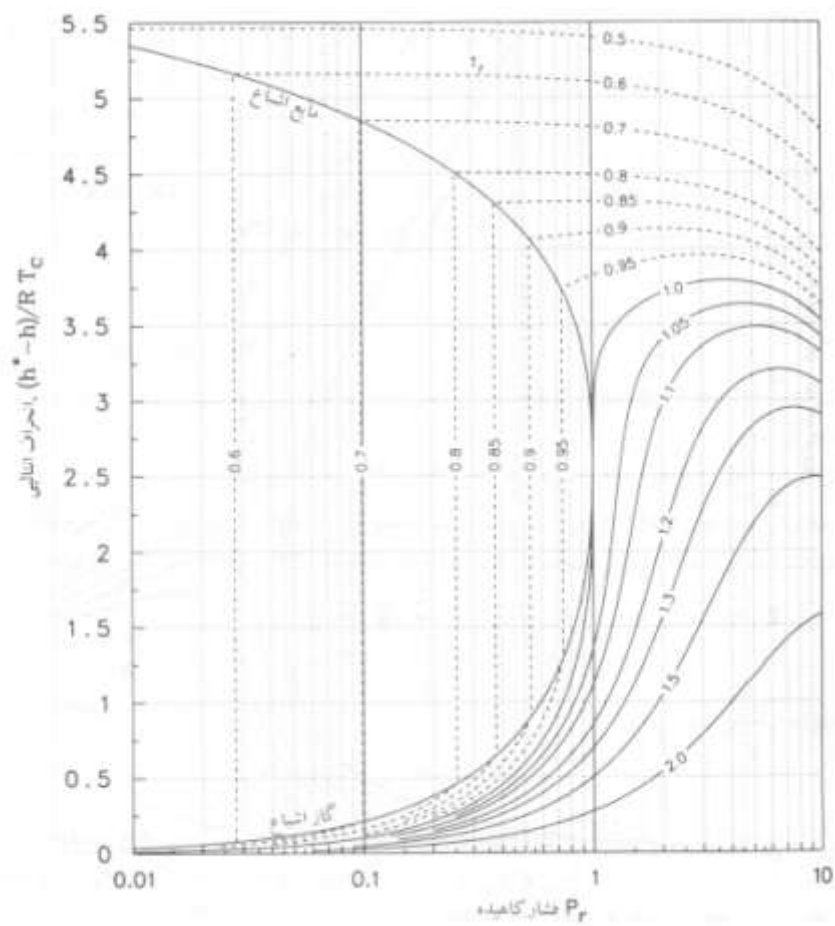
جدول ب-۱۵. متان فوق گرم (ادامه)

دما	v	u	h	s	v	u	h	s
(K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg-K)
	4000 kPa (186.10 K)				8000 kPa			
Sat.	0.01160	172.96	219.34	8.0035	-	-	-	-
200	0.01763	237.70	308.23	8.4675	0.00412	55.58	88.54	7.2069
225	0.02347	298.52	392.39	8.8653	0.00846	217.30	284.98	8.1344
250	0.02814	349.08	461.63	9.1574	0.01198	298.05	393.92	8.5954
275	0.03235	396.67	526.07	9.4031	0.01469	357.88	475.39	8.9064
300	0.03631	443.48	588.73	9.6212	0.01705	411.71	548.15	9.1598
325	0.04011	490.62	651.07	9.8208	0.01924	463.52	617.40	9.3815
350	0.04381	538.70	713.93	10.0071	0.02130	515.02	685.39	9.5831
375	0.04742	588.18	777.86	10.1835	0.02328	567.12	753.34	9.7706
400	0.05097	639.34	843.24	10.3523	0.02520	620.38	821.95	9.9477
425	0.05448	692.38	910.31	10.5149	0.02707	675.14	891.71	10.1169
450	0.05795	747.43	979.23	10.6725	0.02891	731.63	962.92	10.2796
475	0.06139	804.55	1050.12	10.8258	0.03072	789.99	1035.75	10.4372
500	0.06481	863.78	1123.01	10.9753	0.03251	850.28	1110.34	10.5902
525	0.06820	925.11	1197.93	11.1215	0.03428	912.54	1186.74	10.7393
550	0.07158	988.53	1274.86	11.2646	0.03603	976.77	1264.99	10.8849
575	0.07495	1053.98	1353.77	11.4049	0.03776	1042.96	1345.07	11.0272

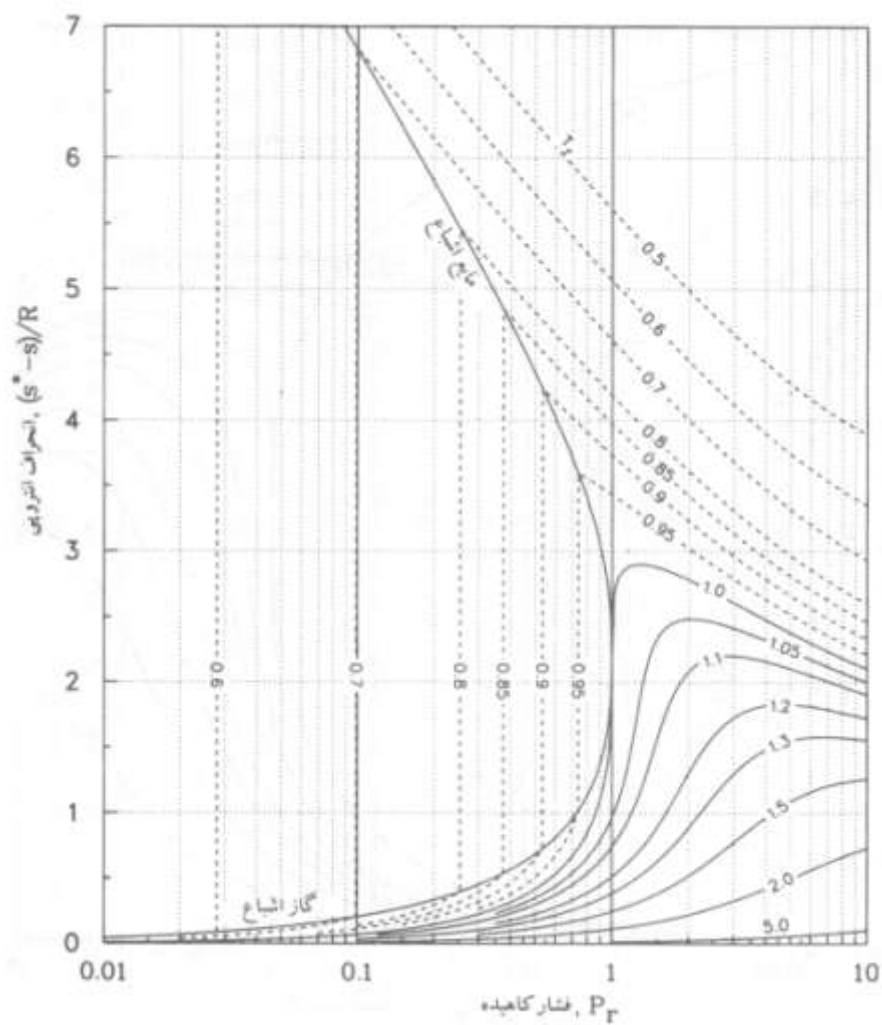
جداول سری ج (نمودار حالت‌های ترمودینامیکی)



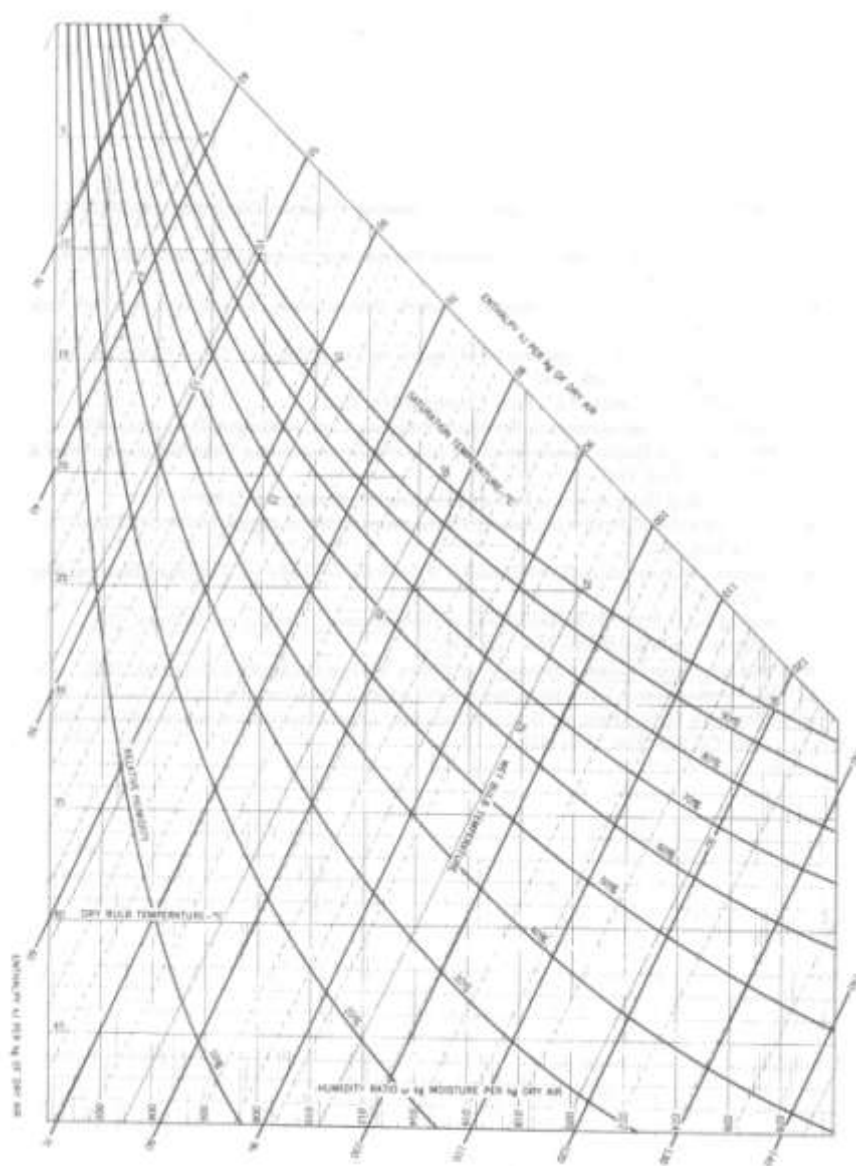
شکل ج-۱. ضریب تراکم‌پذیری سیال ساده



شکل ج-۲. انحراف آنتالپی سیال ساده



شکل ج-۳. انحراف آنتروپی سیال ساده



شکل ج-۴. نمودار سایکرومتریک