
بسم الله الرحمن الرحيم

شرح جامع

حرارت سیالات

«مهندسی مکانیک»

مولف: داریوش آشتیانی

انتشارات ارشد

پیشگفتار ناشر

خداوند بزرگ را شاکریم که فرصتی عنایت فرمود تا بتوانیم قدمی در جهت گسترش علم و فرهنگ کشور عزیزمان برداریم و مسیری هموار را در اختیار مخاطبان و داوطلبان علاقمند به ادامه تحصیل قرار دهیم. از آنجائی که درحوزه کتاب‌های درسی و کمک درسی کارشناسی ارشد کتاب‌های زیادی به رشته تحریر در آمده است با این حال وجود یک مجموعه جامع، دقیق، کامل و دارای رفرنس(منابع) مستند احساس می‌شود.

همیشه دغدغه داشتیم که ای کاش می‌شد تمامی منابع پراکنده و گاهاً دست نایافتنی کنکور در یک مجموعه به گونه‌ای جذاب و شیوا آماده می‌شد و همچنین سوالات دوره‌های قبل کنکور نیز به گونه‌ای تشریحی پاسخ داده می شدند، که خدشه‌ای بر آنها وارد نشود و خیال داوطلبان عزیز آنقدر آسوده باشد که اطلاعات مندرج در پاسخنامه‌ها را برای بهره‌گیری در آزمون خود بکار گیرند. این کار با یاری خداوند بزرگ و همکاری نخبه‌ترین دانشجویان و اساتید کشور در انتشارات ارشد هماهنگ گردید و در تمامی مقاطع تحصیلی از کاردانی به کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در حوزهٔ آزمون‌های سراسری – آزاد و پیام نور بسته‌های آموزشی شامل کتاب‌های بانک سوالات و کتاب‌های شرح جامع درس آماده گردید. در تهیه مجموعه‌های فوق‌الذکر از فارغ‌التحصیلان کارشناسی ارشد و دکتری که حائز رتبه‌های تک رقمی کنکور می‌باشند، استفاده کرده‌ایم، تا شما عزیزان بتوانید در راستای افزایش توان علمی خود در جهت نیل به مقصود خویش نایل آیید. بدون تردید می‌توان گفت که برای اولین بار در نظام آموزشی کشور مجموعه‌ای به این سبک عرضه می‌شود که در کیفیت و کمیت بی‌نظیر بوده و تمامی نیازهای دانشجویان و داوطلبان عزیز را پوشش می‌دهد. امید است که استفاده از این مجموعه عزیزان را در جهت موفقیت در آزمون یاری رسانده باشد. در پایان لازم به ذکر است که بی نقصی محض از آن خداوند متعال می‌باشد، بنا براین از تمامی خوانندگان و داوطلبان عزیز خواهشمندیم نظرات سازنده خود را در مورد این کتاب به سایت انتشارات ارشد اعلام نمایند تا ما را در جهت هر چه بهتر آماده کردن این محصولات یاری رسانند.

با تشکر

ناشـــــر

www.arshadbook. ir

پیشگفتار مولف

خداوند عالم را شاکرم که این بنده را توفیق داد تا سهمی از نشر دانش را به جا آورم.

مجموعه‌ای که پیش رو دارید شرح جامع دروس گروه حرارت و سیالات از رشته‌ی مکانیک است و شامل ترمودینامیک، مکانیک سیالات و انتقال حرارت می باشد. اگرچه منابع بسیاری از این دروس چه به عنوان کتاب مرجع و چه به عنوان کتاب کنکور در بازار موجود است.و برخی نیز بسیار کامل و جامع می باشند، اما برخود دیدم که سهمی در اشاعه‌ی این دانش و در میان گذاشتن محصول تفکرات خود با جامعه‌ی مهندسی مکانیک و دیگر جوامع علمی مرتبط با این سه مبحث، داشته باشم.

در این کتاب سعی شده به زبان ساده برای هر موضوعی استدلال شود و نکات مرتبط در کنار یکدیگر قرار گیرند و ارتباط آنها تشریح گردد. صد البته که اطلاعات این کتاب اکثراً آموخته‌های اینجانب از کتب مرجع و بهره گیری از محضر اساتید بزرگی چون دکتر کوثری، دکتر صادقی و دکتر کهربابیان در دانشگاه تهران و دکتر اشرفی زاده در دانشگاه خواجه نصیر می باشد. اینجانب همواره قدردان این اساتید بزرگ هستم. برای ترمودینامیک بیشتر از کتاب ون وایلن استفاده شده که منبع کنکوری برای این درس است. برای مکانیک سیالات بیشتر از کتاب مانسون استفاده شده زیرا مطالب و مثال های آن به خوبی تفهیم می شوند و برخی فصل ها از کتاب شمیز برگرفته شده اند. در مورد انتقال حرارت کتاب اینکروپرا مورد استفاده قرار گرفته است. در پایان برخود لازم می‌دانم تا از تمامی زحمات انتشارات ارشد برای تایپ، صفحه بندی و چاپ این کتاب مراتب تشکر خود را اعلام دارم.

با سپاس

داریوش آشتیانی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

بخش اول: ترمودینامیک

فصل اول:مفاهیم اولیه

مقدمه ۱۷
سیستم ترمودینامیکی وحجم کنترل ۱۷
حجم کنترل متحرک ۱۸
دیدگاه‌های ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک ۱۸
خواص و حالت ماده ۱۸
فرایند و سیکل ترمودینامیک ۱۹
قانون صفرم ترمودینامیک، تساوی درجه حرارت ۲۰
تعادل فازهای مایع، بخار و جامد ۲۰
تشخیص انواع فرآیند ۲۲
معادله‌ی‌حالت ۲۳
خلاصه فصل ۲۶

فصل دوم:کار و حرارت

مقدمه ۳۱
کار انبساطی یا تراکمی ۳۲
فرایند پلی تروپیک ۳۳
کار یک سیلندر و پیستون با فنر ۳۴
حرارت ۳۴
خلاصه فصل ۳۵

فصل سوم:قانون اول ترمودینامیک

مقدمه ۴۳
انتالپی ۴۵
گرمایی ویژه در حجم ثابت و گرمای ویژه در فشار ثابت ۴۵
خواص گازهای ایده‌آل ۴۵
خواص مایعات وجامدات ۴۶
رابطه‌ی نرخی قانون اول برای یک سیستم ۴۶
بقای جرم ۴۶
فرآیند خفقان در شیر انبساط ۴۹

عنوان **صفحه**

فرآیندهای USUF ۵۰
خلاصه فصل ۵۳

فصل چهارم: قانون دوم ترمودینامیک

مقدمه ۶۳
چرخه‌های ترمودینامیکی ۶۴
سیکل موتور حرارتی ۶۴
سیکل یخچال (پمپ حرارتی) ۶۵
چرخه کارنو ۶۶
خلاصه فصل ۶۷

فصل پنجم: انتروپی و تحلیل‌های قانون دوم

مقدمه ۷۵
نابرابری کلازیوس ۷۵
انتروپی: یک خاصیت سیستم ۷۷
تولید آنتروپی در فرآیندهای برگشت‌ناپذیر ۷۹
اصل افزایش انتروپی ۸۰
روابط خواص ترمودینامیکی ۸۰
تغییر انتروپی جامدات ومایعات ۸۱
تغییر انتروپی گاز ایده‌آل ۸۱
فرآیند USUF (حالت یکنواخت، جریان یکنواخت) ۸۵
اصل افزایش انتروپی ۸۵
راندمان آیزنتروپیک ۸۵
خلاصه فصل ۸۸

فصل ششم:برگشت‌ناپذیری و قابلیت کاردهی

مقدمه ۱۰۱
رابطه‌ای برای W_{REV} ۱۰۲
کار در دسترس ۱۰۳
خلاصه فصل ۱۰۴

فصل هفتم: سیکل‌های توان و تبرید

مقدمه ۱۰۹
چرخه‌های توان ۱۰۹
چرخه تبرید ۱۱۰
سیکل استاندارد رانش جت ۱۱۷
سیکل اتو ۱۱۷
سیکل دیزل ۱۱۹
سیکل استرلینگ ۱۲۱
سیکل‌های تبرید تراکمی بخار ۱۲۱

عنوان **صفحه**

سیکل تبرید جذبی آمونیاک ۱۲۲
خلاصه فصل ۱۲۳

فصل هشتم: مخلوط و سایکرومتریک

مقدمه ۱۳۱
الگوی دالتون ۱۳۲
دمای آدیاباتیک اشباع ۱۳۵
نمودار سایکرومتریک یا رطوبت سنجی ۱۳۶
خلاصه فصل ۱۳۸

فصل نهم: احتراق و واکنش‌های شیمیایی

مقدمه ۱۴۳
انتالپی تشکیل ۱۴۴
دمای آدیاباتیک شعله ۱۴۵
ارزش حرارتی (انتالپی احتراق) ۱۴۶
قانون سوم ترمودینامیک و انتروپی مطلق ۱۴۶
کارایی احتراق ۱۴۶
خلاصه فصل ۱۴۷

فصل دهم: روابط ترمودینامیکی

مقدمه ۱۵۵
معادله‌ی کلاپیرون ۱۵۵
معادله‌ی بازگشتی در مشتقات جزئی (RECIPROCITY EQUATION) ۱۵۶
روابط ماکسول ۱۵۶
ضریب ژول تامسون ۱۵۹
خلاصه فصل ۱۶۰

عنوان **صفحه**

بخش دوم: مکانیک سیالات

فصل اول: کلیات

مقدمات ۱۶۹
ابعاد واحدها ۱۷۰
جرم و نیرو در سیستم USCS ۱۷۰
قانون لزجت نیوتن ۱۷۰
تراکم‌پذیری ۱۷۳
خلاصه فصل ۱۷۶

فصل دوم: استاتیک سیالات

قانون پاسکال (مطالعه اختیاری) ۱۸۳
نیروهای سطحی و نیروهای بدنی ۱۸۳
معادله‌ی اساسی استاتیک سیالات برای حالات مختلف ۱۸۴
جک هیدرولیک ۱۸۴
مانومتر مخزنی (سطح مقطع‌های متفاوت) ۱۸۶
نیروی هیدرواستاتیک بر یک صفحه ۱۸۷
ارتفاع معادل ۱۸۹
منشور فشار PRESSURE PRISM ۱۹۰
نیروی هیدرواستاتیک بر یک سطح انحنادار ۱۹۱
قانون ارشمیدس ARCHIMEDES' PRINCIPAL ۱۹۲
پایداری ۱۹۳
تعادل نسبی مایعات ۱۹۵
خلاصه فصل ۲۰۰

فصل سوم: معادله برنولی

بحث مقدماتی دینامیک سیالات ۲۱۱
فشار استاتیکی، دینامیکی، سکون و کل ۲۱۴
جت آزاد ۲۱۵
جریان محدود در لوله (CONFINED FLOW) ۲۱۶
کاویتاسیون ۲۱۷
سنجش دبی FLOWRATE MEASUREMENT ۲۱۷
خلاصه فصل ۲۱۹

فصل چهارم: سینماتیک سیالات

سینماتیک سیالات ۲۲۷
میدان شتاب ۲۲۸
قضیه انتقال رینولدز ۲۲۹
پایستگی جرم ۲۲۹
توسعه‌ی ریاضی برای قضیه‌ی انتقال رینولدز ۲۳۱
خلاصه فصل ۲۳۶

فصل پنجم: آنالیز ابعادی

تئوری Π با کینگهام ۲۴۳
انواع تشابه ۲۴۶
گروه‌های بدون بعد مهم در سیالات ۲۴۶
تشابه بر پایه‌ی معادلات ناویراستوکس ۲۴۸
خلاصه فصل ۲۵۰

فصل ششم: معادلات ناویر- استوکس

معادلات ناویراستوکس در مختصات کارتزین برای سیال تراکم‌ناپذیر ۲۵۶
معادلات ناویراستوکس در مختصات استوانه‌ای برای سیال تراکم‌ناپذیر ۲۵۷

عنوان **صفحه**

معادلات ناویراستوکس در مختصات کروی برای سیال تراکم‌ناپذیر ۲۵۷
تنش‌ها ۲۵۷

خلاصه فصل ۲۶۶

فصل هفتم: جریان ویسکوز درون لوله

فرق جریان در لوله و کانال باز ۲۷۱
جریان مغشوش در لوله ۲۷۶
روش‌های نیمه تجربی ۲۷۷
آنالیز ابعادی جریان توربولان در لوله ۲۷۹
انواع افت ۲۸۱
قطر هیدرولیکی ۲۸۴
خلاصه فصل ۲۸۶

فصل هشتم: لایه مرزی

صفحه تخت ۲۹۸
ضخامت مومنتوم لایه مرزی θ ۳۰۱
ساده سازی معادلات لایه مرزی ۳۰۲
جدایش ۳۰۸
دراگ وارد به اجسام غوطه‌ور ۳۰۹
خلاصه فصل ۳۱۲

فصل نهم: جریان پتانسیل

چرخش (CIRCULATION) ۳۲۷
سیرکولاسیون برای یک المان سیال ۳۲۸
جریان غیر چرخشی (IRROTATIONAL) ۳۳۰
لیف و دراگ ۳۳۳
محاسبه‌ی تابع پتانسیل حول یک جسم درون سیال غیر ویسکوز ۳۳۴
جریان‌های ساده ۳۳۶
جریان‌های ترکیبی ۳۳۸
تابع پتانسیل مختلط ۳۳۹
خلاصه فصل ۳۴۱

فصل دهم: جریان با سطح آزاد

جریان با سطح آزاد ۳۴۹
جریان یکنواخت ۳۴۹
امواج جاذبه ۳۵۳
انرژی مخصوص جریان ۳۵۴
کانال‌های منشوری با مقطع دلخواه ۳۵۶

عنوان **صفحه**

طبقه‌بندی پروفیل‌های سطح آزاد در جریان‌های تدریجاً متغیر ۳۶۰
جریان سریعاً متغیر؛ پرش هیدرولیکی ۳۶۲
خلاصه فصل ۳۶۴

بخش سوم: انتقال حرارت

فصل اول:مقدمه‌ای بر کلیت انتقال حرارت

تفاوت ترمودینامیک و انتقال حرارت ۳۷۳
انتقال گرما ۳۷۳
رسانایی ۳۷۳
جابجایی ۳۷۴
قانون سرمایش نیوتن ۳۷۴
تابش یا تشعشع ۳۷۴
خلاصه فصل ۳۷۷

فصل دوم:مقدمه‌ای بر رسانایی گرما

معادله‌ی نرخ رسانایی گرما ۳۸۵
بحث بر سر ضریب رسانایی k ۳۸۶
انواع عایق ۳۸۶
حالت سیال ۳۸۶
معادله پخش حرارت (هدایت) ۳۸۶
خلاصه فصل ۳۹۰

فصل سوم:رسانایی گرمای یک بعدی و دائم

شرایط مرزی ۴۰۱
بیان مقاومتی از هدایت و جا به جایی ۴۰۱
دیوار مرکب ۴۰۲
مقاومت سطح تماس ۴۰۳
سیستم‌های شعاعی ۴۰۴
ضخامت بحرانی عایق ۴۰۵
تولید انرژی داخلی در رسانایی ۴۰۶
رسانایی دائم با تولید داخلی انرژی در دیوار تخت ۴۰۶
رسانایی دائم با تولید انرژی داخلی در سیستم‌های شعاعی ۴۰۸
سطوح گسترش یافته (فین‌ها) ۴۰۹
معادله پره با سطح مقطع یکنواخت ۴۰۹
خلاصه فصل ۴۱۳

فصل چهارم:هدایت دو بعدی پایدار

روش ترسیمی ۴۲۵
روش عددی ۴۲۶

عنوان **صفحه**

خلاصه فصل ۴۲۹

فصل پنجم:رسانایی گرمای گذرا (غیر دائم)

روش ظرفیت فشرده ۴۳۵
اعتبار روش ظرفیت فشرده ۴۳۶
اثرهای مکانی (جسم نیمه بی‌نهایت) ۴۳۸
خلاصه فصل ۴۴۱

فصل ششم:مقدمات جا به جایی

لایه مرزی ۴۴۷
جریان آرام و مغشوش ۴۵۰
عدد نوسلت ۴۵۱
تشابه رینولدز و تشابه چیلتون- کولبرن ۴۵۲
خلاصه فصل ۴۵۴

فصل هفتم:جا به جایی در جریان خارجی

روش تجربی برای اندازه‌گیری انتقال حرارت ۴۶۱
حل تشابهی جریان آرام ۴۶۱
جریان مغشوش ۴۶۳
جریان عمود بر استوانه ۴۶۴
نیروی درگ (پسا) ۴۶۵
عدد نوسلت حول استوانه ۴۶۵
کره ۴۶۶
جریان عمود بر مجموعه‌ی لوله‌ها ۴۶۶
خلاصه فصل ۴۶۷

فصل هشتم:جابه‌جایی در جریان داخلی

جا به جایی در جریان داخلی ۴۷۷
رژیم‌های جریان ۴۷۸
توسعه یافتگی حرارتی ۴۸۰
شرایط توسعه یافتگی حرارتی ۴۸۰
موازنه انرژی ۴۸۱
شرط دمای سطح ثابت ۴۸۲
ناحیه ورودی ۴۸۳
جریان مغشوش ۴۸۳
خلاصه فصل ۴۸۵

فصل نهم:جا به جایی آزاد

معادلات حاکم ۴۹۶
بررسی فرم بی بعد معادلات: ۴۹۷

عنوان صفحه

متغیرهای تشابهی ۴۹۸
خلاصه فصل ۵۰۰

فصل دهم:انتقال حرارت با استفاده از تغییر فاز

آشنایی با پدیده‌های جوش استخری ۵۰۵
نمایش این پدیده‌ها بر روی یک نمودار ۵۰۶
روابط نیمه تجربی ۵۰۷
خلاصه فصل ۵۰۹

فصل یازدهم:مبدل‌های حرارتی

انواع مبدل‌های حرارتی ۵۱۳
مقدار انتقال حرارت در مبدل حرارتی ۵۱۴
جریان موازی در مبدل (Parallel Flow) ۵۱۴
جریان مخالف در مبدل (Counter Flow) ۵۱۵
انواع مسأله ۵۱۵
خلاصه فصل ۵۱۹

فصل دوازدهم:تشعشع

سطحی یا حجمی بودن تشعشع ۵۲۵
جسم سیاه ۵۲۶
ضرایب و خواص تشعشعی ۵۲۸
شدت تشعشع خروجی (Radiosity) ۵۳۰
قضیه دوم کرشهف ۵۳۰
تبادل تشعشع بین سطوح ۵۳۱
روابط مهم ضریب شکل ۵۳۲
خلاصه فصل ۵۳۷

بخش اول

ترمودینامیک

فصل اول

مفاهیم اولیه

عناوین اصلی

- مقدمه
- سیستم ترمودینامیکی وحجم کنترل
- حجم کنترل متحرک
- دیدگاه‌های ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک
- خواص و حالت ماده
- فرایند و سیکل ترمودینامیک
- قانون صفرم ترمودینامیک، تساوی درجه حرارت
- تعادل فازهای مایع، بخار و جامد (نقطه سه گانه)
- تشخیص انواع فرآیند
- خلاصه فصل

فصل اول

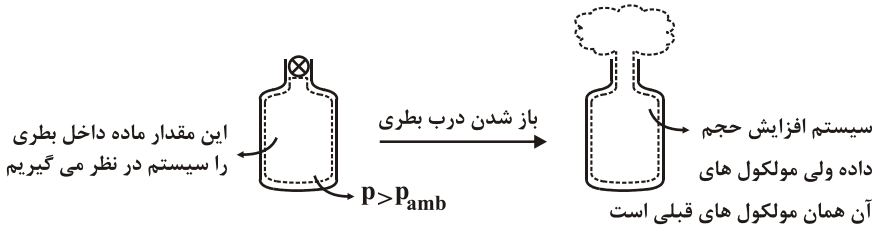
مفاهیم اولیه

مقدمه

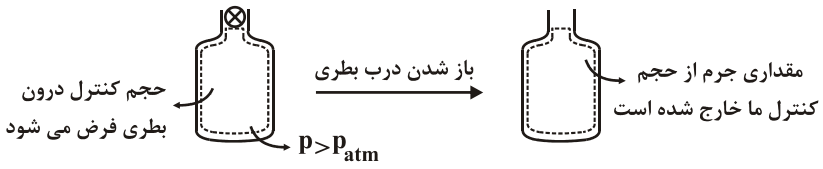
یکی از تعاریف عالی ترمودینامیک این است که ترمودینامیک علم انرژی و انتروپی می‌باشد. ترمودینامیک علمی است که با حرارت و کار و آن گروه از خواص مواد که مرتبط با کار و حرارت هستند، سروکار دارد. بنیان ترمودینامیک مشاهدات تجربی است.

سیستم ترمودینامیکی وحجم کنترل

جرم کنترل یا سیستم ترمودینامیک شامل مقداری ماده با هویت مشخص است یعنی همان مولکولهای ماده که از ابتدا مشخص کرده‌ایم را دنبال می‌کنیم پس جرم آن ثابت است و جرم نمی‌تواند به آن وارد و یا از آن خارج شود.

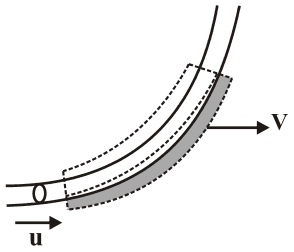


حجم کنترل حجمی از فضا است که ممکن است ثابت یا متحرک باشد و ورود و خروج به آن و یا تولید یک گونه‌ی شیمیایی درون آن و همچنین ذخیره‌ی جرم در آن را بررسی می‌کنیم. یک حجم کنترل محصور به یک سطح است که آن را از محیط اطراف متمایز می‌سازد این سطح، سطح کنترل نامیده می‌شود. خارج از سیستم یا حجم کنترل را محیط (Surrounding) می‌نامند.



حجم کنترل متحرک

آب با سرعت u از شلنگ خارج می‌شود و پره با سرعت V حرکت می‌کند. جریان آب روی پره را مطابق شکل حجم کنترل در نظر می‌گیریم که متحرک است.



به طور کلی حجم کنترل یعنی حجمی که آن را پایش می‌کنیم و جرم کنترل یعنی جرمی که آن را پایش می‌کنیم.

📖 **نکته:** به طور کلی با مجموعه‌ی سیلندر پیستون به عنوان یک جرم کنترل برخورد می‌کنیم و برای دستگاه‌های جریانی مثل کمپرسور و توربین و .....از حجم کنترل استفاده می‌کنیم.

دیدگاه‌های ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک

در دیدگاه میکروسکوپیک به حرکت تک تک مولکول‌ها و یا اتم‌ها معطوف می‌شویم و نظریه‌ی جنبشی مولکول‌ها و ترمودینامیک آماری از آن استخراج می‌شود در حالی که در نظریه‌ی ماکروسکوپیک با ابعادی سرو کار داریم که بتوان محیط را پیوسته در نظر گرفت و یکنواختی را در داخل حجم مورد بررسی به وضوح حس کنیم.

منظور از یکنواختی در اینجا بیشتر فشار است زیرا در دیدگاه میکروسکوپیک فشار به صورت انتقال مومنتوم ناشی از برخورد مولکول‌ها تعریف می‌شود.

تعریف: مسیر پویش آزاد مولکول‌ها (mean free path) به صورت متوسط آماری فاصله‌ای تعریف می‌شود که مولکول‌ها بین دو برخورد طی می‌کنند. این پارامتر یک معیار مهم در ترمودینامیک آماری به حساب می‌آید.

خواص و حالت ماده

تعریف فاز: یک فاز به عنوان کمیتی از ماده تعریف می‌شود که تماماً همگن باشد. یعنی مرزهای فاز وجود نداشته باشد مثلاً در مخلوط آب و یخ مرز بین آب و یخ مشخص است و در مخلوط آب مایع و بخار آب اولاً مرز به صورت زیر می‌تواند مشهود باشد.



و ثانیاً در یک بخار معلق اگر قطره‌ای مایع (بسیار ریز) موجود باشد باز هم مرز آن مشخص خواهد بود حالت (State) را می‌توان با کمک برخی خواص ماکروسکوپیک و قابل مشاهده تعریف یا تشریح کرد. برخی از این خواص آشنا عبارتند از فشار، درجه حرارت و چگالی. مابقی را نیز بررسی خواهیم کرد: حجم مخصوص و کیفیت (برای حالت دو فازی)

خاصیت (Property) به عنوان کمیتی تعریف می‌شود که به حالت سیستم بستگی دارد و مستقل از مسیر رسیدن سیستم به آن حالت معین می‌باشد.

خواص ترمودینامیکی به دو گروه تقسیم می‌شوند:

- **خواص مقداری (extensive):** به مقدار ماده و یا به عبارت دیگر به میزان جرم آن بستگی دارد. مثل حجم و انرژی داخلی (U)
- **خواص شدتی (intensive):** به مقدار ماده بستگی ندارد مثل فشار، دما و چگالی (جرم مخصوص)

📖 **نکته:** برخی کمیت‌ها را بر جرم تقسیم می‌کنیم تا مقدار شدتی آن بدست آید مثلاً حجم

انرژی داخلی مخصوص $u = \frac{U}{m}$

انتالپی مخصوص $h = \frac{H}{m}$

حجم مخصوص $v = \frac{V}{m}$

حرارت مخصوص $q = \frac{Q}{m}$

کار مخصوص $w = \frac{W}{m}$

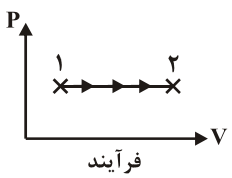
از این میان برخی خاصیت هستند (مانند انتالپی مخصوص، حجم مخصوص، انرژی داخلی مخصوص) و برخی خاصیت نیستند (مثل کار و حرارت مخصوص)

فرایند و سیکل ترمودینامیک

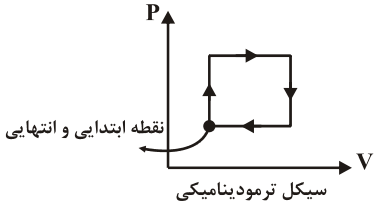
در طی یک فرآیند سیستم مسیر ترمودینامیکی‌ای را طی می‌کند که اصطلاحاً حالت آن تغییر می‌کند مثلاً در یک حالت ساده با ثابت بودن دما و حجم مخصوص فشار آن افزایش می‌یابد.

📖 **نکته:** یک سیستم تک فاز گازی عملاً با دو خاصیت حالت خود را کاملاً معین و مشخص می‌کند (دو خاصیت از میان سه خاصیت دما و فشار وحجم مخصوص) در یک سیستم دو فاز مایع و بخار دما و فشار کاملاً .وابسته‌اند یعنی اگر یکی مشخص شود دیگری نیز مشخص می‌شود و خاصیت دوم کیفیت آن است که حجم و انتالپی و انتروپی و انرژی داخلی مخصوص را معین می‌کند.

- **فرآیند شبه تعادلی:** فرآیندهای مورد بررسی ما باید به حدی آرام انجام شوند که گویی متشکل از بی‌نهایت حالت تعادل است که هر حالت، بی‌نهایت به حالت تعادل مجاور خود نزدیک است. در واقع در تئوری، زمان یک فرآیند شبه تعادلی، به بی‌نهایت میل می‌کند.



ولی در یک سیکل ترمودینامیکی فرآیند یا مجموعه‌ای از فرآیندها اتفاق می‌افتد که حالات ابتدایی و انتهایی سیستم یکی هستند.



سیکل ترمودینامیکی

- **تعادل ترمودینامیکی:** یک سیستم در حال تعادل است اگر هر گاه به حال خود رها شود هیچگونه تغییری در خواص آن (مثلاً دما، فشار و حجم مخصوص) مشاهده نمی‌شود. رها شدن به حال خود یعنی عدم اندرکنش‌کاری یا حرارت با پیرامون

قانون صفرم ترمودینامیک، تساوی درجه حرارت

قانون صفرم ترمودینامیک می‌گوید اگر دو جسم به طور مستقل با جسم سومی در تعادل حرارتی باشند می‌توان نتیجه گرفت که با یکدیگر نیز در تعادل حرارتی هستند و درجه حرارت هر سه مساویست.

این قانون بسیار بدیهی به نظر می‌رسد اما لازم است تا درستی آن را به عنوان یک قانون بیان کنیم.

از آن جایی که قوانین اول و دوم در ابتدا کشف شدند و سپس قانون صفرم در نتیجه برای اینکه نام قوانین اول و دوم را تغییر ندهند نام صفرم را انتخاب کردند.

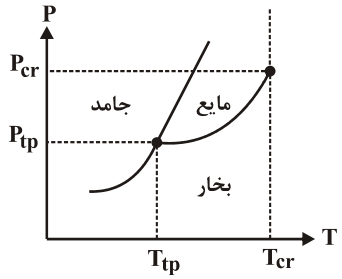
تعریف ماده‌ی خالص: ماده‌ای همگن و دارای ترکیبات شیمیایی ثابت است. ماده‌ی خالص می‌تواند در بیش از یک فاز وجود داشته باشد ولی در ترکیبات شیمیایی آن در تمام فازها یکسان است.

حتی گاهی هوا به عنوان یک مخلوط گازی نیز ماده‌ای خالص فرض می‌شود چرا که این مخلوط در همه جا همگن است و ترکیب آن تغییر نمی‌کند.

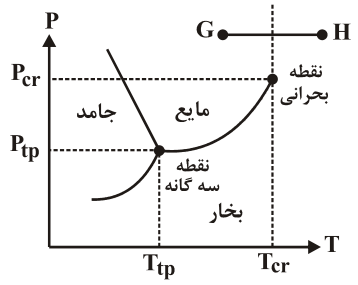
در ترمودینامیک‌ها تاکید بر ماده‌ای تراکم‌پذیر ساده است. یعنی تراکم پذیری در آن لحاظ می‌شود ولی منظور از ساده، صرف نظر کردن از اثرات سطحی، مغناطیسی و الکتریکی است.

تعادل فازهای مایع، بخار و جامد (نقطه سه گانه)

ابتدا باید توجه کرد که دیاگرام‌های خواص معمولاً به صورت دو بعدی رسم می‌شدند مثلاً نمودار P- V و یا P-T و T-V برای رسم نمودارهای تعادلی از نمودار P-T استفاده می‌شود.



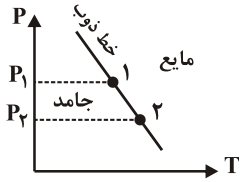
نمودار تغییر فاز برای مواد دیگر غیرمشابه با آب



نمودار تغییر فاز برای آب

در فشارهای بالاتر از فشار بحرانی در عبور از خطی نظیر GH تمایز مشخصی بین فازهای مایع و بخار مشاهده نمی‌شود. در نقطه‌ی سه‌گانه (در فشار و دمایی معین برای هر ماده) هر سه فاز در حالت تعادل هستند یعنی مثلاً برای آب مایع، یـخ و بخار با هم در تعادل هستند (برای آب $P_{tp} = ۶۱۱Pa, T_{tp} = ۰/۰۱^{\circ}C$ و مرزهای دیگر نیز نشان دهنـده‌ی تعـادل فـازی جامـد- مایع، مایع- بخار است مثلاً برای آب در فشارهای کمتر از ۶۱۱ Pa تعادل جامد بخار مشاهده می‌شود البته هر فشار دو فازی تنها متناظر با یک دمای دو فازی است ولی فشارهای بالاتر از P_{tp} در دو دمای مشخص دو فاز خواهند بود یکی دمـای ذوب و دیگری دمای تبخیر.

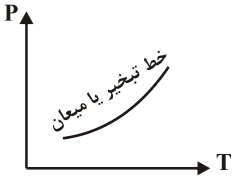
نکته: شیب خط تعادل جامد- مایع برای آب و موادی نظیر آن منفی است ولی برای مواد دیگر مثبت است. منفی بودن شیب به معنای افزایش حجم در موقع انجماد است. این مطلب را به این صورت توجیه می‌کنـیم: اگـر انجمـاد از نقطه‌ی ۱ عبور کند دمای انجماد کمتر است پس فشارهای بیشتر برای انجماد به دماهای کمتری نیاز دارند و در نتیجه تن تبرید بیشتر یعنی افزایش فشار به انجماد کمکی نمی‌کند (خلاف آنچه تصور می‌رود) پس یعنی انجماد با افزایش حجم توأم است که این موضوع برای ماده‌ای نظیر آب صادق است. ولی در مواد دیگر بـه طـور معمـول افزایش فشار به انجماد کمک کرده و دمای انجماد بالا می‌رود (تن تبریدکمتر) پس بـا انجمـاد کـاهش حجـم را شاهد خواهیم بود.



توجه: هر فاز خود می‌تواند به چند زیر فاز نیز تقسیم شود علی‌الخصوص فاز جامد. مثلاً یخ در دماها و فشارهای متفاوت ساختار کریستالی متفاوتی دارد و در حقیقت فاز آن متفاوت است. به همین ترتیب فولاد است که خواص فازهای متفاوت آن تا حدی تغییر می‌کنند. گذر از یک فاز جامد به فاز جامد دیگر را تبدیل آلوتروپیک گویند.

نکته: ناحیه‌ی اشباع به طورکلی به خط تبخیر گفته می‌شود (مرز بین مایع و گاز یا بخار)

روی این خط ماده دو فاز است یعنی مقداری از آن مایع و مقداری بخار است (مخلوط اشباع)



مایع اشباع: مخلوط اشباعی است که مقدار بخار آن صفر باشد
بخار اشباع:مخلوط اشباعی است که مقدار مایع آن صفر باشد.
پس یک کمیت به نام «کیفیت مخلوط» تعریف می‌شود.

$$x = \frac{m_g}{m_{total}}$$

$x = ۱$ برای بخار اشباع

$x = ۰$ برای مایع اشباع

کمیت‌های دو فازی با مقدار x مشخص می‌شوند، به روند زیر توجه کنید.
(مایع :f)

$$v_{۲phase} = v_f + v_g \Rightarrow m_{total}\, v_{۲phase} = m_f v_f + m_g v_g$$

$$\Rightarrow v_{۲phase} = \frac{m_f}{m_{total}} v_f + \frac{m_g}{m_{total}} v_g = (۱-x) v_f + x v_g$$

$$\Rightarrow v_{۲phase} = v_f + x\left(v_g - v_f\right) = v_f + x v_{fg}$$

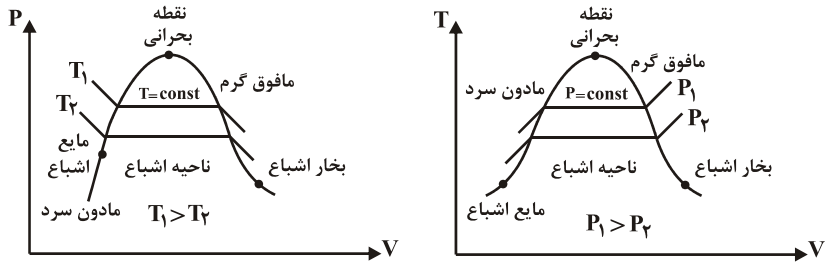
$$v_{fg} = v_g - v_f$$

به همین ترتیب برای خواص دیگر نیز رابطه بدست می‌آید مثلاً

$$u = u_f + x u_{fg}$$

نکته: موادی که آنها راگاز می‌نامیم در واقع بخارت بسیار مافوق گرم هستند .

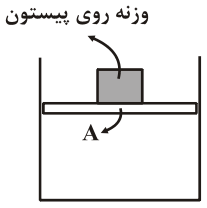
نمودار P-T در ناحیه‌ی دو فاز یک خط است ولی نمودارهای دیگر مثل T-V و P-V چتر اشباع را نمایش می‌دهند.



در منحنی P-V چتر بخار مکان هندسی مایع اشباع و بخار اشباع را نشان می‌دهد و زیر آن ناحیه‌ی دو فاز است.
شیب خط دما ثابت در خارج ناحیه‌ی اشباع منفی است یعنی با کاهش فشار حجم افزایش می‌یابد.
در منحنی T-V نیز به همان ترتیب است فقط شیب منحنی خارج از ناحیه‌ی اشباع، مثبت است زیرا در فشار ثابت با افزایش دما حجم نیز افزایش می‌یابد. (افزایش جنبش مولکولی و نیاز به فضای بیشتر در فشار ثابت) در مورد نقطه‌ی بحرانی در این دو نمودار نیز به همان ترتیب گفته شده برای نمودار P-T است.
در فشارهای بالای فشار بحرانی تغییر فاز دما ثابت به آن شکل مشاهده نمی‌شود.

تشخیص انواع فرآیند

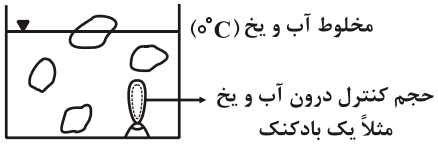
با توجه به مطالب گفته شده حال دیاگرام‌های را به خوبی می‌شناسیم. نکته‌ی مهم تشخیص انواع فرآیندهاست فرآیند یک سیلندر و پیستون فشار ثابت است زیرا وزن پیستون به علاوه وزنه‌ها ثابت است و چون سطح مقطع پیستون نیز مقدار مشخصی دارد پس فشار همواره ثابت است یعنی با تغییرات حجم و دما فشار تغییری نخواهد کرد.



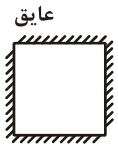
فرآیند یک مخزن صلب حجم ثابت است زیرا حجم مخزن همواره مقدار مشخصی است.



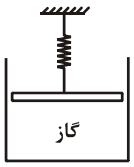
فرآیند دما ثابت می‌تواند با قرار دادن ظرف حاوی سیستم در آب و یخ یا آب در حال جوشیدن شبیه‌سازی شود.

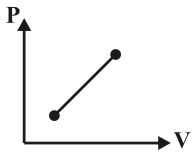


حجم کنترل عایق شده فرآیند آدیاباتیک را نتیجه می‌دهد (بدون ورود و خروج حرارت)



ترکیبی از این فرآیند نیز امکان‌پذیر است. مثلاً حجم ثابت و آدیاباتیک
درنهایت در پیستون متصل به فنر، فشار و حجم به صورت خطی تغییر می‌کنند.
(دلیل آن را توضیح دهید و راجع به شیب و عرض از مبدأ نمودار بحث کنید)





معادله‌ی حالت

معادله حالت گاز ایده‌آل همان‌گونه که معروف است در ترمودینامیک به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$PV = mRT$$

$$Pv = RT$$

ثابت گاز: $R\left(\frac{j}{kgK}\right)$

حجم مخصوص: $v\left(\frac{m^3}{kg}\right)$

فشار: $P(Pa)$

جرم: $m(kg)$

دما: $T(^\circ K)$

اگر P برحسب kPa نوشته شود می‌توان R را برحسب $\frac{kj}{kg.K}$ نوشت، که مثلاً برای هوا:

$$R = ۰/۲۸۷ \frac{kj}{kg.K}$$

R برای هر گاز مقدار ثابتی می‌باشد و با $\bar{R}$ یا R_u فرق می‌کند.

ثابت جهانی گازها

$$PV = n\bar{R}T \qquad \bar{R} = MR = ۸/۳۱۴ \frac{kJ}{kmol.K}$$

این معادله حالت رفتار یک گاز ایده‌آل را توصیف می‌کند. این رفتار معمولاً برای گازهای مورد بررسی ما در ترمودینامیک در محدوده‌ی خاصی اتفاق می‌افتد: فشارهای کمتر از $\frac{۱}{۵}$ فشار بحرانی یا دماهای بالاتر از ۲ و یا حتی ۳ برابر دمای بحرانی به همین علت دو کمیت T_r و P_r تعریف می‌شود.
(دما و فشار کاهش یافته)

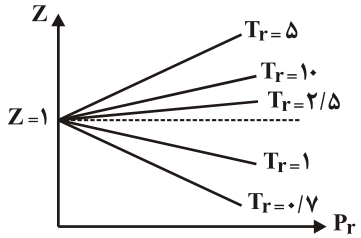
$$P_r = \frac{P}{P_{cr}}, P_r < \frac{۱}{۵} = ۰/۲ \qquad T_r = \frac{T}{T_{cr}}, \quad T_r > ۲$$

یکی از شرایط بالا کافی است تا رفتار ایده‌آل از گاز مشاهده کنیم.
ضریب تراکم‌پذیری: معیاری از میزان انحراف رفتار گازهای واقعی از گازهای ایده‌آل است که به صورت ضریبی در معادله‌ی حالت وارد می‌شود. این ضریب خود تابع دما و فشار است.

$$PV = ZRT \Rightarrow Z = \frac{Pv}{RT}$$

واضح است که برای گاز ایده‌ال $Z = ۱$، Z بر حسب دما و فشار کاهش یافته رسم می‌شود.

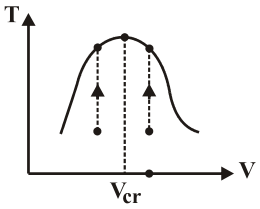
نکته: اگر Z برحسب دما و فشار رسم شود برای هر گاز باید یک منحنی رسم کنیم ولی اگر Z برحسب T_r و P_r رسم شود یک منحنی تعمیم یافته داریم که برای تمامی گازها صادق است.



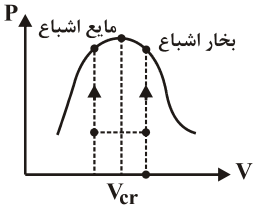
نکته: در $T_r = ۲/۵$ تقریباً در تمامی فشارها Z=۱ است. هر چه T_r از یک کوچکتر باشد شدت انحراف آن از Z بیشتر است و T_rهای خیلی بزرگ هم نزدیک خط Z=۱ قرار می‌گیرند.

توجه: معادلات حالت دیگری از جمله معادله حالت واندروالس وجود دارد که کمی پیچیده‌تر است و احتمالاً در گستره‌ی وسیع‌تری دقیق هستند.

نکته: با توجه به منحنی T-V و یا P-V اگر در یک مخلوط دو فاز $v > v_{cr}$ در یک ظرف صلب (حجم ثابت) با افزایش دما (یا فشار) به بخار اشباع می‌رسیم و اگر $v < v_{cr}$ با افزایش دما (یا فشار) در ظرف صلب به مایع اشباع می‌رسیم.



افزایش دما در حجم ثابت در ناحیه دو فاز



افزایش فشار در حجم ثابت در ناحیه دو فاز

خلاصه فصل

مفاهیم اولیه

هویت ماده در سیستم معین است اما در حجم کنترل با جریان جرم ورودی و خروجی سر و کار داریم. دیدگاه میکروسکوپیک معطوف به مولکول‌ها و اتم‌ها است در حالی که دیدگاه ماکروسکوپیک با ابعادی سر و کار دارد که محیط را پیوسته فرض می‌کند.

خواص مقداری به جرم بستگی دارند ولی خواص شدتی مستقل از جرم‌اند.

حالت ترمودینامیکی با تعدادی از خواص کاملاً معین می‌شود.

فرآیند ترمودینامیک بین دو حالت ترمودینامیکی قابل تعریف است.

سیکل ترمودینامیکی متشکل از تعدادی فرآیند است که حالات ابتدایی و انتهایی یکسان می‌باشند. در نقطه‌ی سه‌گانه، هر سه فاز مایع، جامد و گاز در تعادل هستند.

معادله‌ی حالت گاز کامل

$$Pv = RT$$

تست‌های آخر فصل

۱- مخزن دیگ بخار شامل آب مایع و بخار در دمای T، و فشار P و کیفیت x است. گرمای نهان تبخیر آب در این فشار h_{fg} است. اگر مقدار Q ژول گرما به مخزن داده شود که تمام آب به بخار اشباع تبدیل شود، مقدار Q برابر است با:

(m = جرم آب [kg]، u = انرژی داخلی، h = آنتالپی $\left[\frac{J}{kg}\right]$)

۱) $Q = m(1-x)u_{fg}$ ۲) $Q = mxu_{fg}$ ۳) $Q = mxh_{fg}$ ۴) $Q = m(1-x)h_{fg}$

۲- اگر $\oint dx = 0$ و x یکی از خصوصیات ترمودینامیکی سیستم باشد، در آن صورت در مورد پارامتر x کدام عبارت صحیح است؟

۱) اگر x خاصیت ترمودینامیکی باشد $\oint x = 0$ می‌شود.

۲) چون انتگرال بر روی مسیر برابر با صفر شده است، x می‌تواند پارامتری وابسته به مسیر باشد.

۳) چون انتگرال بر روی مسیر بسته انجام شده است، خواه x خاصیت ترمودینایکی باشد و یا نباشد $\oint dx = 0$ است.

۴) x نمی‌تواند خاصیت ترمودینامیکی باشد.

۳- چرا غذا در دیگ زودپز سریع‌تر پخته می‌شود؟

۱) ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه دیگ زودپز کم است و در نتیجه حرارت بیشتری را عبور می‌دهد و حرارت کم‌تری را جذب می‌نماید.

۲) در دیگ زودپز فشار وارد بر سطح آب از طریق سوپاپ‌ها کم می‌شود و در نتیجه نقطه جوش آب کاهش می‌یابد.

۳) در دیگ زودپز آب تبدیل به بخار داغ می‌شود و بخار داغ به پخته شدن غذا کمک می‌کند.

۴) در دیگ زودپز فشار وارد بر سطح آب در حال افزایش است و در نتیجه نقطه جوش آب زیاد می‌شود.

۴- بر روی دیگی یک سوپاپ اطمینان نصب شده است که در فشار ۵ اتمسفر باز می‌شود. فشار جو محل یک اتمسفر است. دیگ پر از آب است و آن را حرارت می‌دهیم تا سوپاپ باز شود، اگر لحظه باز شدن سوپاپ درجه حرارت $100^{\circ}C$ باشد کدام گزینه صحیح است؟

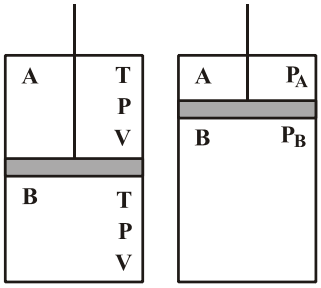
۱) فشار آب خروجی به یک اتمسفر می‌رسد و آب خروجی به بخار داغ تبدیل می‌شود.

۲) فشار آب خروجی به یک اتمسفر و آب خروجی به بخار اشباع تبدیل می‌شود.

۳) فشار آب خروجی به فشار تعادل می‌رسد و درجه حرارت آب افزایش می‌یابد.

۴) فشار آب خروجی به فشار تعادل می‌رسد و درجه حرارت آب خروجی کاهش می‌یابد.

۵- دو سیستم A و B شامل مایع و بخار اشباع آب با دمای T، فشار P و حجم V موجود است. پیستون را می‌توان به وسیله میله آب‌بندی شده‌ای تغییر مکان داد. طی یک تحول ایزوترمال پیستون را از حالت (۱) به حالت (۲) می‌آوریم. اگر دو سیستم جدید کماکان در حالت اشباع بوده و فشار آنها به ترتیب P_A و P_B باشد، کدام رابطه بین P_A، P_B و P_0 برقرار است؟



۱) $P_A > P_B$

۲) $P_A < P_B$

۳) $P_A = P_B = P$

۴) $P_A = P_B \neq P$

پاسخ تست‌های آخر فصل

۱- گزینه «۴»

Q داده شده، مقدار باقی مانده از مایع را بخار می‌کند. چون فرآیند فشار ثابت است پس گرما به تغییرات آنتالپی می‌انجامد.

$$\text{کیفیت} = x \Rightarrow \text{کسر مایع} = ۱-x \Rightarrow \text{جرم مایع} = m(۱-x)$$

$$m(۱-x)h_{fg} = Q$$

۲- گزینه «۱»

خواص ترمودینامیکی (Thermodynamic Properties) متغیر حالت می‌باشند و مستقل از مسیرند پس $\oint dx$ به علت استقلال از مسیر معادل $x_{final} - x_{initial}$ است و چون مسیر بسته است $x_{final} = x_{initial}$ پس $\oint dx = ۰$

۳- گزینه «۴»

وقتی آب و غذا درون قابلمه می‌جوشد نقطه‌ی جوش آب تقریباً در فشار اتمسفر اندازه گیری می‌شود ولی دیگ زودپز تا وقتی فشار آب درون آن به فشار باز شدن سوپاپ برسد به صورت حجم ثابت عمل می‌کند.

۴- گزینه «۲»

آب $۱۰۰^{\circ}C$ درون زودپز در فشار $۵atm$ است که به محض باز شدن سوپاپ، آب خروجی به فشار یک اتمسفر می‌رسد. چون دمای $۱۰۰^{\circ}C$ دمای اشباع آب در فشار $۱atm$ است پس آب خروجی ناگهان به حالت اشباع می‌رسد. اینکه کیفیت مخلوط اشباع خروجی چه مقدار است بستگی به اختلاف فشار $۱atm$ و $۵atm$ دارد همچنین برگشت ناپذیری‌های عمل خروج در آن نقش دارد.

۵- گزینه «۳»

چون A و B هر دو حالت اشباع قرار دارند و دمای آنها نیز ثابت می‌ماند پس فشار آنها هم باید ثابت بماند در نتیجه

$$p_A = p_B = p$$

(به یاد داریم که در حالت اشباع با داشتن یک مشخصه مثلاً دمای اشباع، مشخصه‌ی دیگر یعنی فشار اشباع نیز معین می‌شود مثلاً آب اشباع دمای $۵۰^{\circ}C$ حتماً در فشار $۱۲/۳۵kPa$ موجود است. اگر فشار ذره‌ای از این مقدار تخطی کند در حالی که دما ثابت بماند، یا وارد حالت مادون سرد می‌شویم و یا حالت فوق گرم.)