INSO
20831
1st. Edition
2015

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۲۰۸۳۱
چاپ اول
۱۳۹۴

# گاز طبیعی- ضریب همبستگی بین مقدار آب و نقطه شبنم آب

# Natural gas- Correlation between water content and water dew point

ICS:75.060

**به‌نام خدا**

## آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوز های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و موسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های فنی مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که موسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین‌ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)[1]،کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول تضمین کیفیت فرآورده‌ها و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای فرآورده‌های تولیدی داخل کشور و/ یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای فرآورده‌های کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری نماید. هم‌چنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و موسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سامانه‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان‌ها و موسسات را بر اساس ضوابط نظام تایید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تایید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گران‌بها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

---

1- International Organization for Standardization
2 - International Electrotechnical Commission
3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)
4 - Contact point
5 - Codex Alimentarius Commission

## کمیسیون فنی تدوین استاندارد

## «گاز طبیعی- ضریب همبستگی بین مقدار آب و نقطه شبنم آب»

| **رییس:** | **سمت و/ یا نمایندگی** |
|---|---|
| کیانفر، مریم<br>(کارشناسی ارشد شیمی فیزیک) | اداره کل استاندارد استان کرمان |
| **دبیر:** | |
| سهرج زاده، مریم<br>(کارشناسی ارشد شیمی فیزیک) | اداره کل استاندارد استان کرمان |
| **اعضا**: (اسامی به ترتیب حروف الفبا) | |
| احمدی، کامل<br>(کارشناسی ارشد مهندسی نفت) | شرکت ملی حفاری ایران |
| اخگر، محمد رضا<br>(دکترای شیمی آلی) | دانشگاه آزاد اسلامی کرمان |
| سیرمهنی، مینا<br>(کارشناسی شیمی کاربردی) | اداره استاندارد شهرستان سیرجان |
| صداقت، اصغر<br>(کارشناسی ارشد مهندسی نفت) | شرکت پتروسرویس |
| عسکری نیا، مانیا<br>(کارشناسی شیمی کاربردی) | اداره کل استاندارد استان کرمان |
| عطایی، سید احمد<br>(دکترای مهندسی شیمی) | دانشگاه شهید باهنر کرمان |
| قنبریان، مرضیه<br>(کارشناسی ارشد شیمی فیزیک) | اداره کل استاندارد استان لرستان |
| فقیهی، عاطفه<br>(کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی) | شرکت گاز استان کرمان |
| کولیوند، فرشاد<br>(دانشجوی دکترای مهندسی معدن) | دانشگاه لرستان |

هاشمی، مسلم
(کارشناسی ارشد مهندسی نفت)
پژوهشکده نفت، شرکت ملی حفاری ایران

## فهرست مندرجات


| عنوان | صفحه |
|---|---|
| آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران | ب |
| کمیسیون فنی تدوین استاندارد | ج |
| پیش‌گفتار | ه |
| ۱ هدف و دامنه کاربرد | ۱ |
| ۲ مراجع الزامی | ۱ |
| ۳ اصطلاحات و تعاریف | ۱ |
| ۴ ایجاد یک همبستگی | ۲ |
| ۵ دامنه کاربرد رابطه مذکور و احتمال همبستگی | ۳ |
| ۶ همبستگی | ۵ |
| پیوست الف (الزامی) اصول ترمودینامیکی | ۹ |
| پیوست ب (اطلاعاتی) قابلیت ردیابی | ۱۷ |
| پیوست پ (اطلاعاتی) مثال‌هایی از محاسبات | ۱۹ |
| پیوست ت (اطلاعاتی) زیرنویس‌ها، نمادها، ضریب تبدیل و اختصارات | ۲۱ |
| پیوست ث (اطلاعاتی) کتاب‌نامه | ۲۳ |

## پیش‌گفتار

استاندارد «گاز طبیعی- ضریب همبستگی بین مقدار آب و نقطه شبنم آب» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط سازمان ملی استاندارد ایران تهیه و تدوین شده و در پنجاه و پنجمین اجلاس کمیته ملی استاندارد فرآورده‌های نفتی مورخ ۹۴/۰۱/۲۵مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن‌ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارایه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO 18453: 2004, Natural gas- Correlation between water content and water dew point

**مقدمه**

این استاندارد ملی ایران یک رابطه واقعی بین مقدار آب و نقطه شبینم آب در گاز طبیعی را ارایه می‌دهد. روش محاسبه توسط گروه اروپایی تحقیقات گاز[1] توسعه یافته است و هم برای محاسبه درصد آب و هم نقطه شبنم آب قابل کاربرد است. اطلاعات مربوط به اصول ترمودینامیکی در پیوست الف ارایه شده است؛ اطلاعات مربوط به قابلیت ردیابی (پیش‌بینی)، کاربردها و عدم‌قطعیت‌های مربوط به این کار در پیوست ب ارایه شده است.

بعضی از مشکلات عملیاتی در صنایع نفت و گاز را می‌توان با تعیین مقدار آب در گازهای طبیعی ردیابی (پیش‌بینی) کرد. حتی با مقدار بخار آب خیلی کم در گاز، تغییر فشار عملیاتی و شرایط دمایی ممکن است موجب تراکم آب و درنتیجه هیدراته شدن، خوردگی و تشکیل یخ شود. برای اجتناب از این مشکلات، شرکت‌های گاز طبیعی باید واحدهای دی‌هیدراسیون گران‌قیمت نصب کنند. طراحی و هزینه این تاسیسات به شناخت دقیق مقدار آب در نقطه شبنم و (بر اساس قرارداد) مقدار رطوبت مورد نیاز بستگی دارد.

در دهه‌های اخیر، در نتیجه بهبود تجهیزات اندازه‌گیری رطوبت، ابزار بر روی تعیین مقدار آب به جای نقطه شبنم آب تمرکز کرده‌اند. بنابراین، اگر مقدار آب اندازه‌گیری شود، برای بیان نقطه شبنم آب، به یک همبستگی نیاز است.

گروه اروپایی تحقیقات گاز قبل از اعتبارسنجی همبستگی‌های موجود بین مقدار آب و نقطه شبنم، نیاز به ایجاد یک پایگاه داده از مقادیر آب اندازه‌گیری شده و نقاط شبنم آب متناظر با آن، برای تعدادی از گازهای طبیعی معرف در دامنه مد نظر، را تشخیص دادند.

متعاقباً نشان دادند که می‌توان دامنه عدم قطعیت همبستگی‌های موجود را بهبود بخشید.

بنابراین بر اساس پایگاه داده جدید، به‌صورت دقیق‌تر، یک همبستگی وابسته به ترکیب را به‌طور موفق توسعه دادند.

هدف این استاندارد ملی ایران استانداردسازی روند محاسبه توسعه داده شده توسط گروه اروپایی تحقیقات گاز برای رابطه بین مقدار آب و نقطه شبنم آب (و بالعکس) در میدان گاز طبیعی نوعاً برای انتقال محفوظ، است.

1 - Groupe Européen de Recherche Gazière (GRGE)

# گاز طبیعی- ضریب همبستگی بین مقدار آب و نقطه شبنم آب

## ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین روشی برای کاربران دارای یک رابطه معتبر ریاضی بین درصد آب و نقطه شبنم آب در گاز طبیعی است، مشروط بر این که یکی از این دو مورد معلوم باشند.

روش محاسبه که توسط گروه اروپایی تحقیقات گاز توسعه یافته است هم برای محاسبه درصد آب و هم نقطه شبنم آب به‌کار می‌رود.

این استاندارد عدم قطعیت همبستگی را مشخص می‌کند اما برای کمی‌سازی عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها کاربرد ندارد.

## ۲ مراجع الزامی

این بند در این استاندارد کاربرد ندارد.

## ۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف زیر به‌کار می‌رود.

### ۳-۱

**همبستگی**

رابطه بین دو یا چند متغیر تصادفی، درون توزیعی از دو یا چند متغیر تصادفی دیگر است.

استاندارد [ISO 3534-1]

**یادآوری-** شاخص دامنه دما، فشار و ترکیبی که همبستگی برای آن تایید شده است، در بند ۴ ارایه شده است.

### ۳-۲

**دامنه کاری[1]**

دامنه پارامترهایی که همبستگی برای آن تایید شده است.

### ۳-۳

**دامنه کاری بسط یافته[2]**

دامنه پارامترهایی که همبستگی برای آن بسط داده شده است اما خارج از آن دامنه، همبستگی برای آن اعتبارسنجی شده است.

---

1 - Working range
2 - Extended working range

**۴-۳**

**عدم قطعیت همبستگی[1]**

انحراف مطلق مقدار محاسبه‌شده از پایگاه داده ای آزمایشی است.

**یادآوری**- این مورد شامل عدم قطعیت اندازه‌گیری در محل نمی‌شود.

**۵-۳**

**فاکتور خروج از مرکز[2]**

پارامتری که خروج از مرکز یا غیرکروی بودن یک مولکول را مشخص می‌کند.

**یادآوری**- این تعریف از مرجع [۲۴] کتاب‌نامه گرفته شده است.

**۶-۳**

**شرایط مرجع نرمال[3]**

شرایط مرجع فشار، دما و رطوبت (حالت اشباع)، شرایط با فشار ۱۰۱٫۳۲۵kPa ، دمای مطلق ۲۷۳٫۱۵ درجه کلوین برای گاز خشک و واقعی است.

استاندارد [ISO 14532:2001]

**۶-۳**

**قابلیت ردیابی[4]**

حاصل نتیجه یک اندازه‌گیری یا یک مقدار از یک استاندارد، که به وسیله آن می‌توان آن نتیجه را به مراجع بیان شده ارتباط داد که این مراجع معمولاً استانداردهای ملی یا بین‌المللی هستند و این کار از طریق زنجیره پیوسته‌ای از مقایسه‌ها (که همگی دارای عدم قطعیت‌های بیان شده هستند)، انجام می‌شود.

## ۴ ایجاد یک همبستگی

در گذشته گروه اروپایی تحقیقات گاز، نیاز به یک تبدیل دقیق بین درصد آب و نقطه شبنم آب را برای گازهای طبیعی شناسایی کرده بود. برای رسیدن به این هدف، آن‌ها یک برنامه تحقیقاتی را تعریف کردند. در فاز اول پروژه داده‌های قابل اعتماد درباره درصد آب همراه با داده‌های مربوط به نقطه شبنم برای چندین گاز طبیعی در دامنه دمای نقطه شبنم مدنظر، گردآوری شد؛ دامنه دماهای نقطه شبنم بین ۱۵°C- تا ۵°C+ و دامنه فشار (مطلق) مدنظر بین ۰٫۵ مگاپاسکال تا ۱۰ مگاپاسکال بود. علاوه بر هفت مورد اندازه‌گیری روی گاز طبیعی، اندازه‌گیری‌هایی روی سامانه کلیدی دوگانه متان/آب انجام شد. روند استفاده‌شده برای گردآوری اطلاعات اندازه‌گیری روش اشباع است.

---

1 - Uncertainty of the correlation
2 - Acentric factor
3 - Normal reference conditions
4 - Traceability

با در نظر گرفتن مقادیر تعیین‌شده برای تکرارپذیری[1] و تجدیدپذیری[2] ابزار کارل فیشر[3] به عنوان معیارهای تطبیق، برای تمامی درصد مقادیر آب، فقط چند مقدار ناسازگار به‌دست آمد که عمدتاً در دامنه درصد کم مقادیر آب (دامنه فشار بالا، دمای کم) قرار می‌گیرند. مقادیری که در بازرسی سازگاری مردود شدند، یا مورد پذیرش قرار نگرفتند یا (در موارد کمی) در پایگاه داده‌ای وزن کم‌تری به آن‌ها نسبت داده شد. در موارد زیادی، این مقادیر توسط مقادیر حاصل از سایر سنجش‌ها، که با همان شرایط فشار و دما انجام می‌شوند، جایگزین شدند.

اطلاعات مفصل درباره روند بررسی و ترکیب گازهای طبیعی استفاده‌شده در طول آزمون‌ها را می‌توان در پژوهش گروه اروپایی تحقیقات گاز پیدا کرد.

اعتبار رابطه به‌دست آمده برای دماهای نقطه شبنم بین ۱۵°C تا ۵°C+ و فشارهای مطلق بین ۰٫۵ مگاپاسکال تا ۱۰ مگاپاسکال، مورد سنجش قرار گرفته است.

گازهای طبیعی معرف که برای اعتبارسنجی همبستگی استفاده می‌شوند به‌صورت عاری از گلیکول[4]، متانول[5]، هیدروکربن‌های مایع[6] و حداکثر ۵ میلی‌گرم بر مترمکعب $H_2S$ (در شرایط نرمال) نمونه‌گیری شدند. شدند. هیچ فعالیتی برای بررسی اثر عدم قطعیت‌های حاصل از دخالت چنین ناخالصی‌هایی به عمل نیامده است.

زمینه ترمودینامیکی ارتباط توسعه داده شده این امکان را فراهم می سازد تا دامنه کاربردی این ارتباط را به فراتر از دامنه کاری گسترش داده و به دماهای ۵۰°C- تا ۴۰°C+ و فشارهای مطلق ۰٫۱ مگاپاسکال تا ۳۰ مگاپاسکال، با عدم قطعیت‌های نامعلوم ارتقاء داده شود. هدف این است که همبستگی به عنوان رابطه‌ای متقابل بین درصد آب و نقطه شبنم آب تفسیر شود. یادآوری می شود که این رابطه در شرایط آزمایشگاهی با استفاده از چندین ترکیب از گاز طبیعی نمونه‌گیری‌شده از میادین گازی به‌دست آمده است. در شرایط عملیاتی میدانی، عدم قطعیت‌های قابل توجه دیگری نیز مطرح می‌شوند.

علاوه بر احتمال موجود در تبدیل اندازه‌گیری، عدم قطعیت‌های مقادیر اندازه‌گیری نیز باید مدنظر قرار گیرند.

حجم، تحت شرایط مرجع نرمال بیان می‌شود مگر این‌که، حالت غیر این موضوع به صراحت بیان شود (طبق بند ۳-۶).

## ۵ دامنه به‌کارگیری و عدم قطعیت همبستگی

### ۵-۱ دامنه کاری

1 - Repeatability
2 - Reproducibility
3 - Karl Fischer instrument
4 - Glycol
5 - Methanol
6 - Liquid hydrocarbon

دامنه کاری در محدوده دامنه‌های تعریف‌شده در بالا واقع می‌شود که عدم قطعیت‌های مرتبط با آن نیز به صورت زیر است:

الف- دامنه فشار: $۰/۵MPa \leq p \leq ۱۰MPa$

ب- دامنه دمای نقطه شبنم: $-۱۵°C \leq t \leq +۵\ °C$

پ- دامنه ترکیب: همبستگی، درصد آب و اجزا موجود در جدول ۱ را به عنوان پارامترهای ورودی می‌پذیرد. روش محاسبه برای آن دسته از گازهای طبیعی، قابل اعمال است که در محدوده‌های بیان شده در جدول ۱ صدق می‌کنند. نمونه‌هایی از تاثیر ترکیب در پیوست پ ارایه شده است.

**جدول ۱- دامنه ترکیب برای درصد ترکیب مولی**

| جز | درصد ترکیب مولی |
|---|---|
| متان ($CH_4$) | ≥۴۰/۰٪ |
| نیتروژن ($N_2$) | ≤ ۵۵/۰٪ |
| دی‌اکسید کربن ($CO_2$) | ≤ ۳۰/۰٪ |
| اتان ($C_2H_6$) | ≤ ۲۰/۰٪ |
| پروپان ($C_3H_8$) | ≤ ۴/۵٪ |
| ۲- متیل پروپان (C4H10) | ≤ ۱/۵٪ |
| n- بوتان ($C_4H_{10}$) | ≤ ۱/۵٪ |
| ۲/۲-دی‌متیل پروپان ($C_5H_{12}$) | ≤ ۱/۵٪ |
| ۲- متیل بوتان ($C_5H_{12}$) | ≤ ۱/۵٪ |
| n-پنتان ($C_5H_{12}$) | ≤ ۱/۵٪ |
| $C_{6+}$ (مجموع هگزان+ هیدروکربن بالاتر) ($C_6H_{14}$) | ≤ ۱/۵٪ |
| **یادآوری**- $C_{6+}$ به‌صورت n-هگزان رفتار می‌کند. | |

در محدوده دامنه مذکور در بالا، احتمال خطا به صورت زیر است:

- برای نقطه شبنم آب، که از درصد آب به‌دست آمده است: ±۲°C
- برای درصد آب به‌دست آمده با استفاده از نقطه شبنم آب:

$$\beta_w < ۵۸۰\ mg/m^3: \quad ۰/۱۴ + ۰/۰۲۱ \times \beta_w \pm ۲۰\ (mg/m^3) \qquad (۱$$

$$\beta_w \geq ۵۸۰\ mg/m^3: \quad -۱۸/۸۴ + ۰/۰۵۳۷ \times \beta_w \pm ۲۰\ (mg/m^3) \qquad (۲$$

برای استفاده از این فرمول به پیوست ب و مثال‌های ارایه شده در پیوست پ مراجعه شود.

**یادآوری**- تبدیل بین شرایط مرجع نرمال و شرایط مرجع استاندارد در مرجع شماره [۲۵] کتاب‌نامه ارایه شده است.

### ۵-۲ دامنه کاری بسط یافته

بسط دامنه کاربرد این رابطه ممکن است تا دامنه‌های زیر برون‌یابی شود، اما عدم قطعیت‌های مربوطه نامعلوم هستند.

الف- دامنه فشار: دامنه بسط‌یافته فشار (مطلق) $۰/۱MPa \leq p < ۰/۵MPa$ و $۱۰MPa < p \leq ۳۰MPa$.

ب- دامنه دما: دامنه بسط‌یافته تقطه شبنم $-۵۰°C \leq t < -۱۵ °C$ و $+۵°C < t \leq +۴۰°C$.

پ- دامنه ترکیب: دامنه اجزای ترکیب همانند دامنه بند ۵-۱ است.

## ۶ همبستگی

### ۶-۱ کلیات

روش همبستگی بر مبنای معادله حالت پنگ و رابینسون[1] (برای اطلاعات بیشتر به پیوست الف مراجعه شود) استوار است.

به منظور اطمینان از محاسبه دقیق فشار بخار آب بالای یخ و آب، تابع α جدید به دو بخش تقسیم می‌شود:

- دامنه دمایی ۲۲۳٫۱۵ درجه کلوین تا ۲۷۳٫۱۶ درجه کلوین یعنی داده‌های مربوط به فشار بخار بالای یخ.
- دامنه دمایی ۲۷۳٫۱۶ درجه کلوین تا ۳۱۳٫۱۵ درجه کلوین یعنی داده‌های مربوط به فشار بخار بالای آب مایع.

$$\alpha(T_R) = \left[1 + A_1\left(1 - T_R^{1/2}\right) + A_2\left(1 - T_R^{1/2}\right)^2 + A_3\left(1 - T_R^{1/2}\right)^4\right]^2$$

که در آن:

$T_R$ دمای کاهش‌یافته است که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_R = \frac{T}{T_{crit}}$$

ضرایب تابع α جدید به‌صورت زیر هستند.

الف- برای دامنه: $۲۲۳٫۱۵K \leq T < ۲۷۳٫۱۶K$

۱) $A_1 = ۰٫۱۰۶۰۲۵$ ۲) $A_2 = ۲٫۶۸۳۸۴۵$ ۳) $A_3 = -۴٫۷۵۶۳۸$

ب- برای دامنه: $۲۷۳٫۱۶K \leq T < ۳۱۳٫۱۵K$

۱) $A_1 = ۰٫۹۰۵۴۳۶$ ۲) $A_2 = -۰٫۲۱۳۷۸۱$ ۳) $A_3 = ۰٫۲۶۰۰۵$

یک تخمین معتبر برای پارامتر، از یک مجموعه مناسب از داده‌های مربوط به تعادل بخار- مایع[2] به‌دست آمد. پارامترهای بهینه برای پارامترهای دوتایی $k_{ij}$، با برآوردن کردن یک معیار آماری مشخص (حداقل‌سازی یک تابع هدف از طریق الگوریتم حداقل مجموع مربعات[3]) حاصل می‌شود. برای سامانه‌های دوتایی مانند آب/دی اکسید کربن، متان/ آب و اتان/آب لازم است پارامترهای برهم‌کنش وابسته به دما را برای به‌دست آوردن تبیینی رضایت‌بخش از تعادل بخار- آب وارد نمود. وابستگی دمایی به‌صورت زیر است:

$$k_{ij}(T) = k_{ij,0} + k_{ij,1}\left(\frac{T}{273,15} - 1\right)$$

1 - Peng and Robinson equation
2 - Vapour-Liquid equilibria
3 - Least squares fit algorithm

این تعریف از $k_{ij}(T)$ این مزیت را دارد که $k_{ij}$ وقتی که دما برابر با صفر درجه سلسیوس است، مساوی با $k_{ij,0}$ اسـت. پارامترهای سامانه دوتایی آب[1] برای دامنه کاری بسط‌یافته این همبستگی بهینه‌سازی شدند (۴۰°C+ > t ≥ ۵۰°C-). برون‌یابی داده‌ها فراتر از دامنه کاری بسط‌یافته مجاز نیست.

داده‌های اجزا خالص در جدول ۲، و مروری مختصر بر کل پارامترهای برهم‌کنش دوتایی، در جدول ۳ ارایه شده است.

**جدول ۲- داده‌های اجزای خالص (ویژگی‌های ترکیب شده مورد استفاده در محاسبات)**

| ترکیب | ω | $p_c$ | $T_c$ | منبع |
|---|---|---|---|---|
| آب ($H_2O$) | ۰٫۳۴۴۳۷ | ۲۲۰٫۶۴ | ۶۴۷٫۱۴ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن ($N_2$) | ۰٫۰۳۵۹۳ | ۳۳٫۹۹ | ۱۲۶٫۲۶ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن ($CO_2$) | ۰٫۲۲۳۹۴ | ۷۳٫۸۶ | ۳۰۴٫۲۱ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| متان ($CH_4$) | ۰٫۰۱۱۴ | ۴۵٫۹۹ | ۱۹۰٫۵۵ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| اتان ($C_2H_6$) | ۰٫۰۹۹۰۹ | ۴۸٫۷۲ | ۳۰۵٫۳۳ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| پروپان ($C_3H_8$) | ۰٫۱۵۶۱۱ | ۴۲٫۴۶ | ۳۶۹٫۸۵ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| ۲- متیل پروپان (i-C4H10) | ۰٫۱۸۴۶۵ | ۳۶٫۴ | ۴۰۷٫۸۵ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| n- بوتان ($n\text{-}C_4H_{10}$) | ۰٫۱۹۷۷۷ | ۳۷٫۸۴ | ۴۲۵٫۱۴ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| ۲٫۲-دی‌متیل پروپان($neo\text{-}C_5H_{12}$) | ۰٫۱۹۵۲۸ | ۳۱٫۹۶ | ۴۳۳٫۷۵ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| ۲- متیل بوتان($i\text{-}C_5H_{12}$) | ۰٫۲۲۶۰۶ | ۳۳٫۷ | ۴۶۰٫۳۹ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| n-پنتان($n\text{-}C_5H_{12}$) | ۰٫۲۴۹۸۳ | ۳۳٫۶۴ | ۴۶۹٫۶۹ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| n- هگزان ($n\text{-}C_6H_{14}$) | ۰٫۲۹۶ | ۳۰٫۲ | ۵۰۷٫۸۵ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |

ω فاکتور خروج از مرکز است.

$p_c$ فشار بحرانی است که برحسب بار بیان می‌شود.

$T_c$ دمای بحرانی است که برحسب کلوین بیان می‌شود.

## ۶-۲ پارامترهای ورودی و خروجی

### ۶-۲-۱ ورودی

پارامترهای ورودی برای تعیین ضریب همبستگی درصد آب/ نقطه شبنم آب عبارتند از:

الف- ترکیب گاز خشک (درصد مولی)؛

ب- فشار مطلق (بار)؛

پ- درصد آب (میلی‌گرم بر مترمکعب) یا نقطه شبنم آب (درجه سلسیوس).

### ۶-۲-۲ خروجی

همبستگی یا نقطه شبنم آب (درجه سلسیوس) یا درصد آب (میلی‌گرم بر مترمکعب) را محاسبه می‌نماید.

1 - Binary water system

**جدول ۳- پارامترهای برهم‌کنش دوتایی**

| جز i | جز j | $K_{ij,0}$ | $K_{ij,1}$ | منبع |
|---|---|---|---|---|
| آب | نیتروژن | ۰/۴۸۰۰ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | دی‌اکسید کربن | ۰/۱۸۴ | ۰/۲۳۶ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | متان | ۰/۶۵۱ | -۱/۳۸۵ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | اتان | ۰/۶۳۵ | -۰/۹۳ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | پروپان | ۰/۵۳ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | n- بوتان | ۰/۶۹ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | n- پنتان | ۰/۵ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | n- هگزان | ۰/۵ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | ۲-متیل پروپان | ۰/۶۹ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۰/۵ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| آب | ۲-متیل بوتان | ۰/۵ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | دی‌اکسید کربن | -۰/۰۱۷۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | متان | ۰/۰۳۱۱ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | اتان | ۰/۰۵۱۵ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | پروپان | ۰/۰۸۵۲ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | n- بوتان | ۰/۰۸۰۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | n- پنتان | ۰/۱۰۰۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | n- هگزان | ۰/۱۴۹۶ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | ۲-متیل پروپان | ۰/۱۰۳۳ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۰/۰۹۳۰ | ۰ | بند ۲ کتاب‌نامه |
| نیتروژن | ۲-متیل بوتان | ۰/۰۹۲۲ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | متان | ۰/۰۹۱۹ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | اتان | ۰/۱۳۲۲ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | پروپان | ۰/۱۲۴۱ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | n- بوتان | ۰/۱۳۳۳ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | n- پنتان | ۰/۱۲۲۲ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | n- هگزان | ۰/۱۱۰۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | ۲-متیل پروپان | ۰/۱۲۰۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۰/۱۲۶۰ | ۰ | بند ۳ کتاب‌نامه |
| دی‌اکسید کربن | ۲-متیل بوتان | ۰/۱۲۱۹ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| متان | اتان | -۰/۰۰۲۶ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| متان | پروپان | ۰/۰۱۴۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| متان | n- بوتان | ۰/۰۱۳۳ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| متان | n- پنتان | ۰/۰۲۳۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| متان | n- هگزان | ۰/۰۴۲۲ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |

**جدول ۳ (ادامه)**

| جز i | جز j | $K_{ij,0}$ | $K_{ij,1}$ | منبع |
|---|---|---|---|---|
| متان | ۲-متیل پروپان | ۰/۰۲۵۶ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| متان | ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۰/۰۱۸۰ | ۰ | بند ۳ کتاب‌نامه |
| متان | ۲-متیل بوتان | -۰/۰۰۵۶ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| اتان | پروپان | ۰/۰۰۱۱ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| اتان | n- بوتان | ۰/۰۰۹۶ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| اتان | n- پنتان | ۰/۰۰۷۸ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| اتان | n- هگزان | -۰/۰۱۰۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| اتان | ۲-متیل پروپان | -۰/۰۰۶۷ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| اتان | ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۰/۰۲۳۰ | ۰ | بند ۳۵ کتاب‌نامه |
| اتان | ۲-متیل بوتان | ۰/۰۱۶۰ | ۰ | بند ۳۵ کتاب‌نامه |
| پروپان | n- بوتان | ۰/۰۰۳۳ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| پروپان | n- پنتان | ۰/۰۲۶۷ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| پروپان | n- هگزان | ۰/۰۰۰۷ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| پروپان | ۲-متیل پروپان | -۰/۰۰۷۸ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| پروپان | ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۰ | ۰ | |
| پروپان | ۲-متیل بوتان | ۰/۰۱۱۱ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| ۲-متیل پروپان | n- بوتان | -۰/۰۰۰۴ | ۰ | بند ۳۱ کتاب‌نامه |
| ۲-متیل پروپان | n- پنتان | ۰ | ۰ | |
| ۲-متیل پروپان | n- هگزان | ۰ | ۰ | |
| ۲-متیل پروپان | ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۰ | ۰ | |
| ۲-متیل پروپان | ۲-متیل بوتان | ۰ | ۰ | |
| n- بوتان | n- پنتان | ۰/۰۱۷۴ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| n- بوتان | n- هگزان | -۰/۰۰۵۶ | ۰ | بند ۳۱و ۵ کتاب‌نامه |
| n- بوتان | ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۰ | ۰ | |
| n- بوتان | ۲-متیل بوتان | ۰ | ۰ | |
| ۲/۲-دی‌متیل پروپان | ۲-متیل بوتان | ۰ | ۰ | |
| ۲/۲-دی‌متیل پروپان | n- پنتان | ۰ | ۰ | |
| ۲/۲-دی‌متیل پروپان | n- هگزان | ۰ | ۰ | |
| ۲-متیل بوتان | n- پنتان | ۰/۰۶۰ | ۰ | بند ۳۶ کتاب‌نامه |
| ۲-متیل بوتان | n- هگزان | ۰ | ۰ | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| n- پنتان | n- هگزان | ۰ | ۰ | |

# پیوست الف
# (الزامی)
# اصول ترمودینامیکی

**یادآوری**- این پیوست جزییات بیش‌تری درباره بند ۶ و مرجع بند [۱] کتاب‌نامه ارایه می‌کند و برنامه رایانه‌ای برای محاسبه درصد آب یا نقطه شبنم آب را توضیح می‌دهد.

## الف-۱ ترمودینامیک تعادل فازی

### الف-۱-۱ کلیات

اصل دوم ترمودینامیک حالت تعادل ترمودینامیکی یک سامانه بسته را به عنوان حالت حداکثر آنتروپی بیان می‌کند. آنتروپی یک سامانه بسته که با S نمایش داده می‌شود، فقط می‌تواند افزایش یابد و در نتیجه حالت اولیه تعادل یک سامانه بسته، پایدار است.

وقتی سامانه در ناحیه تعادل بر هم خورد به محض این‌که عامل آشفتگی از بین رود به حالت تعادل خود برمی‌گردد. در مواردی، بازگشت به تعادل می‌تواند مدت زمانی نامتناهی صورت گیرد که این حالت را پایداری مجانبی گویند. بنابراین شرایط تعادل را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

**الف۱**

$$\Delta S < 0$$

این آشفتگی در تمامی مرتبه‌ها می‌تواند ایجاد شود:

**الف۲**

$$\Delta S = \delta S + \frac{1}{2!}\delta^2 S + \frac{1}{3!}\delta^3 S + \frac{1}{4!}\delta^4 S + \cdots$$

در این رابطه δ شکل دیفرانسیلی را نشان می‌دهد.

وقتی که تمامی جملات با درجه بزرگ‌تر از ۱ منفی باشند:

**الف۳**

$$\Delta S = 0 \quad \text{و} \quad \delta^2 S < 0 \delta^3 S < 0 \delta^4 S < \cdots$$

که در این حالت گفته می‌شود تعادل پایدار است.

وقتی که جمله درجه دوم مثبت باشد:

**الف۴**

$$\delta^2 S > 0 \quad \text{و} \quad \Delta S = 0$$

گفته می‌شود که تعادل ناپایدار است.

وقتی که برخی از جملات با درجه بالاتر مثبت باشند:

**الف۵**

$$\Delta S = 0 \quad \text{و} \quad \delta^2 S < 0 \quad \text{اما} \quad \delta^3 S > 0 \delta^4 S > 0$$

که در این حالت گفته می‌شود تعادل فوق‌پایدار است.

یک حد فوق‌پایدار به صورت معادله الف۶ تعریف می‌شود:

**الف۶**

$$\delta^2 S = 0$$

بررسی و مطالعه حالت ترمودینامیکی یک سامانه بر اساس پتانسیل‌های ترمودینامیکی صورت می‌گیرد؛ یعنی انرژی آزاد گیبس[1] (G) در دما و فشار ثابت که حالت تعادل به وسیله حداقل مقابل تعریف می‌شود:

**الف۷**

$$D2G > 0 \quad \text{و} \quad dG = 0$$

به همین منوال، در دمای ثابت T و حجم ثابت V حالت تعادل به صورت حداقل انرژی آزاد هلمهولتز[2] (A) تعریف می‌شود. برای سامانه‌ای که شامل (nc) جز متشکله است که در (nΦ) فاز توزیع شده‌اند حداقل‌سازی انرژی آزاد به‌صورت معادله الف۸ است:

**الف۸**

$$G = \sum_{j=1}^{n\Phi} \sum_{i=1}^{nc} n_{ij} \mu_{ij}$$

که محدودیت‌های زیر را دارا است:

**الف۹**

$$\sum_{j=1}^{n\Phi} n_{ij} = n_i$$

که در آن‌ها:

$n_i$ تعداد کل مول‌های جز i؛

$n_{ij}$ تعداد مول‌های جز i در فاز j؛

$\alpha_{ij}$ پتانسیل شیمیایی جز i در فاز j .

بنابراین جستجوی مستقیم برای یک حالت پایدار، حداقل‌سازی تابعی از متغیرهای (nc وnφ) تحت محدودیت‌های (nc) است. سادگی این شیوه بیان دشواری‌های عملی چنین جستجویی را رفع می‌کند.

با اعمال قانون اول ترمودینامیک برای سامانه‌های بسته متجانس، مخصوصاً برای سیال‌های با ترکیب ثابت یا خالص، معادله الف۱۰ به دست می‌آید:

**الف۱۰**

$$dU = dW + dQ$$

در فرایند بازگشت‌پذیر و قانون دوم ترمودینامیک دو معادله زیر وجود دارد:

**الف۱۱**

$$dQ = TdS$$

و

**الف۱۲**

$$dW = -\,pdV$$

با ترکیب معادلات الف۱۰، الف۱۱ و الف۱۲، معادله الف۱۳ به دست می‌آید.

1 - Gibbs' free energy
2 - Helmholtz free energy

$$dU = TdS - pdV$$ **الف۱۳**

یک سامانه بسته نامتجانس شامل دو یا چند فاز است. در چنین سامانه‌ای هر فاز ممکن است به عنوان یک سامانه باز متجانس درنظر گرفته شود، چون هر جز در سامانه ممکن است در خارج از مرزهای فاز از یک فاز به فاز دیگر حرکت کند.

انرژی داخلی یا درونی U یک سامانه باز متجانس به متغیرهای دیگری بستگی دارد: مقدار هر جز در سامانه. مقدار هر جز ممکن است توسط تعداد مول‌های موجود از آن جز نشان داده شود.

برای یک سامانه باز شامل N جزء رابطه زیر وجود دارد:

$$U = U(S,V,n_1,n_2,...n_N)$$ **الف۱۴**

با اعمال قانون زنجیری مشتق روی معادله الف۱۴ برای به‌دست آوردن دیفرانسیل کلی، معادله زیر به دست می‌آید:

$$dU = \left(\frac{\delta U}{\delta S}\right)_{V,n} dS + \left(\frac{\delta U}{\delta V}\right)_{S,n} dV + \sum_i^N \left(\frac{\delta U}{\delta n_i}\right)_{S,V,n_j} dn_i$$ **الف۱۵**

که j تمامی اجزا به غیر از i را نشان می‌دهد. چون

$$\left(\frac{\delta U}{\delta S}\right)_{V,n} = \left(\frac{\delta U}{\delta S}\right)_{V} = T$$
$$\left(\frac{\delta U}{\delta V}\right)_{S,n} = \left(\frac{\delta U}{\delta V}\right)_{S} = -p$$ **الف۱۶**

در نتیجه با ترکیب معادلات الف۱۵ و الف۱۶، معادله الف۱۷ حاصل می‌شود:

$$dU = TdS - pdV + \sum_i^N \left(\frac{\delta U}{\delta n_i}\right)_{S,V,n_j} dn_i$$ **الف۱۷**

مشتق جزیی از $\left(\frac{\delta U}{\delta n_i}\right)_{S,V,n_j}$ را پتانسیل شیمیایی می‌نامند و معمولاً توسط $\mu_i$ نشان داده می‌شود.

$$\mu_i = \left(\frac{\delta U}{\delta n_i}\right)_{S,V,n_j}$$ **الف۱۸**

در سال ۱۹۲۳، جی. ان. لوئیس[1] مفهوم فوگاسیته (بی دوامی) (*f*) را مطرح کرد که معادل با پتانسیل شیمیایی است و برحسب واحد فشار بیان می‌شود.

$$d\mu_i = RTd(\ln f_i)$$ **الف۱۹**

1 - G.N. Lewis

در گازهای واقعی، فوگاسیته را می‌توان به عنوان فشار جزیی اصلاحی در نظر گرفت که توسط ضریب فوگاسیته نشان داده می‌شود:

$$\varphi_i = \left(\frac{f_i}{x_{i,v} \times p}\right) \qquad \text{الف۲۰}$$

که در این رابطه $x_{i,v}$ درصد مولی یک جز i در فاز بخار مدنظر است.

ضریب فوگاسیته انحراف از قانون گاز ایده‌آل را نشان می‌دهد. بنابراین، برای گازهای ایده‌آل ضریب فوگاسیته باید برابر با یک باشد.

**الف-۱-۲ شرایط تعادل**

برابری پتانسیل‌های شیمیایی برای هر جز در دو فاز شرط لازم برای تعادل است:

$\mu_{i,l} = \mu_{i,v}$ برای هر i = 1 تا i = nc

همین قضیه برای فوگاسیته‌های زیر صادق است:

$f_{i,l} = f_{i,v}$ برای هر i = 1 تا i = nc

و همچنین برای دماها و فشار نیز برقرار است:

$T_{i,l} = T_{i,v}$ برای هر i = 1 تا i = nc

بیشتر الگوریتم‌های محاسباتی متکی بر این شرایط هستند.

وقتی این شرایط حاصل شد، ضرایب تعادل با نسبت ضرایب فوگاسیته شناسایی می‌شوند:

$$K_i = \frac{\varphi_{i,l}}{\varphi_{i,v}}$$ برای هر i = 1 تا i = nc

در سامانه تعادلی دو جزیی بخار- مایع (شاخص v = بخار و l = مایع است) مجموعه معادلات به‌صورت زیر تقلیل می‌یابند:

$$T^l = T^v$$
$$p^l = p^v$$
$$f_i^l = f_i^v$$ برای هر $i$=۱و۲ الف۲۱

یک شرط تعادل (معادله الف۷) را می‌توان برای هر جز i از تعادل جرم (الف۲۱) با استفاده از تعریف ضریب فوگاسیته (الف۲۰) استخراج نمود که در این رابطه $x_i$ درصد مولی جز i در فاز مایع و $y_i$ درصد مولی در فاز گازی است.

$$\varphi_i^l x_i = \varphi_i^v y_i (i = 1....N) \qquad \text{الف۲۲}$$

رابطه بین ضریب فوگاسیته یک جز i در هر فازی و متغیرهای حالت این فاز معمولاً با معادلات حالت حرارت ارتباط دارند. برای یک معادله حالت که صریحاً به‌صورت فشاری بیان شده است ضریب فوگاسیته معادله زیر را می‌خواند:

$$\ln\varphi_i = \frac{1}{RT}\int_V^{\infty}\left[\left(\frac{\partial p}{\partial n_i}\right)_{T,V,n_{j\neq 1}} - \frac{RT}{V}\right]\mathrm{d}V - \ln Z$$ **الف۲۳**

که فاکتور تراکم‌پذیری Z به‌صورت معادله الف۲۴ است.

$$Z = \frac{pV}{nRT}$$ **الف۲۴**

فاکتور تراکم‌پذیری معیاری از انحراف از قانون گاز ایده‌آل است که در گاز ایده‌آل مقدار Z برابر با ۱ است.

## الف-۲ معادلات حالت

### الف-۲-۱ اجزای خالص

معادلات حالت حرارت رابطه‌ای بین فشار p، حجم V و دما T برای یک جز خالص را بیان می‌کند.

$$f(p,V,T) = 0$$ **الف۲۵**

ساده‌ترین معادله حالت قانون گاز ایده‌آل است:

$$pV = nRT$$ **الف۲۶**

مدل گاز ایده‌آل بر اساس این فرضیات استوار است که ملکول‌ها با یکدیگر برهم‌کنش ندارند و حجم ذاتی‌شان قابل اغماض است. بنابراین قانون گاز ایده‌آل فقط برای دانسیته‌های کم معتبر است که این فرضیات (تقریباً) اثبات شده‌اند. به خاطر نادیده گرفتن نیروهای جاذبه بین ملکول‌ها، فازهای میعان‌یافته را نمی‌توان با این مدل توضیح داد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، معادلات حالت زیادی ارایه شده‌اند که شامل قانون گاز ایده‌آل به عنوان شرط مرزی هستند. این معادلات را می‌توان به چند گروه زیر تقسیم نمود:

- معادلات نیمه تجربی (مکعبی) مانند معادلات پنگ – رابینسون، سوآو-ردلیخ- کونگ[1] و غیره؛
- معادلات ویریال، که معادله ویریال تنها معادله نظری از این دسته است؛
- محاسبات pVT بر اساس اصل حالات متناظر؛
- معادلات مبتنی بر ترمودینامیک آماری.

در این پیوست فقط یک بخش انتخابی از این گروه‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. تاکید اصلی بر معادلات تجربی (مکعبی) است که اساس روش محاسباتی جدید (BWT) است. برای توضیحات بیشتر به نوشته‌های دورن، والاس و آندرکو مراجعه کنید.

اولین معادله حالت توسط واندروالس[2] در سال ۱۸۷۳ ارایه شد (معادله ۲۷):

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT$$

یا

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2} = P_{\text{دفع}} + P_{\text{جذب}}$$ **الف۲۷**

1 - Soave-Redlich-Kwong
2 - J.D. Van der Waals

نیروهای جاذبه بین ملکول‌ها توسط جمله اصلاحی فشار $-\frac{a}{V_m^2}$ لحاظ شده‌اند.

کمیت b که هم‌حجمی (کووالوم) نامیده می‌شود معیاری برای حجم ذاتی ملکول‌ها است که مشخصه نیروهای دافعه است. معادله واندروالس[1] (VDW) اولین معادله حالت بود که جانشین یک باز تولید کمی از رفتار سیالات در فازهای گازی و مایع به طور هم‌زمان شد (فقط با یک معادله). اما مشخص شد که این معادله در اغلب کاربردها دقت کافی ندارد. بنابراین، معادلات مکعبی زیادی در قرن اخیر توسعه داده شد که اغلب به جملات نیروهای دافعه و جاذبه تقسیم می‌شود. اگرچه بسیاری از این اصلاحات از جنبه‌های زیادی با همدیگر متفاوتند اما می‌توان آنها را در یک ساختار کلی پنج پارامتری گنجاند.

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{\theta\left(V_m - \eta\right)}{\left(V_m - b\right)\left(V_m^2 + \delta V_m + \varepsilon\right)}$$ **الف۲۸**

متغیرهای θ، δ، ε و η برای برخی از مهم‌ترین معادلات مکعبی حالت، در جدول الف۱ ارایه شده است.

**جدول الف۱- متغیرهای معادله الف۲۸**

| معادله حالت | مخفف | θ | δ | ε | η |
|---|---|---|---|---|---|
| وان در والس (۱۸۷۳) [۴۱] | VDW | a | ۰ | ۰ | b |
| سوآو-ردلیخ- کونگ (۱۹۷۲) [۴۲] | SRK | a(T) | b | ۰ | b |
| پنگ- رابینسون (۱۹۷۶) [۴۳] | PR | a(T) | ۲b | $-b^{۲}$ | b |
| پاتل- تجا (۱۹۸۲) [۴۰] و [۴۴] | PT | a(T) | b+c | -cb | b |

برای معادلات دوپارامتری، هر دو پارامتر (a و b) را می‌توان از شرط نقطه بحرانی تعیین کرد. خط هم‌دمای[2] بحرانی یک سیال خالص در نمودار p – V در نقطه بحرانی، یک نقطه زینی است.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V_m}\right)_{T=T_{\text{crit}}} = 0; \qquad \left(\frac{\partial^2 p}{\partial V_m^2}\right)_{T=T_{\text{crit}}} = 0;$$ **الف۲۹**

برای معادلات با بیش از دو پارامتر، شرایط مرزی دیگری را باید تعریف کرد.

در میان تمامی اصلاحاتی که روی معادله واندروالس انجام شده است معادله پنگ- رابینسون از بقیه مهم‌تر است. این معادله که در اصل برای سامانه‌های میعان گازی ارایه شد به عنوان ابزاری استاندارد کاربردهای

1 - Van der Waals
2 - Isotherm

زیادی یافته است. در مقایسه با معادله VDW معادله PR فقط دارای جمله اصلاحی جاذبه است. معادله PR به‌صورت معادله الف۳۰ است:

$$p(T,V_m)=\frac{R\times T}{V_m-b}-\frac{a(T)}{V_m^2+2bV_m-b^2}$$ **الف۳۰**

بر اساس شرایط نقطه بحرانی داریم:

$$a(T_{\text{crit}})=0{,}457\,24\times\frac{R^2\times T_{\text{crit}}{}^2}{p_{\text{crit}}}$$ **الف۳۱**

$$b(T_{\text{crit}})=0{,}077\,80\times\frac{R\times T_{\text{crit}}}{p_{\text{crit}}}$$ **الف۳۲**

برای دماهایی که با $T_{crit}$ متفاوت‌اند، تابعی وابسته به دما ($T_R$) معرفی می‌شود تا باز تولید بهتری از منحنی فشار بخار به دست آید.

$$\alpha(T)^{1/2}=\alpha(T_{\text{crit}})\cdot\alpha(T_{\text{R}})$$ **الف۳۳**

$$T_{\text{R}}=\frac{T}{T_{\text{crit}}}$$ **الف۳۴**

جمله $T_R$ تابعی بدون بعد از دمای کاهش یافته است. در دمای بحرانی، این مقدار یک خواهد شد. پارامتر b معادله PR مستقل از دماست. پنگ و رابینسون شکل تابعی برای این جمله با استفاده از فشارهای بخار در مقالات منتشره در این زمینه پیدا کردند. آنها یک رابطه خطّی بین $\alpha^{0.5}$ و $TR^{0.5}$ پیدا کردند.

$$\alpha(T_{\text{R}})^{1/2}=1+\kappa\left(1-T_{\text{R}}{}^{1/2}\right)$$ **الف۳۵**

ضریب k یک ثابت ویژه ماده است که با استفاده از فاکتور خروج از مرکز ω تعمیم داده شده است:

$$k = ۰٫۳۷۴۶۴ + ۱٫۵۴۲۲۶\,\omega - ۰٫۲۶۹۹۲\,\omega^{۲}$$ **الف۳۶**

### الف-۲-۲ مخلوط‌ها

برای استفاده از معادلات حالت، جهت محاسبات خصوصیات مخلوط‌ها، پارامترهای معادله (a, b, …) ترکیبات خالص باید توسط پارامترهای مخلوط جایگزین شوند ($a_m$, $b_m$, …). رابطه بین پارامترهای مخلوط و پارامترهای ترکیبات خالص، توسط قوانین مخلوط‌ها مشخص می‌شود. این روش بر اساس نظریه "تک‌سیالی" استوار است. بر اساس این نظریه فرض می‌شود که یک سیال خالص (فرضی) وجود دارد که (تحت شرایط مشخص فشار و دمایی) مشابه به مخلوط عمل می‌کند. ساده‌ترین قوانین موجود درباره مخلوط‌ها قوانین تقارن هستند که توسط واندروالس ارایه شدند. برای معادله حالت دوپارامتری این قوانین به‌صورت زیر هستند:

$$a_M(T)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}x_i x_j a_{ij}(T)$$ **الف۳۷**

$$b_M = \sum_{i=1}^{n} x_i b_i$$ الف۳۸

$$a_{ij}(T) = \sqrt{a_{ii} a_{jj}}\left(1 - k_{ij}\right)$$ الف۳۹

$$k_{ij} = k_{ji}$$ الف۴۰

$$k_{ii} = k_{jj} = 0$$ الف۴۱

درصد مولی $x_i$ چندین جز در مخلوط به عنوان فاکتور وزنی برای پارامترها به کار می‌رود. همچنین ضرایب ضربی $a_{ij}$ جمله a با پارامتر برهم‌کنش دوتایی $k_{ij}$ تصحیح شدند. این مقادیر $k_{ij}$ اغلب با تطابق با داده‌های تعادل مایع- بخار مخلوط‌های دوتایی تعیین می‌شوند. اگرچه در اکثر موارد پارامترهای برهم‌کنش فقط مقادیر کوچکی هستند اما آن‌ها اثر شدیدی روی بازتولید این تعادل‌ها خصوصاً در فشارهای بالا دارند. در مقالات منتشره در این زمینه، قوانین مخلوط شدن زیادی وجود دارد که اصلاحاتی نیز روی آن‌ها صورت گرفته است و فواید خاصّی دارند (برای مثال به مراجع بندهای [۴۶]، [۴۷] و [۵۱] کتاب‌نامه مراجعه شود).

### الف-۳ رفتار فازی

از شرایط تعادل مستقیما این نتیجه حاصل می‌شود که برخی از متغیرهای حالت و ترکیبات در فازهای مختلف را نمی‌توان به صورت مستقل برای یک سامانه که در حالت تعادل است؛ انتخاب نمود. برای یک سامانه نامتجانس تعداد متغیرهای آزاد قابل انتخاب توسط قانون فازی گیبس تعیین می‌شود.

$$F = ۲ - P + N$$ الف۴۲

که در آن:

F تعداد درجه آزادی؛

N تعداد ترکیبات؛

P تعداد فازها.

با این قانون فازی (معادله الف۲۵)، می‌توان به این نتیجه رسید که حیاتی‌ترین کمیت‌ها برای درصد آب در فاز گازی فشار، دما و ترکیب گاز هستند. این کمیت‌های اصلی بر نیروهای بین ملکولی و تعادل فازی تاثیر می‌گذارند. اثر ترکیب گازی شدیداً به مواد موجود در گاز خصوصاً در مخلوط‌های گازی با خصوصیات ملکولی شدیداً مختلف بستگی دارد. از این نظر، کمیتی اساسی توزیع بار ملکولی است. این توزیع بار بر تعادل فازی خصوصاً در دانسیته‌های بالا یعنی در فشارهای زیاد یا در فاز مایع تاثیر دارد. هیدروکربن‌ها که در گازهای طبیعی وجود دارند موادی غیرقطبی و یا قطبی بسیار ضعیف هستند. با وجود این آب به خاطر ممان قطبی بالا، جزو مواد شدیداً قطبی است. پیوند هیدروژنی بین ملکول‌های آب در فاز مایع متراکم موجب تشکیل هیدرات‌های گازی می‌شود (کلاترات‌ها).

## پیوست ب
## (اطلاعاتی)
## قابلیت ردیابی

### ب-۱ کلیات

همبستگی بر اساس تعیین اولیه درصد آب با استفاده از یک روش آزمون مناسب استوار است که با استفاده از این همبستگی می‌توان یک نقطه شبنم برای آب به‌دست آورد که با درنظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی در بندهای ب-۲ تا ب-۴ پیوست ب ارایه شده است.

### ب-۲ قابلیت ردیابی

این همبستگی خاص فقط از آن جهت مدنظر قرار گرفته است که وقتی که با یک پارامتر ورودی، کار آغاز می‌شود، عبارتی قابل ردگیری به دست دهد که بتوان نتیجه حاصل از آن را مستقیماً از طریق زنجیره‌ای پیوسته از مقایسات با یک استاندارد ملّی یا بین‌المللی مقایسه نمود.

به علّت وجود ناخالصی‌ها در گاز طبیعی و رفتار غیر ایده‌آل در فشارهای بالا، نتیجه تعیین مستقیم نقطه شبنم آب را نمی‌توان با نتیجه حاصل از یک روش استاندارد بین‌المللی بدون در نظر گرفتن خطاهای چشمگیری که قابلیت کمیت‌پذیری ندارند مقایسه نمود.

بنابراین استفاده از یک مقدار برای نقطه شبنم که در میدان گازی به عنوان پارامتر ورودی تعیین شده است عبارتی قابل ردیابی برای درصد آب به دست نمی‌دهد. هم‌چنین عبارتی برای خطا باید مشخص شود تا عدم قطعیت خطای مرتبط با تعیین مستقیم میدانی نقطه شبنم را بازتاب دهد مانند تغییرات در دما، فشار و روش آزمون که در هر نقطه نمونه‌گیری اعمال می‌شود.

در میان همه فاکتورها، دمایی که در آن هر گونه میعانی آغاز می‌شود (نقطه شبنم) توسط ناخالصی‌های موجود در جریان گاز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بنابراین عدم قطعیت خطای مرتبط با درنظر گرفتن نقطه شبنم یک گاز به عنوان ورودی که دارای ناخالصی‌های معمولی است را نمی‌توان مورد ارزیابی قرار داد.

### ب-۳ عدم قطعیت همبستگی

در این‌جا بیان عدم قطعیت مربوط به تعیین مقدار آب و نقطه شبنم آب است. شایان ذکر است که این عدم قطعیت‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی به دست آمده است و همان‌گونه که قبلاً توصیف شد، نشان‌دهنده

بهترین عملیات با گازهای طبیعی است. تلاش برای تعیین یک مقدار میدانی صحیح برای نقطه شبنم آب در گازهای طبیعی، با حضور هرگونه آلودگی مانند متانول، گلیکول یا هیدروکربن‌های مایع، دچار اختلال می-شود، که این موضوع بر تعادل بخار آب در امتداد خطوط لوله‌کشی تاثیر خواهد گذاشت و باعث بالا رفتن دامنه نقاط انباشتگی[1] (نقاط تراکم) نسبت به یک مقدار مطلق می‌شود. به این ترتیب، عدم قطعیت‌های مربوط به این تعیین‌های مستقیم، نسبت به اندازه‌گیری مقدار درصد آب، بزرگ‌تر خواهد بود. این ملاحظات عملی کاربرد چشمگیری در کاربرد همبستگی دارد.

### ب-۴ قابلیت به‌کارگیری

کاربرد اصلی این همبستگی انتقال گاز و جنگ‌افزارها است که گاز طبیعی تمیز انتقال داده می‌شود. در چنین مواردی این همبستگی عبارتی قابل ردیابی از نقطه شبنم آب به‌دست می‌دهد وقتی از یک مقدار درصد آب معلوم به عنوان مقدار ورودی استفاده می‌شود. این امکان که مقدار درصد آب معلوم را به عنوان نقطه شبنم آب بیان کنند به شرکت‌های گازی این کمک را می‌نماید که از نیاز به تغییر واحدها در قراردادهای گازی، که از قدیم بر حسب نقطه شبنم آب نوشته شده‌اند، خودداری کنند.

معمولاً برای شرکت‌های تولیدکننده گاز، مواد شیمیایی خشکاننده[2] (دسکانت‌ها)، هیدروکربن‌های مایع و دیگر ناخالصی‌ها در خطوط انتقال گاز و تأسیسات مربوطه وجود دارند. هرجا متانول، هیدروکربن‌های مایع یا گلیکول وجود دارد می‌توان تعادلی بین مخلوط گلیکول/آب/هیدرورکربن بوجود آورد که در طول خطوط لوله تغییر می‌کند. در چنین مواردی، «نقطه شبنم آب» هیچ معنای فیزیکی ملموسی ندارد. در چنین مواردی به نظر می‌رسد که همبستگی برای نواحی با جریان‌های بالاسری مناسب نیست مگر این‌که با مقدار درصد آب مشخصی شروع کرد تا دامنه محتملی برای نقاط شبنم پیش‌بینی شود که ممکن است نقطه شبنم در این دامنه واقع شود.

سومین دغدغه انتقال گاز از تولید به تأسیسات پالایشی به صورت جریان دوفازی در خطوط انتقال است. این مورد معمولاً در تولید از سکوهای دریایی اتفاق می‌افتد. همانند حالت دوم ناخالصی‌هایی مانند متانول یا گلیکول معمولاً وجود دارند که تعادل بخار را بر هم می‌زنند و دوباره در این‌جا نیز به کار بردن واژه نقطه شبنم به عنوان معیاری از مقدار درصد بخار آب موجود در گاز بی معنا خواهد بود. هیدروکربن‌های مایع دربردارنده آب محلول یا پراکنده هستند که ممکن است در ایجاد تعادل بین مخلوط آب/گلیکول و بخار آب در گاز اخلال ایجاد نماید. در چنین شرایطی بهتر است بر اساس غلظت‌های بخار آب بررسی‌هایمان را انجام دهیم.

با وجود این، همبستگی در شبیه‌سازی فرایند برای به‌دست آوردن یک نقطه شبنم با مقدار درصد آب معلوم مفید و با ارزش است و داده‌های شبیه‌سازی قابل اعتمادتری در برخی از فرایندهایی که خوردگی و یا تشکیل هیدرات در مخازن تحت فشار وجود دارد حاصل می‌کند.

---

1 - Condensation point
2 - Desiccants

## پیوست پ
## (اطلاعاتی)
## مثال‌هایی از محاسبات

### پ-۱ مثال‌هایی از محاسبات نقطه شبنم آب با ترکیبات گازی مختلف

#### پ-۱-۱ ورودی

$\beta_w$ = ۶۰ mg/m$^3$

ترکیب و فشار گاز در جدول پ۱ تعیین شده‌اند.

#### پ-۱-۲ خروجی

دمای نقطه شبنم T که در جدول پ۱ مشخص شده است (عدم قطعیت خطای ±۲°C).

**جدول پ۱- مثالی از محاسبه نقطه شبنم آب با ترکیبات گازی مختلف**

| ترکیب گاز خشک | $P_{(مطلق)}$ = ۲ MPa T(°C) | $P_{(مطلق)}$ = ۵ MPa T(°C) | $P_{(مطلق)}$ = ۸ MPa T(°C) |
|---|---|---|---|
| ٪۹۰ متان، ٪۸ اتان، ٪۲ پروپان | -۱۶٫۳ | -۶٫۷ | -۲٫۰ |
| ٪۸۰ متان، ٪۱۳ اتان، ٪۴ پروپان، ٪۳ دی‌اکسید کربن | -۱۶٫۳ | -۶٫۸ | -۲٫۲ |
| ٪۷۵ متان، ٪۱۶ اتان، ٪۴٫۵ پروپان، ٪۴٫۵ دی‌اکسید کربن | -۱۶٫۴ | -۶٫۹ | -۲٫۲ |
| ٪۷۰ متان، ٪۲۰ اتان، ٪۴٫۵ پروپان، ٪۵٫۵ دی‌اکسید کربن | -۱۶٫۴ | -۶٫۹ | -۲٫۱ |

### پ-۲ مثال‌هایی از محاسبات درصد آب با ترکیبات گازی مختلف

#### پ-۲-۱ ورودی

دمای نقطه شبنم T = ۵°C (یعنی الزامی قراردادی). فشار و ترکیب گاز در جدول پ۲ مشخص شده‌اند.

#### پ-۲-۲ خروجی

$\beta_w$ در جدول پ۲ تعیین شده است (عدم قطعیت خطای محاسباتی، که در بخش ۵-۱ و مثال‌های بند پ۳ ارایه شده است).

**جدول پ۲- مثالی از محاسبه درصد آب با ترکیبات گازی مختلف**

| ترکیب گاز خشک | $P_{(مطلق)}$ = ۲ MPa $\beta_w$ (mg/m$^3$) | $P_{(مطلق)}$ = ۵ MPa $\beta_w$ (mg/m$^3$) | $P_{(مطلق)}$ = ۸ MPa $\beta_w$ (mg/m$^3$) |
|---|---|---|---|
| ٪۹۰ متان، ٪۸ اتان، ٪۲ پروپان | ۱۶۷٫۳ | ۷۰ | ۴۵٫۳ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| ٪۸۰ متان، ٪۱۳ اتان، ٪۴ پروپان، ٪۳ دی‌اکسید کربن | ۱۶۸٫۵ | ۷۰٫۹ | ۴۶٫۱ |
| ٪۷۵ متان، ٪۱۶ اتان، ٪۴٫۵ پروپان، ٪۴٫۵ دی‌اکسید کربن | ۱۶۹ | ۷۱٫۳ | ۴۶٫۳ |
| ٪۷۰ متان، ٪۲۰ اتان، ٪۴٫۵ پروپان، ٪۵٫۵ دی‌اکسید کربن | ۱۶۹ | ۷۱٫۱ | ۴۵٫۷ |

## پ-۳- مثال‌هایی از محاسبه عدم قطعیت برای درصد آب

### پ-۳-۱ مثال ۱: محاسبه عدم قطعیت برای: $\beta_w$ = 100 mg/m$^3$

Uncertainty: (0,14 + 0,021 × 100 ± 20) mg/m3
0,14 + 2,1 ± 20 ⇒ upper uncertainty: + 22,24 mg/m3
⇒ lower uncertainty: −17,76 mg/m3
βw upper: 100 + 22,24 = 122,24 mg/m3
βw lower: 100 − 17,76 = 82,24 mg/m3
Therefore: 82,24 mg/m3 u βw u 122,24 mg/m3

### پ-۳-۲ مثال ۲: محاسبه عدم قطعیت برای: $\beta_w$ = 600 mg/m$^3$

Uncertainty: (−18,84 + 0,053 7 × 600 ± 20) mg/m3
−18,84 + 32,22 ± 20 ⇒ upper uncertainty: + 33,38 mg/m3
⇒ lower uncertainty: −6,62 mg/m3
βw upper: 600 + 33,38 = 633,38 mg/m3
βw lower: 600 − 6,62 = 593,38 mg/m3
Therefore: 593,38 mg/m3 u βw u 633,38 mg/m3

## پیوست ت

## (اطلاعاتی)

## زیرنویس‌ها، نمادها، ضرایب تبدیل و اختصارات

### ت-۱ زیرنویس‌ها[1]، نمادها[2] و یکاها[3]

#### ت-۱-۱ زیرنویس‌ها

زیرنویس‌ها در جدول ت۱ ارایه شده‌اند

**جدول ت۱- زیرنویس‌ها**

| زیرنویس | توصیف |
|---|---|
| c | در نقطه بحرانی |
| R | شرایط کاهش‌یافته |
| v | فاز بخار |
| w | آب |

#### ت-۱-۲ نمادها و یکاها

نمادها و یکاها در جدول ت۲ ارایه شده‌اند.

**جدول ت۲- نمادها و یکاها**

| نماد | توصیف | یکا |
|---|---|---|
| b | پارامتر کووالوم (هم‌حجمی) | $m^3/kmol$ |
| x | درصد مولی | |
| P | فشار (مطلق) | kPa |
| R | ثابت گازها (۸/۳۱۴) | J/(K·mol) |
| t | دمای سلسیوس | °C |
| T | دمای (مطلق ترمودینامیکی) | K |
| V | حجم | $m^3$ |
| $V_m$ | حجم مولی | $m^3/kmol$ |

1 - Subscripts
2 - Symbols
3 - Units

| | | |
|---|---|---|
| $\beta_w$ | غلظت جرمی درصد آب | $mg/m^3$ (در شرایط عادی) |
| $k_{ij}$ | پارامتر برهم‌کنش دوتایی | |
| $\omega$ | فاکتور خروج از مرکز وابسته به ماده | |
| $\kappa$ | ثابت وابسته به ماده | |

## ت-۲ ضریب تدبدیل برای فشار، دما، حجم و جرم حجمی

### ت-۲-۱ فشار

برای تبدیل از

kPa به بار (bar) از معادله روبرو استفاده کنید ⇐ $bar = \frac{kPa}{100}$

MPa به بار (bar) از معادله روبرو استفاده کنید ⇐ $bar = MPa \times 10$

atm به بار (bar) از معادله روبرو استفاده کنید ⇐ $bar = atm \times 1{,}013\ 25$

psia به بار (bar) از معادله روبرو استفاده کنید ⇐ $bar = \frac{psia}{14{,}503\ 8}$

psig به بار (bar) از معادله روبرو استفاده کنید ⇐ $bar = \frac{psig + 14{,}695\ 9}{14{,}503\ 8}$

### ت-۲-۲ دما

برای تبدیل از

k به °C از معادله روبرو استفاده کنید ⇐ $°C = K - 273{,}15$

### ت-۲-۳ حجم

برای تبدیل از

$m^3$(شرایط استاندارد) به $m^3$(شرایط عادی) از معادله روبرو استفاده کنید ⇐ $m^3(n.c.) = m^3(s.c.) \times 0{,}947$

### ت-۲-۴ جرم حجمی

برای تبدیل از

ppm به $mg/m^3$(شرایط عادی)، از معادله روبرو استفاده کنید ⇐ $mg/m^3 = ppm \times 1{,}245$

## ت-۳ فهرست اصطلاحات مخفف شده

فهرست اصطلاح مخفف شده در جدول ت۳ ارایه شده است.

**جدول ت۳- فهرست اصطلاحات مخفف شده**

| مخفف | توصیف |
|---|---|
| ASTM | انجمن آزمون و مواد آمریکا |
| CEN | کمیته اروپایی استانداردسازی |
| GERG | کمیته اروپایی تحقیقات گاز |
| IEC | کمیسیون بین المللی الکترونیک |

| | |
|---|---|
| IGU | اتحادیه بین‌المللی گاز |
| ISO | سازمان بین‌المللی استانداردسازی |

## پیوست ث
## (اطلاعاتی)
## کتاب‌نامه


[۱] استاندارد ملی ایران شماره ۳-۷۰۸۶، کمیت های و یکاها - قسمت سوم : مکانیک (3-31)

[۲] استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۵۱۶، از طبیعی - تعیین نقطه شبنم آب موجود در گاز طبیعی - نم سنج های چگالیده شده صفحه سرد (6327)

[۳] استاندارد ملی ایران شماره ۱-۹۱۰۲، گاز طبیعی- اندازه‌گیری ترکیبات و عدم قطعیت مربوطه به‌وسیله کروماتوگرافی گازی - قسمت ۱: آیین کار کلی و تعیین ترکیب (1-6974)

[۴] استاندارد ملی ایران شماره ۲-۹۱۰۲، گاز طبیعی- تعیین ترکیب و عدم قطعیت مرتبط به وسیله کروماتوگرافی گازی- قسمت ۲: محاسبات عدم قطعیت (2-6974)

[۵] استاندارد ملی ایران شماره ۳-۹۱۰۲، گاز طبیعی تعیین ترکیب گاز توس G.C با عدم قطعیت مشخص قسمت سوم تعیین هیدروژن هلیم ، اکسیژن ، نیتروژن ، مونوکسید کربن و هیدروکربنها تا C8با استفاده از دو ستون فشرده (3-6974)

[۶] استاندارد ملی ایران شماره ۹۱۰۰، گاز طبیعی - دستور العمل نمونه برداری (10715)

[7] AHMED, Tarek. Hydrocarbon phase behaviour, Vol. 7, USA, 1989

[8] GERG Technical Monograph TM14 (L.R. OELLRICH, K. ALTHAUS). Relationship between water content and water dew point keeping in consideration the gas composition in the field of natural gas (Verein Deutscher Ingenieure, Reihe3-Nr.679, 2001, Postfach 10 10 54, 40001 Düsseldorf, E-mail gps@vdi.de)

[9] IGRC 1995, Development of a mathematical correlation between water content and water dew point

[10] IGRC 1998, GERG model predictions and experimental verification of water dew points of natural gas

[11] ASTM D 1142-95, Water vapour content of gaseous fuel by measurements of dew point temperature

[12] PC Program for the calculation of water content or water dew point according to this International Standard: DEW POINT — Program to calculate the water content, the dew point temperature and the characteristic variables of natural gases. RUHRGAS, Halterner Straβe 125, 46284 Dorsten (Germany), Fax +49 2362 938780, 18.9.2000

[13] NISHIUMI, H.; ARAI, T.; TAUKEUCHI, K. Generalization of the binary interaction parameter of the Peng & Robinson equation of state by component family. Fluid Phase Equilibria, 42, 1988, pp. 43-62

[14] AVLONITIS, G. et al. A generalized correlation for the interaction coefficients of nitrogen-hydrocarbon binary mixtures. Fluid Phase Equilibria, 101, 1994, pp. 53-58
[15] KNAPP, H., DÖRING, R., OELLRICH, L., PLÖCKER, U., PRAUSNITZ, J. M. Vapour-Liquid equilibria for mixtures of low boiling substances. Dechema data series Vol. VI, Part 1. Frankfurt, 1982
[16] KORDAS, A., TSOUTSOURAS, K., STAMATAKI, S., TASSIOS, D. A generalized correlation for the interaction coefficients of CO2 -hydrocarbon binary mixtures. Fluid Phase Equilibria, 93, 1994, pp. 141-166
[17] KORDAS, A., MAGOULAS, K., STAMATAKI, S., TASSIOS, D.: Methane - hydrocarbon interaction parameters correlation for the Peng-Robinson and the t-mPR equation of state. Fluid Phase Equilibria, 112 (1), 1995, pp. 33-44
[18] KNAPP, H., OELLRICH, L.R., et al. K-BP2 — Karlsruhe-Berliner-Prozeβ - erechnungs-Paket. Institut für technische Thermodynamik und Kältetechnik, Universität Karlsruhe
[19] DOHRN, R. Berechnung von Phasengleichgewichten. Vieweg Verlag, 1994
[20] GMEHLING, J.; KOLBE, B. Thermodynamik. 2. Überarb. Aufl., Weinheim: VCH, 1992
[21] WALAS, St. M. Phase equilibria in chemical engineering. 2 pr. Boston: Butterworth, 1985
[22] ANDERKO, A. Review: EoS Methods for the modelling of phase equilibria. Fluid Phase Equilibria, 61, 1990, pp. 145-225
[23] ABBOTT, M.M. Cubic EoS: An interpretive review. Advances in Chemistry Series, 182, 1979, pp. 47-70
[24] VAN DER WAALS, J.D. Over de continuiteit van den gas – en vloestoftoestand. Dissertation Universität Leiden, 1873
[25] SOAVE, G. Equilibrium constant from a modified Redlich-Kwong equation of state. Chem. Eng. Sci., 27, 1972, pp. 1197-1203
[26] PENG, D.Y., ROBINSON, D.B. A new two-constant equation of state. Ind. Eng. Chem. Fundam., 15 (1), 1976, pp. 59-64
[27] PATE, N.C. Improvements of the Patel-Teja equation of state. Int. J. Thermophysics, 17 (3), 1996
[28] COPEMAN, T.W., MATHIAS P.M. Recent mixing rules for equations of state. Equation of state: Theories and applications (K.C. CHAO, ed.), ACS symposium series 300, 1986, pp. 353-370
[29] MANSOORI, G.A. Mixing rules for cubic equations of state Equation of state: Theories and applications, (K.C. CHAO, ed.), ACS symposium series 300, 1986, pp. 314-330
[30] MICHEL, S.; HOOPER, H.H.; PRAUSNITZ, J.M. Mutual solubilities of water and hydrocarbons from an equation of state need for an unconventional mixing rule. Fluid Phase Equilibria, 45, 1989, pp. 173-189
[31] RICCI, J.E. The phase rule. D. Van. Nostrand Co., New York, 1951
[32] ROOZEBOOM BAKHUIS, H. W. Die heterogenen Gleichgewichte vom Standpunkt der Phasenlehre. 1. Heft, Braunschweig, Vieweg & Sohn, 1901
[33] ECONOMOU, I.G.; DONOHUE, M.D. Equations of state for hydrogen bonding systems. Fluid Phase Equilibria, 116, 1996, pp. 518-529
[34] KABADI, V.N.; DANNER, R.P. A modified Soave-Redlich-Kwong equation of state for water-hydrocarbon phase equilibria. Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 24, 1985, pp. 537-541
[35] ISO 3534-1:1993, Statistics — Vocabulary and symbols — Part 1: Probability and general statistical terms

[36] ISO 6568:1981, Natural gas — Simple analysis by gas chromatography
[37] ISO 6974-4:2000, Natural gas — Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography — Part 4: Determination of nitrogen, carbon dioxide and C1 to C5 and C6+hydrocarbons for a laboratory and on-line measuring system using two columns
[38] ISO 6974-5:2000, Natural gas — Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography — Part 5: Determination of nitrogen, carbon dioxide and C1 to C5 and C6+hydrocarbons for a laboratory and on-line process application using three columns
[39] ISO 6974-6:2002, Natural gas — Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography — Part 6: Determination of hydrogen, helium, oxygen, nitrogen, carbon dioxide and C1 to C8 hydrocarbons using three capillary columns
[40] ISO 6975:1997, Natural gas — Extended analysis — Gas-chromatographic method
[41] ISO 6976:1995, Natural gas — Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition
[42] ISO 7504:2001, Gas analysis — Vocabulary
[43] ISO 10101-1:1993, Natural gas — Determination of water by the Karl Fischer method — Part 1: Introduction
[44] ISO 10101-2:1993, Natural gas — Determination of water by the Karl Fischer method — Part 2: Titration procedure
[45] ISO 10101-3:1993, Natural gas — Determination of water by the Karl Fischer method — Part 3: Coulometric procedure
[46] ISO 11541:1997, Natural gas — Determination of water content at high pressure
[47] ISO 13443:1996, Natural gas — Standard reference conditions
[48] ISO 13686:1998, Natural gas — Quality designation
[49] ISO 14532:2001, Natural gas — Vocabulary
[50] Guide 30:1992, Terms and definitions used in connection with reference materials
[51] International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM). BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2nd ed., 1993