





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تعیین خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با استفاده از هر دو خاصیت ورودی و ترکیب

گاز با استفاده از معادله حالت GERG-2008

نگارنده:

جلال زنگنه

اساتید راهنما:

دکتر محمود فرزانه گرد

دکتر علی جباری مقدم

تیر ۱۳۹۸

تقدیم بہ ہر کس کہ در راہی دست قدم بر می دارد.

شکر و قدردانی:

بالاترین شکر از خداوندی که همیشه همراه من بوده است.

و در ادامه از تمامی افرادی که در میان یافتن این پایان نامه نقشی داشته‌اند نهایت شکر و قدردانی را دارم به ویژه از پدر، مادر و خواهرم که سعی بر یاری من داشته‌اند. همچنین از اساتید راهنمای محترم، جناب آقای دکتر محمود فرزانه کرد، دکتر علی بجاری مقدم و در میان از همه دوستانی که در این مدت این جانب را یاری نموده‌اند شکر می‌نمایم.

تعهدنامه

این جانب جلال زنگنه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با استفاده از هر دو خاصیت ورودی و ترکیب گاز با استفاده از معادله حالت GERG-2008 تحت راهنمایی دکتر محمود فرزانه گرد-دکتر علی جباری مقدم متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج بانام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، از اهمیت بالایی در صنعت برخوردار است. گاز طبیعی مخلوط پیچیده‌ای از هیدروکربن‌ها و عناصر گازی همچون دی‌اکسید کربن و نیتروژن می‌باشد. از این رو خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، به خواص ترمودینامیکی عناصر تشکیل‌دهنده آن وابسته بوده و با تغییر ترکیب گاز طبیعی نیز تغییر می‌یابد. به کارگیری معادلات حالت ترمودینامیکی یکی از کم‌هزینه‌ترین و سریع‌ترین روش‌ها در تعیین خواص ترمودینامیکی می‌باشد. همچنین برای تعیین بسیاری از خواص ترمودینامیکی همانند انرژی داخلی، آنتالپی و آنتروپی که با روش‌های آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری نیستند، ناچار به استفاده از معادلات حالت و به کارگیری روابط ترمودینامیکی هستیم. یکی از معادلات حالت پرکاربرد ارائه شده، معادله حالت GERG-2008 می‌باشد که مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است. معادله حالت GERG-2008 دقت بالایی در تعیین خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی دارد و با در نظر گرفتن خواص اجزای گاز طبیعی در ترکیب، مدل دقیقی برای محاسبه خواص ترمودینامیکی مانند چگالی، ضریب تراکم‌پذیری، آنتالپی، آنتروپی، انرژی داخلی، سرعت صوت و سایر خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، ارائه می‌کند.

در تحقیق حاضر، با مبنا قرار دادن معادله حالت GERG-2008 و با استفاده از روابط ترمودینامیکی مشخص شده، خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی بر اساس ورودی‌های دما و فشار و ترکیب گاز طبیعی محاسبه شده است. سپس نتایج به دست آمده جهت معتبر سازی محاسبات با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. همچنین در فرایندهای ترمودینامیکی دیگری مانند فرایندهای جاری در توربین‌ها، کمپرسورها و شیرهای فشارشکن، مشخصه‌های ترمودینامیکی دیگری نظیر آنتروپی و آنتالپی موجود است و سایر خواص ترمودینامیکی باید از طریق این خواص موجود محاسبه شود. بنابراین، در این تحقیق، خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی علاوه بر ورودی‌های دما، فشار و ترکیب گاز، بر اساس سه مدل خواص ورودی شامل: (آنتالپی، فشار و ترکیب گاز)، (آنتروپی، فشار و ترکیب گاز) و (انرژی درونی،

حجم مخصوص و ترکیب گاز) نیز محاسبه شده و سپس میزان افت دما در یک شیر اختناق و یک توربین شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. اعتبار سنجی محاسبات نشان می‌دهد که معادله حالت GERG-2008 برای محاسبه خواص ترمودینامیکی در مقایسه با داده‌های تجربی (آزمایشگاهی) دقتی کمتر از ۲٪ را داشته که دقت بسیار خوبی برای کاربردهای مهندسی می‌باشد. در نهایت، با حصول اطمینان از دقت قابل قبول نتایج، نرم‌افزاری جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی بر پایه معادله حالت GERG-2008 و بر اساس چهار حالت ورودی‌های مختلف ذکر شده در بالا، ارائه شده است.

کلید واژگان: گاز طبیعی – خواص ترمودینامیکی – معادله حالت GERG-2008 – روابط ترمودینامیکی

۱- فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- اهمیت تعیین خواص ترمودینامیکی.....	۲
۱-۲- گاز طبیعی، سوختی پاک و پر کاربرد.....	۳
۱-۳- مصرف انرژی و منابع تأمین آن در جهان و ایران.....	۵
۱-۴- ذخایر گاز جهان.....	۱۱
۱-۵- هدف پایان نامه.....	۱۳
2- فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته.....	۱۵
۱-۲- مقدمه.....	۱۶
۲-۲- معادلات حالت.....	۱۶
۳-۲- پیشینه معادلات حالت.....	۱۷
۳-۲-۱- معادلات حالت مکعبی (درجه سه).....	۱۷
۳-۲-۲- معادلات حالت نظیر به نظیر.....	۲۱
۳-۳-۲- معادلات حالت بر پایه تئوری مولکولی و ترمودینامیک آماری.....	۲۲
۳-۲-۴- معادلات حالت دیگر.....	۲۲
۳-۲-۴- معادله حالت GERG-2008.....	۲۳
۳-۲-۵- مروری بر مطالعات انجام گرفته در زمینه معادله حالت GERG-2008.....	۲۴
۳- فصل سوم: روابط ریاضی معادله حالت GERG-2008.....	۳۱
۳-۱- مقدمه.....	۳۲
۳-۲- انرژی آزاد هلمهولتز.....	۳۲
۳-۲-۱- انرژی آزاد هلمهولتز کاهشده.....	۳۳
۳-۲-۲- روابط مربوطه برای محاسبه خواص ترمودینامیکی.....	۳۴
۳-۲-۳- انرژی آزاد هلمهولتز کاهشده بخش گاز ایده آل.....	۳۵

۳۶	..... انرژي آزاد هلمهولتز کاهيده بخش باقیمانده
۳۸	..... استخراج روابط برای محاسبه خواص ترموديناميکی
۳۸	..... چگالی ۱-۳-۳
۴۰	..... انرژي درونی ۲-۳-۳
۴۱	..... آنتالپی ۳-۳-۳
۴۲	..... آنتروپی ۴-۳-۳
۴۲	..... ظرفیت گرمایی حجم ثابت و فشار ثابت ۵-۳-۳
۴۶	..... سرعت صوت ۶-۳-۳
۴۶	..... ضریب ژول-تامسون ۷-۳-۳
۴۷	..... روش محاسبه خواص ترموديناميکی با معادله حالت GERG-2008
۵۲	..... روش محاسبه خواص ترموديناميکی با ورودی‌های متفاوت
۵۲	..... روش محاسبه خواص ترموديناميکی با استفاده از آنتالپی و فشار ۱-۵-۳
۵۷	..... روش محاسبه خواص ترموديناميکی با استفاده از آنتروپی و فشار ۲-۵-۳
۶۲	..... روش محاسبه خواص ترموديناميکی با استفاده از انرژي داخلی و حجم مخصوص ۳-۵-۳
۶۷	..... فصل چهارم: نتایج
۶۸	..... ۱-۴ معتبر سازی محاسبات
۶۸	..... ۲-۴ محاسبه چگالی برای گاز طبیعی با کسر مولی‌های مختلف
۶۹	..... ۱-۲-۴ محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix1
۷۱	..... ۲-۲-۴ محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix2
۷۳	..... ۳-۲-۴ محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix3
۷۴	..... ۴-۲-۴ اعتبارسنجی محاسبه چگالی بیوگاز
۷۶	..... ۳-۴ اعتبارسنجی محاسبات ضریب تراکم‌پذیری
۷۶	..... ۱-۳-۴ محاسبه ضریب تراکم‌پذیری برای ترکیب گاز طبیعی Mix1
۷۸	..... ۲-۳-۴ محاسبه ضریب تراکم‌پذیری برای گاز طبیعی Mix2
۸۰	..... ۴-۴ اعتبارسنجی محاسبات انرژي داخلی

- ۸۱-۴-۱- معیبر سازی محاسبات انرژی داخلی برای متان خالص.....
- ۸۲-۴-۵- اعتبارسنجی محاسبات آنروپی.....
- ۸۲-۴-۵-۱- معیبر سازی محاسبات آنروپی برای متان خالص.....
- ۸۴-۴-۶- اعتبارسنجی محاسبات آنتالپی.....
- ۸۴-۴-۶-۱- معیبر سازی محاسبات آنتالپی متان خالص.....
- ۸۶-۴-۷- اعتبارسنجی محاسبات ظرفیت گرمایی حجم ثابت.....
- ۸۸-۴-۷-۱- معیبر سازی محاسبات ظرفیت گرمایی حجم ثابت برای ترکیب دوتایی متان-اتان.....
- ۸۹-۴-۸- اعتبارسنجی محاسبات ظرفیت گرمایی فشار ثابت.....
- ۸۹-۴-۸-۱- محاسبه ظرفیت گرمایی فشار ثابت برای متان خالص.....
- ۹۱-۴-۸-۲- محاسبه ظرفیت گرمایی فشار ثابت برای ترکیب دوتایی متان-اتان.....
- ۹۳-۴-۸-۳- محاسبه ظرفیت گرمایی در فشار ثابت برای ترکیب گاز طبیعی.....
- ۹۵-۴-۹- اعتبارسنجی محاسبات سرعت صوت.....
- ۹۵-۴-۹-۱- معیبر سازی محاسبات سرعت صوت برای متان خالص.....
- ۹۷-۴-۹-۲- معیبر سازی محاسبات سرعت صوت برای ترکیب گاز طبیعی.....
- ۹۹-۴-۹-۳- اعتبارسنجی محاسبه سرعت صوت بیوگاز.....
- ۱۰۰-۴-۱۰- اعتبارسنجی محاسبات ضریب ژول-تامسون.....
- ۱۰۲-۴-۱۰-۱- معیبر سازی محاسبات ضریب ژول-تامسون برای متان خالص.....
- ۱۰۳-۴-۱۰-۲- محاسبه ضریب ژول-تامسون برای ترکیب متان-اتان.....
- ۱۰۵-۴-۱۰-۳- محاسبه ضریب ژول-تامسون برای ترکیب گاز طبیعی.....
- ۱۰۷-۴-۱۱- افت دما در شیر فشار شکن.....
- ۱۰۷-۴-۱۱-۱- فرآیند هم آنتالپی (آنتالپی ثابت).....
- ۱۰۸-۴-۱۱-۲- نحوه محاسبه دمای خروجی.....
- ۱۰۸-۴-۱۱-۳- افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت شیر اختناق برای متان خالص.....
- ۱۱۰-۴-۱۱-۴- افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت فشار شکنی برای مخلوط دوتایی متان-اتان.....
- ۱۱۱-۴-۱۲- افت دما در توربوآکسپندر.....
- ۱۱۲-۴-۱۲-۱- نحوه محاسبه دمای خروجی.....

۱۳-۴- محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از ورودی‌های u و v ۱۱۵

۱۳-۴-۱- محاسبه فشار و دمای متان خالص با ورودی‌های u و v ۱۱۵

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۱

۵-۱- مقدمه ۱۲۲

۵-۲- نتیجه‌گیری ۱۲۲

۵-۳- پیشنهادات ۱۲۴

۶- منابع ۱۲۷

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱ تغییرات میزان انرژی‌های مصرفی جهان و منابع تأمین‌کننده انرژی سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۳۵ واحد: میلیون تن معادل نفت خام [۴]..... ۶
- جدول ۲-۱ جدول تغییرات میزان انرژی‌های مصرفی در ایران و منابع تأمین آن‌ها در سال‌های ۹۲-۱۳۸۲ (واحد: میلیون بشکه معادل نفت خام) [۳]..... ۷
- جدول ۳-۱ ذخایر گاز مناطق مختلف جهان [۶]..... ۱۱
- جدول ۴-۱ ذخایر اثبات‌شده گاز طبیعی در خاورمیانه [۷]..... ۱۲
- جدول ۱-۴ درصد مولی ترکیبات مورد استفاده در محاسبات چگالی گاز طبیعی..... ۶۹
- جدول ۲-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix1..... ۷۱
- جدول ۳-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix2..... ۷۲
- جدول ۴-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix3..... ۷۴
- جدول ۵-۴ درصد مولی ترکیب مورد استفاده در محاسبات چگالی بیوگاز..... ۷۵
- جدول ۶-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه چگالی بیوگاز..... ۷۶
- جدول ۷-۴ جزء مولی مخلوط اول..... ۷۷
- جدول ۸-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب تراکم‌پذیری Mix1..... ۷۸
- جدول ۹-۴ جزء مولی مخلوط دوم..... ۷۸
- جدول ۱۰-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب تراکم‌پذیری Mix2..... ۸۰
- جدول ۱۱-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه انرژی داخلی متان خالص..... ۸۲
- جدول ۱۲-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه آنتروپی متان خالص..... ۸۴
- جدول ۱۳-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه آنتالپی متان خالص..... ۸۶
- جدول ۱۴-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cv متان خالص..... ۸۷
- جدول ۱۵-۴ نشان‌دهنده جزء مولی ترکیب..... ۸۸
- جدول ۱۶-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cv ترکیب متان-اتان..... ۸۹
- جدول ۱۷-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cp متان خالص..... ۹۱
- جدول ۱۸-۴ نشان‌دهنده جزء مولی ترکیب متان-اتان..... ۹۱
- جدول ۱۹-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cp ترکیب متان-اتان..... ۹۳
- جدول ۲۰-۴ نشان‌دهنده جزء مولی ترکیب گاز طبیعی..... ۹۴
- جدول ۲۱-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cp گاز طبیعی..... ۹۵
- جدول ۲۲-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه سرعت صوت متان خالص..... ۹۷

- جدول ۴-۲۳ نشان‌دهنده جزء مولی ترکیب گاز طبیعی..... ۹۸
- جدول ۴-۲۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه سرعت صوت ترکیب گاز طبیعی..... ۹۹
- جدول ۴-۲۵ درصد مولی ترکیب مورد استفاده در محاسبات سرعت صوت بیوگاز..... ۱۰۰
- جدول ۴-۲۶ انحراف مطلق میانگین در محاسبه سرعت صوت ترکیب گاز طبیعی..... ۱۰۱
- جدول ۴-۲۷ درصد مولی ترکیبات مورد استفاده در محاسبات ضریب ژول-تامسون..... ۱۰۲
- جدول ۴-۲۸ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب ژول-تامسون متان خالص..... ۱۰۳
- جدول ۴-۲۹ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب ژول-تامسون ترکیب متان-اتان..... ۱۰۵
- جدول ۴-۳۰ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب ژول-تامسون ترکیب گاز طبیعی..... ۱۰۷

- شکل ۱-۱ تولید دی‌اکسید کربن به ازای هر کیلووات ساعت [۲]..... ۴
- شکل ۲-۱ سهم حامل‌های انرژی در ایران سال ۱۳۹۲ [۳]..... ۸
- شکل ۳-۱ مصرف گاز طبیعی در بخش‌های مختلف ایالات متحده [۵]..... ۹
- شکل ۴-۱ مصرف نهایی گاز طبیعی به تفکیک نوع مصرف در بخش‌های مختلف طی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۱ [۳]..... ۹
- شکل ۵-۱ مصرف انرژی در کشور از سال ۵۸ تا ۹۴ برحسب بشکه نفت (هزار بشکه در روز) [۳]..... ۱۰
- شکل ۶-۱ مصرف گاز طبیعی از سال ۵۸ تا ۹۴ [۳]..... ۱۱
- شکل ۱-۳ شماتیک روش اصلی معادله حالت GERG-2008 در محاسبه خواص ترمودینامیکی..... ۴۷
- شکل ۲-۳ روند محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی توسط روش اصلی معادله GERG-2008..... ۵۱
- شکل ۳-۳ شماتیک روش محاسبه خواص با آنتالپی و فشار..... ۵۲
- شکل ۴-۳ روند محاسبه خواص ترمودینامیکی با آنتالپی و فشار توسط معادله GERG-2008..... ۵۶
- شکل ۵-۳ شماتیک روش محاسبه خواص با آنتروپی و فشار..... ۵۷
- شکل ۶-۳ روند محاسبه خواص ترمودینامیکی با آنتروپی و فشار توسط معادله GERG-2008..... ۶۱
- شکل ۷-۳ شماتیک روش محاسبه خواص با انرژی داخلی و حجم مخصوص..... ۶۲
- شکل ۸-۳ روند محاسبه خواص با استفاده از انرژی داخلی و حجم مخصوص توسط معادله GERG-2008..... ۶۶
- شکل ۱-۴ نمودار چگالی گاز طبیعی Mix1 برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۱])..... ۷۰
- شکل ۲-۴ درصد خطا در محاسبات چگالی گاز طبیعی Mix 1..... ۷۱
- شکل ۳-۴ نمودار چگالی گاز طبیعی Mix2 برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۶])..... ۷۲
- شکل ۴-۴ درصد خطا در محاسبات چگالی گاز طبیعی Mix 2..... ۷۲
- شکل ۵-۴ نمودار چگالی گاز طبیعی Mix3 برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۷])..... ۷۴
- شکل ۶-۴ میزان خطا در محاسبات چگالی گاز طبیعی Mix 3..... ۷۵
- شکل ۷-۴ نمودار چگالی بیوگاز برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۲۳])..... ۷۵
- شکل ۸-۴ میزان خطا در محاسبات چگالی بیوگاز..... ۷۶
- شکل ۹-۴ نمودار ضریب تراکم‌پذیری برای مخلوط Mix1 برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۸])..... ۷۷

شکل ۴-۱۰ درصد خطا در محاسبات ضریب تراکم‌پذیری Mix1 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۸]). ۷۸

شکل ۴-۱۱ نمودار ضریب تراکم‌پذیری برای مخلوط Mix2 برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۹]). ۷۹

شکل ۴-۱۲ درصد خطا در محاسبات ضریب تراکم‌پذیری Mix2 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۹]). ۸۰

شکل ۴-۱۳ نمودار انرژی داخلی برای متان خالص برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]). ۸۱

شکل ۴-۱۴ میزان خطا در محاسبه انرژی داخلی متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]). ۸۲

شکل ۴-۱۵ نمودار آنتروپی برای متان خالص برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]). ۸۳

شکل ۴-۱۶ درصد خطا در محاسبه آنتروپی متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]). ۸۳

شکل ۴-۱۷ نمودار آنتالپی برای متان خالص برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]). ۸۵

شکل ۴-۱۸ درصد خطا در محاسبه آنتالپی متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]). ۸۵

شکل ۴-۱۹ نمودار ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت برای متان خالص برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]). ۸۷

شکل ۴-۲۰ درصد خطا در محاسبه Cv متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]). ۸۷

شکل ۴-۲۱ درصد خطا در محاسبه ظرفیت گرمایی در حجم ثابت برای مخلوط متان-اتان (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۱]). ۸۹

شکل ۴-۲۲ نمودار ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت برای متان خالص برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت ۹۰

شکل ۴-۲۳ درصد خطا محاسبه‌شده Cp برای متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۹۱

شکل ۴-۲۴ نمودار ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برای ترکیب متان-اتان برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۹۲

شکل ۴-۲۵ درصد خطا محاسبه‌شده Cp ترکیب متان-اتان (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۹۳

شکل ۴-۲۶ نمودار ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برای گاز طبیعی برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۳]). ۹۴

شکل ۴-۲۷ درصد خطای محاسبه‌شده ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برای گاز طبیعی داده‌شده (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۳]). ۹۵

شکل ۴-۲۸ نمودار سرعت صوت برای متان خالص برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۴]). ۹۶

شکل ۴-۲۹ درصد خطای محاسبه‌شده سرعت صوت برای متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۴]). ۹۷

شکل ۴-۳۰ نمودار سرعت صوت برای ترکیب گاز طبیعی برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده

- به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۵]). ۹۸.....
- شکل ۴-۳۱ درصد خطای محاسبه شده سرعت صوت برای متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۵]). ۹۹.....
- شکل ۴-۳۲ نمودار سرعت صوت برای بیوگاز بر حسب فشار و برای حالت های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۳]). ۱۰۰.....
- شکل ۴-۳۳ درصد خطای محاسبه شده سرعت صوت برای بیوگاز (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۳]). ۱۰۱.....
- شکل ۴-۳۴ نمودار ضریب ژول-تامسون متان خالص بر حسب فشار و برای حالت های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۱۰۲.....
- شکل ۴-۳۵ درصد خطای محاسبه شده ضریب ژول-تامسون متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۱۰۳.....
- شکل ۴-۳۶ نمودار ضریب ژول-تامسون بر حسب فشار و برای حالت های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۱۰۴.....
- شکل ۴-۳۷ درصد خطای محاسبه شده ضریب ژول-تامسون (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۱۰۴.....
- شکل ۴-۳۸ نمودار ضریب ژول-تامسون بر حسب فشار و برای حالت های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۱۰۶.....
- شکل ۴-۳۹ درصد خطای محاسبه شده ضریب ژول-تامسون (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]). ۱۰۶.....
- شکل ۴-۴۰ شیر اختناق ۱۰۷.....
- شکل ۴-۴۱ افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت برای متان خالص بر حسب دمای ورودی ۱۰۹.....
- شکل ۴-۴۲ درصد خطای محاسبه شده برای افت دما بر حسب دمای ورودی برای متان خالص (مرجع [۴۶]). ۱۰۹.....
- شکل ۴-۴۳ افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت برای ترکیب متان-اتان بر حسب دمای ورودی ۱۱۰.....
- شکل ۴-۴۴ درصد خطای محاسبه شده برای افت دما بر حسب دمای ورودی برای ترکیب متان-اتان (مرجع [۴۶]). ۱۱۱.....
- شکل ۴-۴۵ توربو اکسپندر ۱۱۲.....
- شکل ۴-۴۶ افت دما در فرآیند آنتروپی ثابت برای متان خالص بر حسب دمای ورودی ۱۱۳.....
- شکل ۴-۴۷ درصد خطای محاسبه شده برای افت دما بر حسب دمای ورودی برای متان خالص (مرجع [۴۰]). ۱۱۳.....
- شکل ۴-۴۸ نمودار مقدار دمای خروجی را بر حسب دمای ورودی برای متان خالص (مرجع [۴۰]). ۱۱۴.....
- شکل ۴-۴۹ نمودار رفتار آنتروپی بر حسب دمای ورودی برای متان خالص (مرجع [۴۰]). ۱۱۴.....
- شکل ۴-۵۰ درصد خطای فشار به دست آمده نسبت به فشار اولیه وارد شده از روش مستقیم بر حسب فشار و حالت های دما ثابت ۱۱۶.....
- شکل ۴-۵۱ درصد خطای دمای به دست آمده نسبت به دمای اولیه وارد شده از روش مستقیم را بر حسب فشار و حالت های دما ثابت ۱۱۷.....
- شکل ۴-۵۲ درصد خطای انرژی داخلی به دست آمده بر حسب انرژی داخلی اولیه و حالت های دما ثابت ۱۱۸.....

شکل ۴-۵۳ درصد خطای ۷ به دست آمده بر حسب حجم مخصوص اولیه و حالت‌های دما ثابت۱۱۹

فهرست علائم

a = انرژی آزاد هلمهولتز	s = آنترابی
a^0 = انرژی هلمهولتز گاز ایده آل	Sos = سرعت صوت
a^r = انرژی هلمهولتز باقیمانده	T = دما
AAD = درصد انحراف مطلق میانگین	T_c = دمای بحرانی
AGA8 = انجمن گاز آمریکا، گزارش شماره ۸	u = انرژی داخلی
C_v = ظرفیت حرارتی در حجم ثابت	x = کسر مولی اجزاء
C_p = ظرفیت حرارتی در فشار ثابت	Z = ضریب تراکم پذیری
D = چگالی جرمی	α = انرژی آزاد هلمهولتز بی بعد
EOS = معادله حالت	δ = چگالی کاهیده
Error = مقدار خطا	v_m = حجم مخصوص مولار
h = آنتالپی	ρ_c = دانسیته بحرانی
M_i = جرم مولکولی جزء i	ρ_m = دانسیته مولار
M_w = وزن مولکولی	τ = معکوس دمای کاهیده
N = تعداد اجزای گاز طبیعی	μ_{JT} = ضریب ژول - تامسون
P = فشار	
P_c = فشار بحرانی	
R = ثابت جهانی گازها	

١- فصل اول: مقدمه

۱-۱- اهمیت تعیین خواص ترمودینامیکی

خواص ترمودینامیکی نشان‌دهنده حالت یک سیستم در یک فرایند ترمودینامیکی می‌باشد. برای محاسبه خواص ترمودینامیکی یک ماده خالص، لازم است دو خاصیت ترمودینامیکی مستقل از موجود باشد. برای ترکیبی مانند گاز طبیعی علاوه بر دو خاصیت ترمودینامیکی مستقل از هم، ترکیب مولی گاز طبیعی یا به عبارتی درصد مولی اجزای تشکیل‌دهنده گاز طبیعی در مخلوط گاز، نیز مورد نیاز است.

برای مواد خالص می‌توان جدولی از خواص ترمودینامیکی ارائه داد، اما برای ترکیبات مختلف با توجه به مطالبی که بیان شد نمی‌توان خواص ترمودینامیکی را با جدول ارائه کرد. به همین جهت، برای مخلوط‌ها روش‌های دیگری بکار گرفته می‌شود که بتوان توسط آنها خواص ترمودینامیکی را برای ترکیبات مختلف، محاسبه نمود.

برای تعیین خواص ترمودینامیکی هر مخلوطی دو روش اصلی وجود دارد: ۱- بکارگیری روش‌های آزمایشگاهی، ۲- استفاده از معادلات حالت. روش‌های آزمایشگاهی برای محاسبه خواص ترمودینامیکی دقت بالایی دارند، اما با روش‌های آزمایشگاهی نمی‌توان برخی خواص ترمودینامیکی مانند آنتالپی، آنترپی و انرژی داخلی، را اندازه گرفت. علاوه بر این، روش آزمایشگاهی روشی هزینه بر است و با محدودیت‌هایی روبرو می‌باشد.

روش دوم استفاده از معادلات حالت می‌باشد که با استفاده از آن تمامی خواص ترمودینامیکی با دقت بالا و هزینه اندک و صرف زمان کمتر قابل محاسبه هستند. از این رو، بکارگیری معادلات حالت برای محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، در سالهای رشد زیادی داشته است. در فصل دوم، ابتدا معادلات حالت تعریف شده و سپس معادلات حالت مختلفی که در صنعت گاز طبیعی استفاده می‌شوند، مورد بررسی قرار گرفته است.

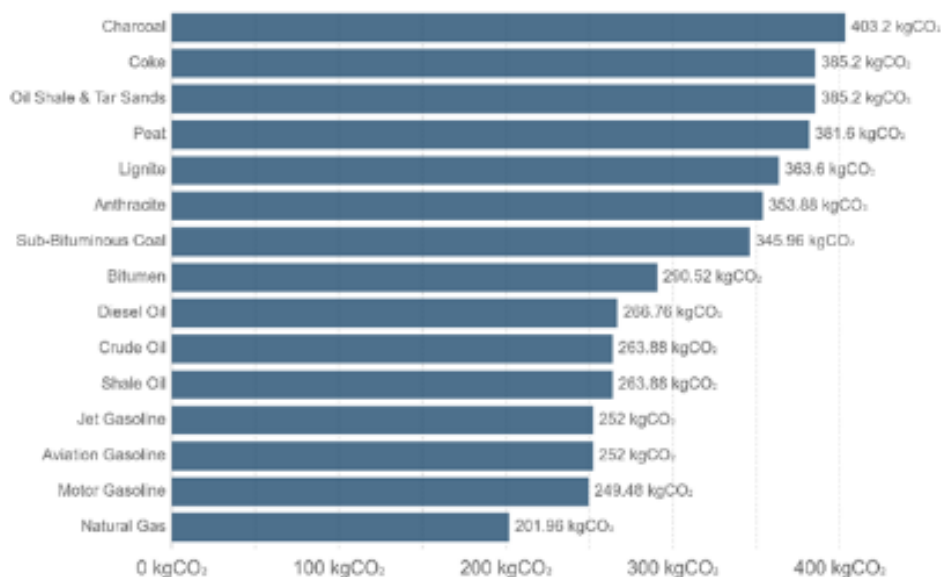
۱-۲- گاز طبیعی، سوختی پاک و پرکاربرد

گاز طبیعی یک سوخت فسیلی است که پس از میلیون‌ها سال از مدفون شدن بقایای گیاهان و جانوران در اعماق زمین تحت فشارهای بالا حاصل می‌شود که عمدتاً متشکل از مولکول‌های هیدروژن و کربن شامل متان، اتان، بوتان، پنتان و سایر هیدروکربن‌ها می‌باشد. در حال حاضر صنعت گاز طبیعی به‌عنوان سریع‌ترین مؤلفه انرژی در حال رشد در جهان می‌باشد، به‌نحوی که مصرف گاز طبیعی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ با تخمینی که انجام شده است حدود ۲/۸٪ افزایش می‌یابد که این نرخ برای سایر سوخت‌های فسیلی از قبیل نفت ۱/۸٪ و زغال سنگ ۱/۵٪ است [۱]. گاز طبیعی یکی از انواع سوخت‌های فسیلی است که آلایندگی کمتری نسبت به دیگر سوخت‌های فسیلی دارد که به‌طور طبیعی و از منابع مشخص به دست می‌آید. گاز طبیعی مخلوطی تشکیل شده از ۲۱ جزء و ترکیبی از هیدروکربن‌های مختلف به همراه تعداد اندکی از عناصر غیر آلی می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است و طبق گزارش^۱ IPCC در سال ۲۰۱۷، گاز طبیعی در حدود ۲۰۱/۹۶ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به ازای هر مگاوات ساعت تولید کرده است. این در حالی است که این رقم برای زغال سنگ حدود ۳۸۵/۲ کیلوگرم و برای نفت خام حدود ۲۶۳/۸۸ کیلوگرم به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد [۲].

^۱ Intergovernmental Panel on Climate Change Report 2017

Carbon Dioxide Emissions Factor, kg CO₂ per MWh

Carbon dioxide (CO₂) emissions factor, measured in kilograms of CO₂ produced per megawatt-hour (MWh) of energy produced from a given fossil fuel source.



Source: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

OurWorldinData.org - CC BY-SA

شکل ۱-۱ تولید دی‌اکسید کربن به ازای هر کیلووات ساعت [۲].

از این رو گاز طبیعی بعد از هیدروژن پاک‌ترین سوخت فسیلی در نظر گرفته می‌شود و سهم بالایی در تأمین انرژی دنیا دارد. گاز طبیعی منبع انرژی فراوان، پاک و ارزان‌قیمتی است که در حال حاضر برای مصارف خانگی و صنعتی استفاده می‌شود و بهره‌برداری از آن به‌طور پیوسته در حال افزایش است. برای دستیابی مصرف‌کننده به گاز طبیعی، عملیاتی از جمله استخراج، ذخیره‌سازی، انتقال و غیره بر روی آن انجام می‌شود. به همین جهت برای عملکرد بهتر لازم است که در هر بخش از عملیات از خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی مطلع باشیم. همچنین در دسترس بودن گاز طبیعی و با توجه به اینکه گازهای گلخانه‌ای کمتری به هنگام سوختن در مقایسه با سوخت‌های فسیلی دیگر، منتشر می‌کند به‌عنوان یک سوخت پاک در دنیا مطرح شده است که استفاده از آن به‌سرعت در حال افزایش است. گاز طبیعی یک منبع انرژی است که کاربردهای فراوانی دارد. این کاربردها شامل مصارف تجاری، اقتصادی، صنعتی، خانگی، حمل‌ونقل و صنایع همگانی می‌باشد [۳].

۱-۳- مصرف انرژی و منابع تأمین آن در جهان و ایران

با رشد روزافزون صنایع در دنیا به‌ویژه کشورهای صنعتی و نیاز شدید به انرژی، کشورهای توسعه‌یافته به دلایل مختلف درصدد جانمایی گاز طبیعی با نفت برآمدند. گاز طبیعی به دلایلی از جمله پراکندگی مناسب‌تر ذخایر آن و همچنین فراوانی منابع آن در جهان، هزینه کمتر استخراج، قیمت مناسب و قابل‌رقابت آن (بر مبنای ارزش حرارتی) موردتوجه کشورهای توسعه‌یافته قرار گرفته است. علاوه بر این، تلاش جهانی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و گاز دی‌اکسید کربن، استفاده از گاز طبیعی را در قیاس با سایر سوخت‌های فسیلی موردتوجه قرار می‌دهد. دلایل برشمرده، ارزش واقعی گاز طبیعی را در سال‌های آتی و درزمینه‌های مختلف تأمین انرژی بیشتر نشان خواهد داد. بنابراین با توجه به اینکه نفت در صدسال گذشته، سوخت تجاری غالب بوده است، گاز در سال‌های پیش رو می‌تواند جایگاه نفت را از آن خود کند، زیرا مجموعه‌ای از ضرورت‌های سیاسی، اقتصادی، فنی و اجتماعی از این موضوع پشتیبانی می‌کنند.

ازاین‌رو گاز طبیعی در تولید انرژی اولیه از اهمیت بالایی برخوردار است. انرژی اولیه شامل انواع حامل‌های انرژی است که بدون فرآورش و تبدیل در کشور تولید می‌شوند. انرژی اولیه شامل نفت خام، گاز طبیعی، زغال‌سنگ، برق آبی، انرژی‌های تجدیدپذیر، هیزم و سوخت‌های سنتی است. در سال ۱۳۹۲ بیشترین سهم در تولید انرژی اولیه مربوط به تولید گاز طبیعی بوده است.

منابع فعلی انرژی و میزان مصرف جهانی هرکدام طبق برآوردی که در سال ۲۰۱۵ به‌عمل آمده است، زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی بیش از ۸۵ درصد از انرژی مصرفی جهان را تأمین می‌کند و پس‌از آن انرژی هسته‌ای، برق آبی و انرژی‌های تجدیدپذیر (بادی، خورشیدی و ...) تأمین‌کننده حدود ۱۵ درصد باقیمانده انرژی موردنیاز جهان می‌باشند. تغییرات به وجود آمده و برآورد مصرف جهانی انرژی و ترکیب منابع اصلی آن برای دوره ۲۰۳۵-۱۹۹۵ در جدول (۱-۱) ارائه شده است [۴].

جدول ۱-۱ تغییرات میزان انرژی‌های مصرفی جهان و منابع تأمین‌کننده انرژی سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۳۵ واحد: میلیون تن معادل نفت خام [۴].

۲۰۳۵		۲۰۳۰	۲۰۲۵	۲۰۲۰	۲۰۱۵	۲۰۱۰	۲۰۰۰	۱۹۹۵		
درصد	مقدار	مقدار	مقدار	مقدار	مقدار	مقدار	مقدار	درصد	مقدار	حامل
۲۸	۴۹۰/۱	۴۸۳۵/۱	۴۶۹۴/۳	۴۵۰۳/۹	۴۳۴۲/۵	۳۹۷۵/۴	۳۶۱۷/۹	۳۸	۳۲۸۶/۱	نفت
۲۶	۴۴۱۷/۴	۴۱۳۸/۸	۳۸۹۵/۴	۳۶۰۰/۲	۳۱۸۷/۸	۲۸۸۸/۶	۲۱۸۱/۱	۲۲	۱۹۰۷/۵	گاز
۲۵	۴۳۳۶/۶	۴۲۶۰/۸	۴۱۸۴/۵	۴۰۹۱/۵	۳۸۰۵/۴	۳۶۰۴/۳	۲۳۱۰/۱	۲۶	۲۲۵۲/۴	ذغال سنگ
۵	۸۵۹/۲	۸۵۰/۹	۷۸۸/۴	۷۲۵/۷	۵۸۹/۸	۶۲۶/۲	۵۸۴/۱	۶	۵۲۵/۹	انرژی هسته ای
۷	۱۲۷۳/۸	۱۱۸۹/۳	۱۱۰۱/۷	۹۸۵/۸	۸۸۷/۸	۷۸۳/۹	۶۰۲/۳	۷	۵۶۲/۷	برق آبی
۰/۷	۱۳۲/۱	۱۱۳/۹	۹۹/۵	۸۳/۶	۶۹/۵	۵۹/۸	۹/۲	۰/۱	۹	پسماند
۸	۱۳۵۹/۴	۱۱۰۵/۴	۸۳۷/۷	۵۸۴/۷	۳۵۴/۶	۱۶۸	۵۱/۸	۰/۴	۳۷/۴	انرژی‌های تجدید پذیر
۱۰۰	۱۷۲۷۹/۴	۱۶۴۹۴/۲	۱۵۵۶۵/۵	۱۴۵۷۵/۴	۱۳۲۲۷/۳	۱۲۱۰۶	۹۳۵۶/۶	۱۰۰	۸۵۸۰/۹	جمع کل

ارقام مندرج در جدول (۱-۱) نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۵ همچنان هیدروکربن‌ها بیشترین سهم را در میان منابع انرژی دارند. همچنین روند رشد سهم انرژی‌های تجدید پذیر در سال ۱۹۹۵ از ۰/۴ درصد به ۸ درصد در سال ۲۰۳۵ خواهد رسید که افزایش آن به علت مشخصه بارز این انرژی‌هاست که پایان‌ناپذیرند و مرتباً به‌طور طبیعی بازسازی می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، منابع تولید این‌گونه انرژی‌ها، برخلاف نفت و گاز و ذغال‌سنگ محدود نیست و چنانچه به‌عنوان انرژی کمکی در جوار سوخت‌های فسیلی استفاده شود، در مصرف سوخت‌های متداول صرفه‌جویی می‌شود.

در حال حاضر، تأمین انرژی کشور متکی به نفت و گاز است به‌طوری‌که بیش از ۹۸ درصد انرژی از منابع هیدروکربوری نفت و گاز تأمین می‌گردد. سهم نفت خام ایران در تولید انرژی اولیه، از ۵۹/۵۴ درصد در سال ۱۳۸۲ به ۳۸/۲ درصد در سال ۱۳۹۲ و سهم گاز در این دوره با افزایش تولید گاز از فازهای مختلف میدان پارس جنوبی و سایر میدان‌ها گازی، از ۳۹/۸۹ درصد در سال ۱۳۸۲ به ۶۰/۷

درصد در سال ۱۳۹۲ افزایش یافته است که رشد تقریبی ۵۰ درصدی را به همراه داشته است.

جدول ۲-۱ جدول تغییرات میزان انرژی‌های مصرفی در ایران و منابع تأمین آن‌ها در سال‌های ۱۳۸۲-۹۲ (واحد: میلیون بشکه معادل نفت خام) [۳].

۱۳۹۲		۱۳۹۰	۱۳۸۹	۱۳۸۸	۱۳۸۶	۱۳۸۴	۱۳۸۲		
درصد	مقدار	مقدار	مقدار	مقدار	مقدار	مقدار	درصد	مقدار	حامل
۳۸	۱۰۲۹/۴۷	۱۴۲۴/۸۳	۱۴۳۸/۹۹	۱۴۲۲/۵۱	۱۴۹۷/۸۲	۱۴۶۷/۸۸	۵۹	۱۴۵۳/۸	نفت
۶۱	۱۶۲۵/۹۲	۱۶۲۶/۳۳	۱۵۹۱/۰۸	۱۵۰۱/۶۶	۱۳۰۳/۱۴	۱۱۲۲/۵	۴۰	۹۷۴/۰۴	گاز
۰/۲	۵/۷۴	۵/۱	۵	۵/۶	۸	۷/۶	۰/۲	۵/۶	ذغال سنگ
۰/۴	۱۱/۳۴	۷/۴	۵/۷۲	۴/۳۷	۱۰/۶۶	۹/۵	۰/۳	۶/۵۴	برق آبی، بادی، اتمی، خورشیدی و زیست توده
۰/۰۰۷	۰/۱۹۶	۰/۱۸۷	۰/۱۶۳	۰/۱۳۲	۰/۰۹۶	۰/۲۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۴۷	انرژی نو (خورشیدی حرارتی)
۰/۴	۱۲/۳	۱۲/۳	۵/۵۸	۵/۵۸	۵/۵۹	۱۱/۸	۰/۰۷	۱/۸	سوخت های سنتی
۱۰۰	۲۶۹۵	۳۰۷۶/۲	۳۰۴۶/۵	۲۹۵۰/۹	۲۸۲۵/۳	۲۶۱۹/۵	۱۰۰	۲۴۴۱/۸	جمع

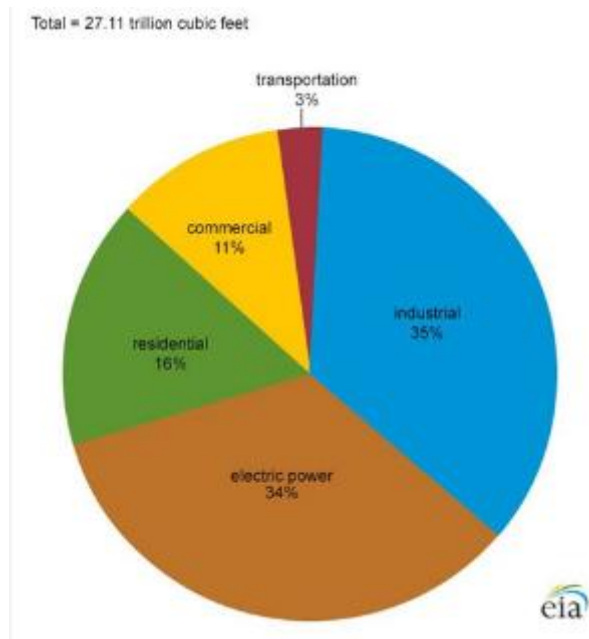
بر اساس جدول (۲-۱) مصرف انرژی در ایران نیز مانند سایر کشورها رو به افزایش می‌باشد.

همچنین در شکل (۲-۱) سهم حامل‌های انرژی در ایران به تفکیک نشان داده شده است.



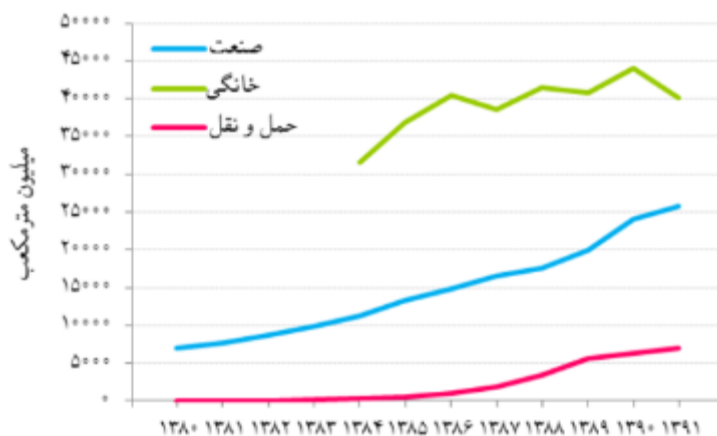
شکل ۲-۱ سهم حامل های انرژی در ایران سال ۱۳۹۲ [۳].

علاوه بر این ها، با توجه به شکل (۱-۳) میزان مصرف گاز طبیعی در بخش های مختلف ایالات متحده آمریکا به عنوان یک کشور توسعه یافته و صنعتی برای سال ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار گرفته است. همان گونه که در این شکل نشان داده شده است بیشترین مقدار گاز طبیعی در مصارف صنعتی استفاده شده است و کمترین مقدار مصرف آن به بخش حمل و نقل تعلق می گیرد [۵].



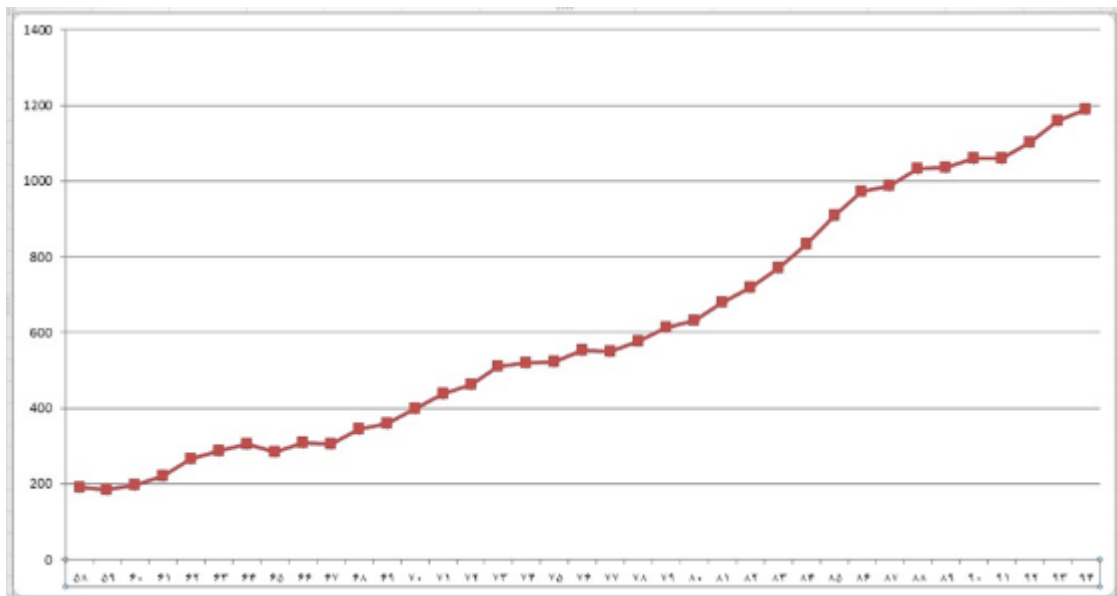
شکل ۳-۱ مصرف گاز طبیعی در بخش‌های مختلف ایالات متحده [۵].

در شکل (۴-۱) میزان مصرف نهایی گاز طبیعی در بخش‌های مختلف صنعت، خانگی و حمل‌ونقل ایران در سال‌های بین ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۱ نشان داده شده است.



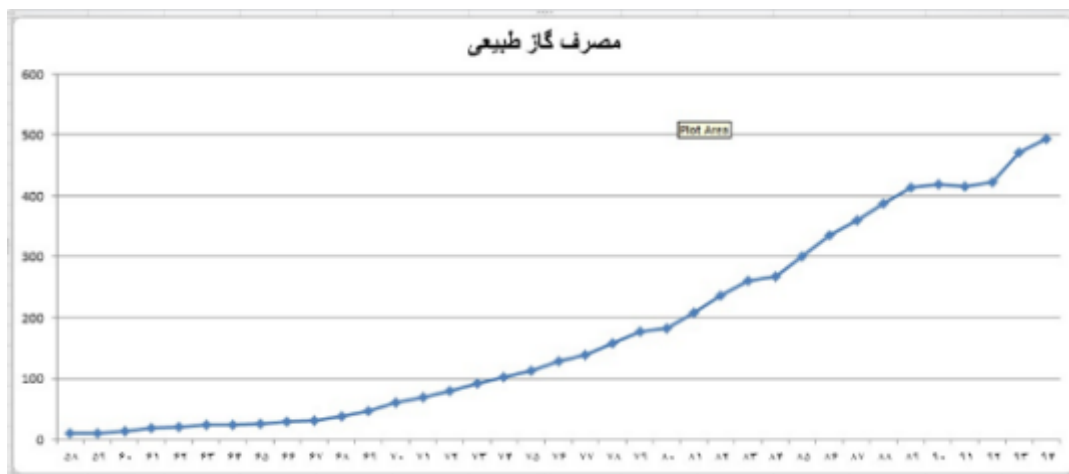
شکل ۴-۱ مصرف نهایی گاز طبیعی به تفکیک نوع مصرف در بخش‌های مختلف طی سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۱ [۳].
 مصرف انرژی در کشور به صورت روزافزون در حال افزایش می‌باشد به طوری که مصرف انرژی طی سال‌های ۵۸ که روزانه معادل حدود ۲۰۰ هزار بشکه نفت بود در سال ۹۴ به حدود ۱ میلیون و ۲۰۰ هزار بشکه نفت رسیده است. بر اساس نمودار نشان داده شده در شکل (۵-۱) مصرف انرژی از سال ۵۸

تا سال ۹۴ روند صعودی داشته است.



شکل ۱-۵ مصرف انرژی در کشور از سال ۵۸ تا ۹۴ برحسب بشکه نفت (هزار بشکه در روز) [۳].

از دیگر مواردی که می‌توان به آن اشاره کرد مصرف گاز طبیعی طی این سال‌ها در بخش خانگی، تجاری، صنایع و نیروگاه‌هاست که در شکل (۱-۶) به وضوح میزان مصرف طی این سال‌ها نشان داده شده است. بر این اساس نه تنها سطح بهره‌مندی خانوارها از گاز طبیعی به جای دیگر سوخت‌ها از جمله نفت سفید و حتی چوب به بالای ۹۰ درصد رسیده است بلکه بسیاری از صنایع و نیروگاه‌ها به جای سوخت مایع آلاینده و گران قیمت از گاز طبیعی استفاده می‌کنند که هزینه تولید آن‌ها را کاهش خواهد داد.



شکل ۱-۶ مصرف گاز طبیعی از سال ۵۸ تا ۹۴ [۳].

همان طور که مشاهده می‌شود مصرف گاز طبیعی از اعداد نزدیک به صفر در سال ۵۸ آغاز شده و تا ۵۰۰ میلیون مترمکعب در سال ۹۴ افزایش یافته است.

مصرف روزافزون گاز طبیعی در کشورمان، با توجه به ذخایر غنی موجود، نیازمند رشد و توسعه فناوری‌ها و تکنولوژی‌های مربوطه در این زمینه شده است. همان طور که در شکل (۱-۶) ملاحظه می‌شود مصرف گاز طبیعی در سال‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته است.

۴-۱- ذخایر گاز جهان

در این قسمت جزئیات ذخایر گاز مناطق مختلف جهان مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس جدول (۱-۳)، خاورمیانه در حدود ۴۲/۵ درصد از کل ذخایر گاز جهان را دارا می‌باشد.

جدول ۱-۳ ذخایر گاز مناطق مختلف جهان [۶].

منطقه	سال ۲۰۱۱	سال ۲۰۱۲	سال ۲۰۱۳	سال ۲۰۱۴	سهم ذخایر (درصد)
آمریکای شمالی	۱۱/۷۴	۱۱/۱۱	۱۱/۷۱	۱۲/۱	۶/۴۶
آمریکای مرکزی و جنوبی	۷/۵۴	۷/۶۹	۷/۶۷	۷/۷	۴/۱۱
اروپا و اوراسیا	۵۶/۳۷	۵۶/۵	۵۶/۶۲	۵۸	۳۱
خاورمیانه	۸۰/۴۲	۸۰/۳۳	۸۰/۲۹	۷۹/۸	۴۲/۶۷
آفریقا	۱۴/۶۴	۱۴/۴۵	۱۴/۲۱	۱۴/۲	۷/۶۵
حوزه اقیانوس آرام	۱۴/۸۹	۱۵/۲۴	۱۵/۲۰	۱۵/۳	۸/۱۸
جمع کل	۱۸۵/۶۱	۱۸۵/۳۱	۱۸۵/۷	۱۸۷/۱	۱۰۰

ایران با قرار گرفتن در منطقه خاورمیانه و با دارا بودن منابع عظیم گاز طبیعی، حدود ۱۷/۲٪ از کل ذخایر گاز طبیعی دنیا را به خود اختصاص داده است. در آخرین رتبه‌بندی کشورهای دارای ذخایر گاز طبیعی اثبات‌شده، ایران پس از روسیه ۱۸/۱٪ رتبه دوم را به خود اختصاص داده است [۷].

در جدول (۱-۴)، میزان ذخایر گاز طبیعی کشورهای خاورمیانه و سهم آن از منابع گاز طبیعی در دنیا را نشان داده شده است. با توجه به منابع عظیم گاز طبیعی در ایران، نرخ رشد استفاده از گاز طبیعی در کاربردهای گوناگون نظیر حمل‌ونقل، مصارف صنعتی و خانگی، قابل توجه می‌باشد.

جدول ۱-۴ ذخایر اثبات‌شده گاز طبیعی در خاورمیانه [۷].

کشور	سال			
	۱۹۹۳	۲۰۰۳	۲۰۱۲	۲۰۱۷
ایران	۲۰/۷	۲۷/۶	۳۳/۶	۳۳/۲
بحرین	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۲
عراق	۳/۱	۳/۲	۳/۶	۳/۵
کویت	۱/۵	۱/۶	۱/۸	۱/۷
عمان	۰/۲	۱	۰/۹	۰/۷
قطر	۷/۱	۲۵/۳	۲۴/۹	۲۴/۹
عربستان	۵/۲	۶/۸	۸/۲	۸
سوریه	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۳
امارات	۵/۸	۶/۰	۶/۱	۵/۹
یمن	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۳
سایر کشورها	<۰/۰۵	۰/۱	۰/۲	۰/۴
جمع کل	۴۴/۴	۷۲/۴	۸۰/۳	۷۹/۱

با توجه به توضیحات و رشد مصرف انرژی، پاک بودن گاز طبیعی در مقایسه با سایر سوخت‌های فسیلی و انتشار پایین گازهای گلخانه‌ای، پراکندگی بهتر ذخایر گاز، امکان استحصال راحت‌تر نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی و مهم‌تر از همه وجود ذخایر عظیم گاز طبیعی در کشورمان، مطالعه و تحقیقات گسترده در زمینه‌ی گاز طبیعی و حصول پیشرفت در این زمینه امری ضروری تلقی می‌گردد.

۱-۵- هدف پایان نامه

محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی از طریق روش‌های آزمایشگاهی یا معادلات حالت مستلزم آن است که دما، فشار و ترکیب گاز موردنظر مشخص باشد، اما در فرایندهای ترمودینامیکی نظیر فرآیندهای جاری در توربین‌ها، کمپرسورها و شیرهای فشارشکن این‌گونه نیست، به‌نحوی که مشخصه‌های ترمودینامیکی دیگری نظیر آنترپی و آنتالپی موجود است و از طریق این خواص موجود باید سایر خواص ترمودینامیکی محاسبه شود. لذا هدف این پایان‌نامه، محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با استفاده از معادله حالت ترمودینامیکی GERG-2008 و بر اساس ورودی‌های دما و فشار و ترکیب گاز طبیعی و همچنین بر اساس سه مدل خواص ورودی شامل: (آنتالپی، فشار و ترکیب گاز)، (آنترپی، فشار و ترکیب گاز) و (انرژی درونی، حجم مخصوص و ترکیب گاز) نیز محاسبه شده و سپس میزان افت دما در یک شیر فشارشکن و یک توربین شبیه‌سازی شده، موردبررسی قرار گرفته است. علاوه بر این‌ها، نرم‌افزاری جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی بر پایه معادله حالت GERG-2008 و بر اساس چهار حالت ورودی‌های مختلف ذکر شده در بالا، ارائه شده است که با دقت بالایی خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با ترکیبات مختلف را محاسبه می‌کند. در فصل دوم به مروری بر پیشینه معادلات حالت مختلف و مطالعات انجام گرفته بر روی گاز طبیعی با استفاده از معادله حالت GERG-2008 پرداخته و در فصل سوم روابط ریاضی معادله حالت GERG-2008 برای تعیین خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی و همچنین روش کار انجام گرفته در این پژوهش بیان می‌شود و در فصل چهارم به معتبر سازی نتایج حاصل از این پژوهش پرداخته می‌شود. در این پژوهش خواص ترمودینامیکی نظیر چگالی، آنتالپی، انرژی درونی، ظرفیت حرارتی در حجم ثابت، ظرفیت حرارتی در فشار ثابت و دیگر خواص ترمودینامیکی برای گاز طبیعی محاسبه شده است. نتیجتاً معادله حالت GERG-2008، معادله حالتی بسیار قابل قبولی برای محاسبه کلیه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی می‌باشد.

۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته

۱-۲- مقدمه

در این فصل در ابتدا معادلات حالت بیان شده و پیشینه آنها بررسی شده است. سپس معادلات حالت مختلفی که در صنعت گاز طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت معادله حالت GERG-2008 ارائه شده و مطالعات مشابهی که با استفاده از این معادله حالت انجام گرفته، مرور شده است.

۲-۲- معادلات حالت

معادله حالت، رابطه بین دما، فشار و حجم را برای یک ماده دلخواه، نشان می‌دهد. ساده‌ترین معادله حالت، معادله حالت گاز ایده آل می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$Pv_m = RT \quad 1-2$$

در معادله (۱-۲)، P فشار، v_m حجم مخصوص مولار، T دما و R ثابت جهانی گازها، می‌باشد. معادله حالت گاز ایده آل زمانی که گاز طبیعی در فشارهای پایین و دماهای بالا قرار دارد، مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و می‌توان آن را بکار گرفت. این معادله حالت، در فشارهای بالا و دماهای پایین، به علت خطای بالا محاسبات مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. از این رو، محققان به دنبال معادله حالتی بودند که بتواند در دماهای پایین و فشارهای بالا، محاسبات را به درستی انجام دهد. در سال ۱۸۷۳ میلادی واندروالس، ضریب تراکم‌پذیری را تعریف کرد. با توجه به مطالعات واندروالس، تراکم-پذیری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z = \frac{V_{Real}}{V_{Ideal}} \quad 2-2$$

در معادله (۲-۲)، Z ضریب تراکم‌پذیری، V_{Real} حجم گاز در حالت واقعی و V_{Ideal} حجم گاز در حالت ایده آل می‌باشد [۸]. همچنین معادله (۲-۲) به صورت زیر نیز بیان می‌شود:

$$Z = \frac{Pv_m}{RT} \quad ۳-۲$$

با توجه به معادله (۳-۲) ضریب تراکم‌پذیری، برای گازهای ایده آل برابر با یک و برای گازهای واقعی می‌تواند مقادیر کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر از یک باشد.

۳-۲- پیشینه معادلات حالت

بخش مهمی از معادلات حالت ارائه‌شده برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری به معادلات حالت درجه سه معروف هستند. برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری با استفاده از این معادلات حالت، لازم است که یک معادله درجه سه از ضریب تراکم‌پذیری، حل شود. در ادامه معادلات حالتی که برای محاسبه خواص ترمودینامیکی مواد خالص و ترکیبات هیدروکربنی بکار گرفته می‌شدند، مرور خواهند شد.

۲-۳-۱- معادلات حالت مکعبی (درجه سه)

در ابتدا معادلات ساده‌ای برای محاسبه خواص مطرح می‌شدند که فقط ارتباط بین دما، فشار و چگالی را بیان می‌کردند. اولین و ساده‌ترین معادله حالت درجه سه توسط آقای واندروالس^۱، به صورت زیر ارائه شد [۹].

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad ۴-۲$$

در معادله (۴-۲) ضریب a نماینده نیروهای بین مولکولی و ضریب b ، نماینده حجم اشغال شده توسط مولکولهای گاز می‌باشند. ضرایب a و b با اعمال شرایط نقطه بحرانی، محاسبه می‌شوند:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_T = 0 \quad ۵-۲$$

¹ Van der Waals

پس از اعمال شرایط نقطه بحرانی بر روی معادله (۲-۴)، ضرایب a و b ، به صورت زیر محاسبه

می‌شوند:

$$a = \frac{27 R^2 T_C^2}{64 P_C} \quad ۶-۲$$

$$b = \frac{RT_C}{8 P_C} \quad ۷-۲$$

در معادلات (۲-۶) و (۲-۷)، T_C دمای نقطه بحرانی و P_C فشار نقطه بحرانی می‌باشند. در سال ۱۹۴۹، ردلیچ و ونگ، ضریب جاذبه معادله واندروالس را بهبود بخشیدند [۱۰] همچنین در سال ۱۹۷۲ میلادی، سوو ثابت جاذبه را در معادله RK^1 ، به صورت تابعی از دما تعریف کرد و معادله RK را بهبود داد. این معادله به SRK^2 ، شناخته می‌شود [۱۱].

این معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\left(P + \frac{a(T)}{v(v+b)} \right) (v-b) = RT \quad ۸-۲۲$$

ضریب $a(T)$ در معادله (۲-۸)، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$a(T) = a_e \alpha(T) \quad ۸-۲$$

¹ Redlich-kwong equation of state

² Soave-Redlich-Kwong equation of state

ضریب a_e در معادله (۱۰-۲)، برای هر دو معادله حالت RK و SRK یکسان می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$a_e = 0.42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad 10-2$$

ضریب $\alpha(T)$ در معادله (۹-۲)، برای هر دو معادله حالت RK و SRK، به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\alpha(T) = \frac{1}{\sqrt{T}} \quad 9-2$$

$$\alpha(T) = \left[1 + m \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{0.5} \right) \right]^2 \quad 12-2$$

جائیکه در معادله (۱۲-۲)، m تابعی از آسنتریک فاکتور، بوده که به صورت زیر تعریف شده است:

$$m = 0.48 + 1.574 \omega - 0.175 \omega^2 \quad 10-2$$

در معادله (۱۳-۲)، ω آسنتریک فاکتور می‌باشد.

در سال ۱۹۷۶ میلادی، پینگ و رابینسون^۱، معادله حالت RK را بهبود داده و معادله حالت Peng-Robinson را ارائه دادند [۹]. آن‌ها پارامتر جاذبه معادله حالت را بهبود بخشیدند و معادله‌ی خود را به صورت زیر تعریف کردند:

$$\left(P + \frac{a(T)}{(v^2 + 2bv - b^2)} \right) (v - b) = RT \quad 11-2$$

¹ Peng-Robinson

پس از اعمال شرایط نقطه بحرانی، ضرایب a و b، به صورت زیر تعیین می گردند:

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad ۱۲-۲$$

$$b = 0.778 \frac{RT_c}{P_c} \quad ۱۳-۲$$

در سال ۱۹۹۰ میلادی، والدراما^۱ معادله حالت درجه سه که توسط پاتل و تجا^۲ ارائه گردیده بود را بسط داد که به معادله حالت VPT، موسوم است [۱۲]. معادله حالت VPT^۳ معادله ای درجه سه است که سه ثابت دارد و شکل کلی آن‌ها به صورت زیر تعریف می گردد:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2 + Uv + W} \quad ۱۴-۲$$

مارتینز^۴ و هال [۱۳]. خواص ترمودینامیکی ترکیبات هیدروکربنی سبکی از گاز طبیعی را با استفاده از معادله حالت (Redlich-Kwong/Peng-Robinson) محاسبه کردند.

به علت سادگی معادلات حالت درجه سه از آنها استفاده زیادی می شود. برخی نرم افزارهای صنعتی مانند HYSYS^۵ برای تعیین خواص ترمودینامیکی از انواع معادلات حالت بهره می گیرند. اما این معادلات حالت محدودیت‌هایی را دارند. خطای بالای محاسبات در مواجهه با مخلوطی مانند گاز طبیعی که شامل ۲۱ عنصر می باشد یکی از این محدودیت‌ها است. معادلات درجه سه در فشارهای پایین و متوسط نتایج مطلوبی را در پیش بینی خواص ترمودینامیکی از خود نشان می دهند، اما در ترکیبات پیچیده مخلوط

^۱ Valderrama

^۲ Patel & Teja

^۳ VPT equation of state

^۴ Martinez and Hall

^۵ HYSYS

گاز طبیعی به خصوص در فشارهای بالا و دماهای پایین نتایج مناسبی را از خود نشان نمی‌دهند [۱۴]. از این رو معادلاتی که بتوانند چگالی هیدروکربن‌های مختلف را با دقت قابل قبولی در فشارهای بالا پیش‌بینی کنند مورد نیاز بود. [۱۵].

۲-۳-۲- معادلات حالت نظیر به نظیر

این معادلات بر اساس شرایط حالت نظیر به نظیر موجود بین دو سیال بیان شده است [۱۶]. شکل عمومی آنها به صورت زیر می‌باشد:

$$Z^r = \frac{Pv}{RT} - 1 = F(V^*, T^*) \quad 15-2$$

در معادله (۲-۱۸)، Z^r تابع انحراف ضریب تراکم‌پذیری، V^* حجم بی‌بعد و T^* دمای بی‌بعد، می‌باشند. جزئیات بیشتر مرتبط به این معادله حالت در مرجع [۷]، داده شده است.

استلا-اورایب و تروسلر^۱ [۱۷]، با بکارگیری معادله حالت ECS، خواص ترمودینامیکی مخلوط‌های مختلف را حساب نمودند. با این فرض که گاز طبیعی مخلوطی از ۱۲ ترکیب عمده دوتایی است، ضریب تراکم‌پذیری و سرعت صوت را برای آن، مورد محاسبه قرار دادند. آنها درصد خطایی که برای محاسباتشان در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی گزارش کرده‌اند بین $\pm 0.036\%$ ، می‌باشد. استلا-اورایب و همکاران [۱۸]، با در نظر گرفتن معادله حالت ECS به عنوان معادله پایه، دو روش بهینه به جهت محاسبه خواص برای گستره‌های متفاوت دمایی و فشاری پیشنهاد داده‌اند. آن‌ها با بکارگیری این مدل دو روش چگالی و سرعت صوت ۱۹ ترکیب دوتایی را محاسبه نمودند. انحراف مطلق میانگین گزارش شده برای محاسبات آن‌ها برای چگالی 0.03% و 0.12% و برای سرعت صوت 0.16% و 0.03% ، در مقایسه با داده‌های تجربی، می‌باشد. معادله حالت ECS^۲ جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی ترکیبات

¹ Estela-Urbe & Trusler

² ECS equation of state

دوتایی، نتایج مطلوبی را از خود نشان داد. از این رو، معمولاً این معادله حالت برای محاسبه خواص ترمودینامیکی ترکیبات پیچیده تر نظیر گاز طبیعی با ترکیبات مولی متفاوت، مورد استفاده قرار نمی-گیرد.

۲-۳-۳- معادلات حالت بر پایه تئوری مولکولی و ترمودینامیک آماری

معادلات حالت بر اساس مبانی مولکولی نیز دقت بالایی برای محاسبه خواص ترمودینامیکی در بازه های دمایی و فشاری گسترده دارند. معادله حالت PC-SAFT یکی از معادلات حالت آماری می باشد. دیاملر و همکاران^۱ [۱۴] داده های آزمایشگاهی تعادل فاز مایع-مایع-بخار گاز طبیعی را با معادله حالت PC-SAFT^۲ و SRK با یکدیگر مورد مقایسه قرار دادند. داده های بدست آمده از معادله حالت PC-SAFT تطابق بیشتری با داده های آزمایشگاهی داشته و نتایج بدست آمده قابل قبول تر بود. سنول [۱۹] با ایجاد تغییرات اندکی در متغیرهای معادله حالت PC-SAFT محاسبات چگالی برخی مواد مانند پروپان و هیدروژن را در قسمت تحت ناحیه فوق بحرانی انجام داد.

۲-۳-۴- معادلات حالت دیگر

وندلند و همکاران^۳ [۲۰] با بکارگیری معادله حالت Backone خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی را با خطای اندکی محاسبه نمودند. نصریفر و بلند [۲۱] با بکارگیری ده معادله حالت، خواص ترمودینامیکی مخلوط گاز طبیعی نظیر چگالی و ظرفیت های گرمایی ویژه را محاسبه کردند و سپس داده های بدست آمده از این معادلات حالت را با یکدیگر مورد ارزیابی قرار دادند و نهایتاً معادله حالتی را ارائه دادند که خطای مطلق میانگین آن برای خواص چگالی و سرعت صوت، در دماهای ۲۲۵-۳۲۳ کلوین و فشارهای کمتر از ۳۴/۶۵ مگاپاسکال نسبت به معادلات حالت دیگر پایین تر بود. فرزانه گرد و همکاران [۲۲] با بکارگیری معادله حالت AGA8 [۲۳] که به عنوان یکی از استانداردهای پذیرفته شده گاز طبیعی

¹ Daimler et al

² PC-SAFT equation of state

³ Wendland et al

می‌باشد، خواص ترمودینامیکی مخلوط گاز طبیعی مانند آنتالپی، انرژی درونی و ضریب تراکم‌پذیری را برای بالغ بر ده ترکیب مختلف از گاز طبیعی با خطای بسیار کمی حساب کردند. معادله حالت AGA8 نیز در فشارهای بالا و دماهای پایین و برای ترکیبات پیچیده‌تر دارای دقت کافی در محاسبه خواص ترمودینامیکی نیست. همچنین معادله حالت AGA8 برای محاسبه خواص ترمودینامیکی هیدروکربن های خالص ناکارآمد است. علاوه بر این، تنها برای ترکیباتی از گاز طبیعی که درصد متان آنها بالاتر از ۶۰ درصد باشد می‌توان از این معادله حالت استفاده کرد.

۲-۴- معادله حالت GERG-2008

جوشک و همکاران^۱ [۲۴] در سال ۱۹۸۹ میلادی، معادله حالتی را برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری طبیعی برای موسسه GERG، پیشنهاد دادند که در مصارف انتقال، کاربرد زیادی داشت. کانز و همکاران^۲ [۲۵]، در سال ۲۰۰۴ میلادی، معادله حالتی را در محدوده گسترده‌ای از دما و فشار برای گاز طبیعی و به سفارش موسسه GERG ارائه کرده‌اند. معادله آن‌ها به شکل تابعی از انرژی آزاد هلمهولتز و بر اساس چگالی، دما و ترکیب گاز می‌باشد. این مدل، به‌صورت بسیار گسترده برای مبردها و گاز طبیعی، ترکیبات شبیه گاز طبیعی و مخلوط‌های دیگر کاربرد دارد. کانز و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۰۸ معادله حالت GERG-2004 را که فقط ۱۸ جزء از ۲۱ جزء گاز طبیعی را پوشش می‌داد اصلاح کرده و سه عنصر دیگر به آن اضافه کردند و نسخه اصلاح‌شده را تحت عنوان معادله حالت GERG-2008 معرفی نمودند. این معادله حالت یک ورژن توسعه‌یافته از معادله GERG-2004 می‌باشد. این معادله به‌طور رسمی در سال ۲۰۰۷ ارائه و در سال ۲۰۰۸ به‌روز شد. برای مخلوط‌های شامل ۱۸ جزئی که توسط معادله GERG-2004 پوشش داده می‌شود، معادله حالت GERG-2008 نیز نتایج تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. هر دو معادله با فرمول‌های ریاضی یکسانی محاسبه می‌شوند و تنها تفاوت آن‌ها در مقدار

¹ Jaeschke et al

² Kunz et al

N است که نشان دهنده تعداد اجزاء می باشد. اجزای گازی پوشش داده شده توسط این معادله حالت به صورت زیر می باشد:

متان، نیتروژن، کربن دی اکسید، اتان، پروپان، ان-بوتان، ایزو بوتان، ان-پنتان، ایزوپنتان، ان-هگزان، ان-هپتان، ان-اکتان، ان-نونان، ان-دکان، هیدروژن، اکسیژن، کربن مونواکسید، آب، هیدروژن سولفید، هلیوم و آرگون.

برای تمام گستره این اجزاء، معادله حالت GERG-2008 فاز گاز، فاز مایع، ناحیه فوق بحرانی و تعادل فازی بخار-مایع را برای مخلوط این اجزاء پوشش می دهد. گستره معمول اعتبار این معادله در بازه دمایی ۹۰ تا ۴۵۰ کلوین و فشار تا ۳۵ مگاپاسکال می باشد. محدوده معتبر گسترش یافته این معادله به بازه دمایی ۶۰ تا ۷۰۰ کلوین و فشار تا ۷۰ مگاپاسکال می رسد. اطلاعات عددی داده شده (شامل همه مشتق های پیچیده) معادله حالت GERG-2008 را قادر به استفاده در کاربردهای بسیاری نظیر انتقال توسط خط لوله یا کشتی ها، ذخیره سازی و مایع سازی گاز طبیعی و پردازش برای جداسازی اجزاء گاز می سازد. همچنین معادله GERG-2008، از معادله AGA8 عملکرد بهتری داشته و بازه دمایی، فشاری و ترکیب معادله حالت GERG-2008 از معادله AGA8 گسترده تر است. معادله GERG-2008 بر مبنای انرژی آزاد هلمهولتز، یک فرمولاسیون که همه خواص ترمودینامیکی با توجه به دما، چگالی و ترکیب مولی و مشتقات مربوط به انرژی آزاد هلمهولتز به دست می دهد را ارائه می کند. معادله حالت GERG-2008 به عنوان استاندارد ISO 20765-2 برای گاز طبیعی قرار گرفته است.

۲-۵- مروری بر مطالعات انجام گرفته در زمینه ی معادله حالت GERG-2008

گومز و همکاران^۱ [۲۶] رفتار ترمودینامیکی مخلوط بایو گاز مصنوعی تشکیل شده از متان (۵۰٪)، کربن دی اکسید (۳۵٪)، نیتروژن (۱۰٪) و کربن مونواکسید (۵٪) را مطالعه و با داده های آزمایشگاهی

¹ Hernandez Gommez et al

تطبیق داده‌اند. چگالی در دماهای بین ۲۷۵ تا ۴۰۰ کلوین و در فشارهای تا ۲۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. سپس داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده را با چگالی به‌دست‌آمده از معادله حالت GERG-2008 مقایسه کرده‌اند که خطای آن در حدود $\pm 0.2\%$ بوده است هوگس و همکاران^۱ [۲۷] اندازه‌گیری‌های VLE^۲ را در فشارهای تا ۹ مگاپاسکال و دماهای ۲۰۳ تا ۲۷۳ کلوین برای ترکیبات شامل CH_4 ، C_2H_6 ، C_3H_8 ، iC_4H_{10} ، nC_4H_{10} و یا نیتروژن گزارش کردند. در فاصله‌های دور از نقطه بحرانی مخلوط، پیش‌بینی‌های معادله حالت GERG-2008 از پیش‌بینی‌های معادله حالت Peng-Robinson دقیق‌تر است. برای سنجش میزان سختی مناسب لوله‌ها باید رفتار تخلیه سرعت صوت در سیال به‌طور دقیق اندازه‌گیری شود. الشهامی و همکاران یک مدل جدید تخلیه با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی ارائه دادند که در این مدل معادله حالت GERG-2008 پیاده‌سازی شده است تا که خواص ترمودینامیکی مخلوط‌های CO_2 را پیش‌بینی کنند. ورزنده و همکاران [۲۸] یک مقایسه همه‌جانبه بین معادله حالت GERG-2008 و معادلات حالت مکعبی (SRK و PR) و معادلات حالت غیر مکعبی (PC-SAFT و Soave-BWR) در محاسبه خواص ترمودینامیکی مانند ظرفیت گرمایی و ضریب ژول تامسون برای اجزای خالص و ترکیبات چند جزئی در یک بازه دمایی و فشاری گسترده انجام دادند. زاراته و همکاران^۳ [۲۹] برای محاسبه نقاط بحرانی ترکیبات گاز طبیعی از معادله حالت GERG-2008 استفاده کردند. سپس داده‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. ماکزیمم خطا برای دما و فشار به ترتیب ۱/۳۰۱٪ و ۱۱/۰۸۷٪ بوده است. همچنین معادله حالت GERG-2008 را با معادلات حالت دیگر نظیر PR، SRK، PSRK، SPHCT و PC-SAFT مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که معادله حالت GERG-2008 برای پیش‌بینی نقاط بحرانی مناسب‌تر است و نتایج به‌دست‌آمده از آن به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌باشد. لافتن^۴ [۳۰] با استفاده از معادله حالت GERG-2008 نقطه شبنم

¹ Huges et al

² Vapor-Liquid equilibria

³ Guerrero-Zárate et al

⁴ A. Laughton et al

هیدروکربن‌های مخلوط گاز طبیعی را محاسبه کرده است. گومز و همکاران [۳۱] رفتار یک مخلوط بایومتان شامل چهار جزء متان (۹۶,۴۸٪)، با مقدار کمی کربن دی‌اکسید (۲٪)، نیتروژن (۱/۵٪) و مقدار بسیار کمی اکسیژن (۰/۰۲٪) را با استفاده از داده‌های دقیق تجربی مطالعه کردند. وی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی چگالی ترکیب موردنظر با دقت بالا در بازه دمایی (۲۴۰-۳۵۰) کلوین و فشار تا ۱۴ مگاپاسکال محاسبه کرد. سپس داده‌های تجربی حاصل را با چگالی محاسبه‌شده از معادلات حالت GERG-2008 و AGA8-DC92 مقایسه کرد. انحراف بین داده‌های تجربی و چگالی محاسبه‌شده از معادله GERG-2008 در حدود $\pm 0.03\%$ برای همه دماها بود که نشان‌دهنده عملکرد خوب این معادله حالت برای گاز طبیعی، وقتی که می‌خواهیم یک مخلوط بایومتان را توصیف کنیم می‌باشد. انحراف بین داده‌های تجربی و چگالی‌های محاسبه‌شده از معادله حالت AGA-8 در دمای ۲۵۰ کلوین و فشار بیشتر از ۱۰ مگاپاسکال و همچنین برای دمای ۲۴۰ کلوین و فشار بیشتر از ۹ مگاپاسکال بیشتر از 0.04% بودند. گومز نتیجه گرفت که انحرافات مربوط به محاسبه چگالی از معادله حالت AGA8-DC92 نسبت به انحرافات مربوط به محاسبه چگالی از معادله حالت GERG-2008 بزرگ‌تر می‌باشد. سانز و همکاران [۳۲] سرعت صوت را برای دو مخلوط (نیتروژن ۹۵٪ + مونواکسید کربن ۵٪) و (۹۰٪ نیتروژن + ۱۰٪ مونواکسید کربن) با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی برای دو دمای ۲۷۳/۱۵ و ۳۲۵/۱۵ کلوین و فشار تا ۱۰ مگاپاسکال گزارش کردند. سپس نتایجشان را با معادله حالت GERG-2008 مقایسه کردند. عدم قطعیت این داده‌ها تا 0.016% گزارش شده است. مارتین و همکاران [۳۳] سرعت صوت را برای یک مخلوط بایوگاز شامل متان، نیتروژن، کربن دی‌اکسید و کربن مونواکسید در فشارهای بین ۱ تا ۱۲ مگاپاسکال و دماهای ۲۷۳، ۳۰۰ و ۳۲۵ کلوین با استفاده از یک رزوناتور کروی محاسبه کردند. سپس داده‌های موجود را با معادله حالت GERG-2008 مقایسه نمودند. انحراف بین داده‌های تجربی و مقادیر به‌دست‌آمده از معادله GERG-2008 کمتر از 0.07% در دمای ۳۲۵ کلوین، کمتر از 0.04% در

¹ Sanz J-Prez et al

² Martin et al

دمای ۳۰۰ کلوین بود. اما در دمای ۲۷۳ و در بالاترین فشار انحراف ۰/۳۴٪ گزارش شده است. گومز و همکاران [۳۴] معادله حالت GERG-2008 را وقتی که با گاز طبیعی غنی شده با هیدروژن مواجه است با داده‌های دقیق تجربی مخلوط‌های گاز طبیعی مورد ارزیابی قرار داده است. در این کار، داده‌های بسیار دقیق تجربی برای دو مخلوط شبیه گاز طبیعی گزارش شده است. مخلوط اول مشابه یک گاز طبیعی معمولی شامل ۱۱ جزء به همراه کسرهای مولی شامل ۰/۸۸۴۵ متان به‌عنوان ترکیب اصلی، ۰/۰۰۵ اکسیژن، ۰/۰۴ نیتروژن، ۰/۰۱۵ کربن دی‌اکسید، ۰/۰۴ اتان، ۰/۰۱ پروپان، ۰/۰۰۲ برای هرکدام از اجزای ان-بوتان و ایزوبوتان، و نهایتاً ۰/۰۰۰۵ برای هرکدام از اجزای ایزوپنتان، ان-پنتان و ان-هگزان می‌باشد. مخلوط دوم گاز طبیعی غنی شده با هیدروژن و شامل ۱۳ جزء با کسرهای مولی ۰/۷۸۸۵ متان، ۰/۰۳ هیدروژن، ۰/۰۰۵ هلیوم، ۰/۱۲ نیتروژن، ۰/۰۴ کربن دی‌اکسید، ۰/۰۰۷۵ اتان، ۰/۰۰۳ پروپان، ۰/۰۰۲ هم برای ان-بوتان و هم برای ایزوبوتان، ۰/۰۰۰۵ برای هرکدام از اجزای نئوپنتان، ایزوپنتان، ان-پنتان و ان-هگزان می‌باشد. مقادیر چگالی در یک شرایط هم‌دما بین دماهای ۲۶۰ و ۳۵۰ کلوین و فشار تا ۲۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. وی سپس داده‌های به‌دست‌آمده را با چگالی‌های محاسبه‌شده از معادلات حالت GERG-2008 و AGA8-DC92 مقایسه کرد تا که عملکرد این معادلات حالت را برای مخلوط‌های واقعی بسنجد. وی میزان متوسط انحراف مطلق از معادله GERG-2008 برابر ۰/۰۲۷٪ و برای AGA8-DC92 ۰/۰۷۸٪ برای مخلوط اول و متوسط انحراف مطلق از معادله GERG-2008 برابر ۰/۰۹۵٪ و برای AGA8-DC92 برابر ۰/۰۶۲٪ برای مخلوط دوم گزارش کرد. او بیشترین انحراف نسبی از معادله GERG-2008 برابر ۰/۰۹۵٪ و از معادله AGA8-DC92 برابر ۰/۱۲۷٪ برای مخلوط اول شامل ۱۱ جزء و ۰/۲۹۱٪ از معادله GERG-2008 و ۰/۱۹۳٪ از معادله AGA8-DC92 برای مخلوط دوم (گاز غنی شده با هیدروژن) گزارش کرد. به‌طور کلی عملکرد معادله حالت AGA8-DC92 در مواجهه با هر دو مخلوط گاز طبیعی معمولی و گاز طبیعی غنی شده با هیدروژن راضی‌کننده بود و در هر دو حالت نتایج مشابهی به دست داد. همچنین معادله حالت GERG-2008 عملکرد بهتری را در مواجهه با مخلوط اول (گاز طبیعی معمولی) نسبت به معادله حالت AGA8-DC92 داشت، اما در

مواجهه با گاز طبیعی غنی شده با هیدروژن در دماهای پایین و فشارهای بالا، انحراف بیشتری را نسبت به معادله حالت AGA8-DC92 از خود نشان داد. یوان و همکاران¹ [۳۵] به ارزیابی مدل‌هایی که پارامترهای فیزیکی گاز طبیعی را در فرایند مایع سازی محاسبه می‌کنند پرداخته است. فرایند مایع سازی گاز طبیعی یک سیستم پیچیده با تغییرات دمایی می‌باشد. محاسبه دقیق خواص ترمودینامیکی و پارامترهای تعادل فازی، با شرایط کاری متغیر برای طراحی و شبیه‌سازی فرایندهای مایع سازی بسیار اهمیت دارد. وی نرم‌افزار Aspen Plus به همراه داده‌های دقیق تجربی برای انجام یک مقایسه و تحلیل همه‌جانبه میان معادلات حالت SRK، Peng-Robinson، LKP و معادله حالت GERG-2008 در محاسبه چگالی گاز و مایع اشباع، ظرفیت گرمایی ویژه، آنتالپی، نقطه شبنم و تعادل فازی بخار-مایع به خدمت گرفت. اگرچه معادلات حالت SRK، Peng-Robinson و معادله حالت LKP مدل‌های خوبی برای محاسبه خواص فیزیکی فرایندهای مایع سازی گاز طبیعی می‌باشند، اما انحرافات زیادی از داده‌های دقیق تجربی برای تعدادی از پارامترها در استفاده از این معادلات حالت مشاهده شد که ممکن است به نتایج نادرستی برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهای مایع سازی منجر شود. معادله حالت GERG-2008 دقت خوبی در محاسبه خواص ترمودینامیکی در یک بازه گسترده دمایی، فشاری و اجزای گاز طبیعی از خود نشان داده است. او نهایتاً معادله حالت GERG-2008 به‌عنوان پایه و اساس برای محاسبه خواص ترمودینامیکی در فرایندهای مایع سازی گاز طبیعی پیشنهاد داد.

¹ Zangming Yoan et al

در نهایت نتیجه گیری شد که برای تعیین خواص ترمودینامیکی از دو روش آزمایشگاهی و استفاده از معادلات حالت استفاده می‌شود. روش استفاده از معادلات حالت دارای مزایایی از جمله صرفه جویی در زمان و هزینه پایین تر نسبت به روش آزمایشگاهی می‌باشد. در همین راستا معادلات حالت مختلفی ارائه شده است که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. معادله حالت GERG-2008 معادله گسترده ای جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با ترکیبات مختلف و در بازه گسترده دمایی و فشاری بالا می‌باشد. در این تحقیق ابتدا خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با استفاده از این معادله حالت و بر اساس متغیرهای ورودی دما، فشار و ترکیب مولی گاز محاسبه شده است. همچنین در صنعت گاز طبیعی، در برخی بخش‌ها مانند شیرهای فشار شکن، توربین‌ها و کمپرسورها مشخصه های ترمودینامیکی دیگری نظیر آنتالپی و آنتروپی موجود است. لذا هدف اصلی این پژوهش محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با استفاده از ورودی های متفاوت نظیر (فشار، آنتالپی و ترکیب مولی گاز)، (فشار، آنتروپی و ترکیب مولی گاز) و (انرژی داخلی، حجم مخصوص و ترکیب مولی گاز) می‌باشد که برای اطلاع از خواص ترمودینامیکی خروجی شیرهای فشار شکن، توربین‌ها و کمپرسورها مورد نیاز می‌باشد و می‌تواند در صنعت گاز طبیعی بسیار مورد استفاده قرار گیرد.

٣- فصل سوم: روابط ریاضی معادله حالت GERG-2008

۳-۱- مقدمه

هدف از این فصل، به دست آوردن روابط ریاضی مربوط برای محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از معادله حالت GERG-2008 می‌باشد. برای این منظور ابتدا انرژی آزاد هلمهولتز معرفی شده و نحوه محاسبه آن بیان گردیده است. در ادامه با استفاده از تعریف انرژی آزاد هلمهولتز و معادله حالت GERG-2008، روابط ریاضی مربوط به محاسبه خواص ترمودینامیکی از جمله: ضریب تراکم‌پذیری، چگالی، ظرفیت گرمایی در فشار و حجم ثابت، ضریب ژول - تامسون، سرعت صوت، انرژی داخلی، آنتالپی و آنتروپی، به‌طور جداگانه بیان گردیده است. در نهایت با استفاده از روابط مربوط به محاسبه خواص ترمودینامیکی، روش‌های محاسبه خواص ترمودینامیکی بر اساس ورودی‌های مختلف (فشار، آنتالپی و ترکیب گاز)، (فشار، آنتروپی و ترکیب گاز) و (انرژی داخلی، حجم مخصوص و ترکیب گاز) نیز به‌طور کامل بسط داده شده است. روابط مربوط به انرژی آزاد هلمهولتز بر اساس استاندارد ISO 20765-2 و مقاله کانز و همکاران [۲۵] می‌باشد.

۳-۲- انرژی آزاد هلمهولتز

انرژی آزاد هلمهولتز مخلوط یک گاز طبیعی در یک دما T ، چگالی ρ و ترکیب مولی داده شده \bar{x} به صورت ترکیبی از قسمت ایده آل (a^o) و قسمت باقیمانده (a^r) به صورت زیر می‌باشد:

$$a(\rho, T, \bar{x}) = a^o(\rho, T, \bar{x}) + a^r(\rho, T, \bar{x}) \quad ۱-۳$$

و خاصیت باقیمانده یک گاز به صورت اختلاف بین خاصیت یک گاز یا مخلوط همگنی از یک گاز در حالت واقعی نسبت به خاصیت آن در حالت ایده آل در دما و چگالی یکسان تعریف می‌شود.

۳-۲-۱- انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده

با در نظر گرفتن فرم بی بعد انرژی آزاد هلمهولتز به صورت $\alpha = a/(RT)$ ، انرژی آزاد هلمهولتز

کاهیده به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\alpha(\delta, \tau, \bar{x}) = \alpha^o(\rho, T, \bar{x}) + \alpha^r(\delta, T, \bar{x}) \quad ۲-۳$$

در این معادله، انرژی آزاد هلمهولتز به صورت تابعی از چگالی مخلوط کاهیده (بی بعد) δ و معکوس

دمای مخلوط کاهیده (بی بعد) τ می باشد. همچنین δ و τ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_r(\bar{x})} \quad ۳-۳$$

$$\tau = \frac{T_r(\bar{x})}{T} \quad ۴-۳$$

که در آن T_r و ρ_r توابع کاهیده برای چگالی و دمای مخلوط بوده به طوری که فقط به ترکیب

مولی مخلوط وابسته هستند و روابط مربوط برای محاسبه آنها طبق استاندارد ISO20765-2 به صورت

زیر می باشد:

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^N x_i^2 \frac{1}{\rho_{c,i}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N 2x_i x_j \beta_{v,ij} \gamma_{v,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v,ij}^2 x_i + x_j} \left[\frac{1}{8} \right] \left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}} \right)^3 \quad ۵-۳$$

$$T_r(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i^2 T_{c,i} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 2x_i x_j \beta_{T,ij} \gamma_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j} (T_{c,i} T_{c,j})^{0.5} \quad ۶-۳$$

پارامترهای دودویی در معادلات بالا، انحراف بین رفتار مخلوط واقعی و رفتار ترکیب ایده آل را در

نظر می گیرد. مقادیر پارامترهای دودویی $\beta_{v,ij}$ ، $\gamma_{v,ij}$ ، $\beta_{T,ij}$ ، $\gamma_{T,ij}$ در معادلات بالا برای همه مخلوط‌های

دودویی در پیوست الف داده شده است. $\rho_{c,i}$ و $T_{c,i}$ پارامترهای بحرانی مواد خالص بوده و مقدار آنها در

پیوست الف داده شده است. رابطه بین ضرایب داده شده در معادلات (۳-۵) و (۳-۶) به صورت زیر می باشد:

$$\gamma_{T,ij} = \gamma_{T,ji} \quad , \quad \beta_{T,ij} = 1 / \beta_{T,ji} \quad , \quad \gamma_{v,ij} = \gamma_{v,ji} \quad , \quad \beta_{v,ij} = 1 / \beta_{v,ji}$$

۳-۲-۲- روابط مربوطه برای محاسبه خواص ترمودینامیکی

برای محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی به مشتقات انرژی آزاد هلمهولتز با توجه به متغیرهای مخلوط کاهیده δ و τ نیاز است. تمام خواص ترمودینامیکی می تواند به صورت ترم‌هایی از انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده α و مشتقات مختلف آن نوشته شود. مشتقات لازم برای محاسبه خواص، α_τ ، $\alpha_{\tau\tau}$ ، α_δ ، $\alpha_{\delta\delta}$ و $\alpha_{\delta\tau}$ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\alpha_\tau = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} \right)_{\delta, \bar{x}} \quad \alpha_{\tau\tau} = \left(\frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} \right)_{\delta, \bar{x}} \quad \alpha_\delta = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_{\tau, \bar{x}} \quad \alpha_{\delta\delta} = \left(\frac{\partial^2 \alpha}{\partial \delta^2} \right)_{\tau, \bar{x}}$$

$$\alpha_{\delta\tau} = \left(\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_{\tau, \bar{x}} \right)_{\delta, \bar{x}}$$

هر مشتق برابر مجموع بخش ایده آل و بخش باقیمانده می باشد و در ادامه به صورت کامل برای محاسبه هر خاصیت بسط داده می شوند.

جرم مولی مخلوط گاز طبیعی، M ، از ترکیب اجزای تشکیل دهنده گاز، x_i ، و جرم مولی آن‌ها، M_i ، به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$M(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \cdot M_i \tag{۳-۷}$$

و چگالی جرمی D نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$D = \rho M \tag{۳-۸}$$

مقادیر جرم مولی M_i مواد خالص در پیوست الف داده شده است. در این معادلات R ثابت مولی گاز می باشد و R/M ثابت ویژه گاز می باشد.

۳-۲-۳- انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده بخش گاز ایده آل

برای یک ماده خالص، انرژی آزاد هلمهولتز گاز ایده آل به صورت زیر نوشته می شود:

$$a^o(\rho, T) = h^o(T) - RT - Ts^o(\rho, T) \quad 9-3$$

برای گاز ایده آل، آنتالپی h^o تنها تابع دما می باشد، در حالی که آنتروپی s^o به دما و چگالی وابسته است. هر دو خاصیت می توانند به صورت ظرفیت گرمایی فشار ثابت گاز ایده آل به صورت زیر بیان شوند:

$$h^o(T) = \int_{T_0}^T c_p^o dT + h_0^o \quad 10-3$$

$$s^o(\rho, T) = \int_{T_0}^T \frac{c_p^o - R}{T} dT - R \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0^o}\right) + s_0^o \quad 11-3$$

وقتی که معادلات $h^o(T)$ و $s^o(\rho, T)$ در معادله (۹-۳) جایگذاری می شوند معادله زیر به دست

می آید:

$$a^o(\rho, T) = \left[\int_{T_0}^T c_p^o dT + h_0^o \right] - RT - T \left[\int_{T_0}^T \frac{c_p^o - R}{T} dT - R \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0^o}\right) + s_0^o \right] \quad 12-3$$

که در آن همه متغیرهای با پانویس "0" به حالت مرجع دلخواه بازمی گردند. حالت مرجع آنتالپی و آنتروپی در نظر گرفته شده در اینجا برابر با دمای 298.15 کلوین و فشار 0.101325 مگاپاسکال برای گاز ایده آل می باشند.

حال برای محاسبه a^o ، از رابطه مربوط برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت گاز ایده

آل استفاده می کنیم که به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{c_p^o}{R} = 1 + n_3^o + \sum_{k=4,6} n_k^o \left(\frac{\mathcal{G}_k^o \frac{T_c}{T}}{\sinh\left(\mathcal{G}_k^o \frac{T_c}{T}\right)} \right)^2 + \sum_{k=5,7} n_k^o \left(\frac{\mathcal{G}_k^o \frac{T_c}{T}}{\cosh\left(\mathcal{G}_k^o \frac{T_c}{T}\right)} \right)^2 \quad 13-3$$

مقادیر ضرایب n_k^o و g_k^o معادله (۳-۱۳) در استاندارد ISO20765-2 داده شده است.

در نهایت پس از جایگذاری معادله (۳-۱۳) در معادله (۳-۱۲)، معادله مربوط برای محاسبه انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده گاز ایده آل، α^o برای یک مخلوط در یک چگالی داده شده ρ ، دما T و ترکیب مولی مخلوط \bar{x} ، به صورت زیر نوشته می شود:

$$\alpha^o(\rho, T, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i [\alpha_{oi}^o(\rho, T) + \ln x_i] \quad ۱۴-۳$$

در این معادله α_{oi}^o فرم بی بعد انرژی آزاد هلمهولتز گاز ایده آل جزء i ام می باشد و به صورت زیر نوشته می شود:

$$\alpha_{oi}^o(\rho, T) = \ln\left(\frac{\rho}{\rho_{c,i}}\right) + \frac{R^*}{R} \left[n_{oi,1}^o + n_{oi,2}^o \frac{T_{c,i}}{T} + n_{oi,3}^o \ln\left(\frac{T_{c,i}}{T}\right) + \sum_{k=4,6} n_{oi,k}^o \ln\left|\sinh\left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T}\right)\right| - \sum_{k=5,7} n_{oi,k}^o \ln\left|\cosh\left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T}\right)\right| \right] \quad ۱۵-۳$$

در معادله (۳-۱۵) $\rho_{c,i}$ و $T_{c,i}$ پارامترهای بحرانی اجزای خالص می باشند و $R = 8.314472 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ثابت مولی گاز می باشد. مقادیر ضرایب $n_{oi,k}^o$ و پارامتر $g_{oi,k}^o$ برای همه اجزاء در استاندارد آورده شده است.

۳-۲-۴- انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده بخش باقیمانده

بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز نیز به صورت زیر نوشته می شود:

$$\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \alpha_{oi}^r(\delta, \tau) + \Delta \alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) \quad ۱۶-۳$$

در معادله (۳-۱۶)، پارامتر $\alpha_{oi}^r(\delta, \tau)$ انرژی آزاد هلمهولتز باقیمانده جزء i ام نام دارد که در کسر مولی مطابق با ماده خالص ضرب شده است و با متغیرهای مخلوط کاهیده δ و τ محاسبه می‌شوند و به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\alpha_{oi}^r(\delta, \tau) = \sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} + \sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} e^{-\delta^{c_{oi,k}}} \quad ۱۷-۳$$

مقادیر مربوط به ضرایب $n_{oi,k}$ و توان‌های $d_{oi,k}$ ، $t_{oi,k}$ و $c_{oi,k}$ برای همه اجزاء در استاندارد داده شده است.

جمله دوم $\Delta\alpha^r$ تابع کاهیده نام دارد. هدف تابع کاهیده بهبود بخشیدن دقت مدل مخلوط در توصیف خواص ترمودینامیکی در مواردی که پارامترهای توابع کاهیده برای چگالی و دما با داده‌های دقیق تجربی تطابق کافی ندارند، می‌باشد. تابع کاهیده $\Delta\alpha^r$ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \alpha_{ij}^r(\delta, \tau) \quad ۱۸-۳$$

در این معادله، تابع $\alpha_{ij}^r(\delta, \tau)$ تنها به متغیرهای کاهیده δ و τ وابسته است و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\alpha_{ij}^r(\delta, \tau) = \sum_{k=1}^{K_{Pol,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} + \sum_{K=K_{Pol,ij}+1}^{K_{Pol,ij}+K_{Exp,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} e^{-\eta_{ij,k}(\delta-\varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k}(\delta-\gamma_{ij,k})} \quad ۱۹-۳$$

مقادیر $n_{ij,k}$ و توان‌های $d_{ij,k}$ ، $t_{ij,k}$ ، $\eta_{ij,k}$ ، $\varepsilon_{ij,k}$ ، $\beta_{ij,k}$ و $\gamma_{ij,k}$ برای همه توابع کاهیده موردنظر در معادله حالت GERG-2008 در استاندارد داده شده است. همچنین مقادیر F_{ij} نیز برای

توابع کاهیده در استاندارد آمده است.

۳-۳- استخراج روابط برای محاسبه خواص ترمودینامیکی

در این قسمت به استخراج روابط ترمودینامیکی برای محاسبه خواص می پردازیم.

۳-۳-۱- چگالی

چگالی به عنوان یکی از مهم ترین خواص ترمودینامیکی در صنعت محسوب می شود. جهت محاسبه

چگالی، بعد از محاسبه انرژی آزاد هلمهولتز، رابطه زیر را در نظر می گیریم.

$$\frac{P}{\rho RT} = Z \quad ۲۰-۳$$

که P فشار مطلق، T دمای مطلق و Z ضریب تراکم پذیری می باشد. ضریب تراکم پذیری یا ، یک ضریب تصحیح است که مشخص کننده میزان انحراف رفتار گاز واقعی از گاز ایده آل می باشد و به عنوان نسبت حجم مولی گاز نسبت به حجم مولی همان گاز در حالت ایده آل در یک دما و فشار یکسان بیان می گردد. این یک خاصیت ترمودینامیکی مناسب برای اصلاح قانون گاز ایده آل می باشد تا رفتار واقعی گاز را حساب کند و رابطه آن به صورت زیر بیان می شود:

$$Z = 1 + \delta \alpha_{\delta}^r \quad ۲۱-۳$$

حال برای محاسبه ضریب تراکم پذیری نیاز به محاسبه پارامتر مشتق اول بخش باقیمانده $\alpha^r(\delta, \tau, \bar{X})$ انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده α مخلوط با توجه به متغیرهای کاهش یافته δ و τ به صورت زیر می باشد:

$$\alpha_{\delta}^r = \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_{\tau, \bar{X}} = \sum_{i=1}^N x_i \left(\frac{\partial \alpha_{oi}^r(\delta, \tau)}{\partial \delta} \right)_{\tau} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left(\frac{\partial \alpha_{ij}^r(\delta, \tau)}{\partial \delta} \right)_{\tau} \quad ۲۲-۳$$

که در آن جملات $\left(\frac{\partial \alpha_{oi}^r(\delta, \tau)}{\partial \delta}\right)_\tau$ و $\left(\frac{\partial \alpha_{ij}^r(\delta, \tau)}{\partial \delta}\right)_\tau$ به صورت زیر بسط داده شده است:

$$\left(\frac{\partial \alpha_{oi}^r(\delta, \tau)}{\partial \delta}\right)_\tau = \sum_{k=1}^{k_{pol, i}} n_{oi, k} d_{oi, k} \delta^{d_{oi, k}-1} \tau^{t_{oi, k}} + \sum_{k=k_{pol, i}+1}^{k_{pol, i}+k_{Exp, i}} n_{oi, k} \delta^{d_{oi, k}-2} \left((d_{oi, k} - c_{oi, k} \delta^{c_{oi, k}})(d_{oi, k} - 1 - c_{oi, k} \delta^{c_{oi, k}}) - c_{oi, k}^2 \delta^{c_{oi, k}} \right) \tau^{t_{oi, k}} \exp(-\delta^{c_{oi, k}})$$

۲۳-۳

$$\left(\frac{\partial \alpha_{ij}^r(\delta, \tau)}{\partial \delta}\right)_\tau = \sum_{k=1}^{k_{pol, ij}} n_{ij, k} d_{ij, k} \delta^{d_{ij, k}-1} \tau^{t_{ij, k}} + \sum_{k=k_{pol, ij}+1}^{k_{pol, ij}+k_{Exp, ij}} n_{ij, k} \delta^{d_{ij, k}} \tau^{t_{ij, k}} \exp(-\eta_{ij, k} (\delta - \varepsilon_{ij, k})^2 - \beta_{ij, k} (\delta - \gamma_{ij, k})) \left[\frac{d_{ij, k}}{\delta} - 2\eta_{ij, k} (\delta - \varepsilon_{ij, k}) - \beta_{ij, k} \right]$$

۲۴-۳

و در نهایت پس از محاسبه α_δ^r رابطه ضریب تراکم پذیری توسط معادله حالت GERG-2008 که با استاندارد ISO 20765-2 مطابقت دارد، حاصل می شود. سپس با جایگذاری رابطه ضریب تراکم پذیری در معادله (۳-۲۰) و با توجه به اینکه ورودی ها بر حسب دما، فشار و ترکیب گاز می باشد، محاسبات به یک معادله غیرخطی رسیده که تنها مجهول آن چگالی است. پس با استفاده از روش های حل معادلات غیرخطی نظیر نیوتن-رافسون، معادله (۳-۲۰) را حل می شود. بدین ترتیب چگالی و سپس ضریب تراکم پذیری محاسبه می شود.

کل گستره اعتبار معادله حالت GERG-2008 بازه های دما و فشارهای زیر می باشد:

$$\text{محدوده عادی} \quad 90 \text{ K} \leq T \leq 450 \text{ K} \quad p \leq 35 \text{ Mpa}$$

$$\text{محدوده گسترش یافته} \quad 60 \text{ K} \leq T \leq 700 \text{ K} \quad p \leq 70 \text{ MPa}$$

۳-۳-۲- انرژی درونی

انرژی درونی یکی از خاصیت های مهم ترمودینامیکی است که به ذرات سازنده و فاز ماده مربوط می گردد و نمی توان با استفاده از روش آزمایشگاهی مقدار آن را محاسبه کرد. انرژی درونی به صورت زیر محاسبه می شود:

برای محاسبه انرژی درونی ما نیاز به محاسبه مشتقات اول از بخش ایده آل انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده α^o و بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده، α^r ، نسبت به معکوس دمای کاهیده τ داریم. مشتق اول بخش گاز ایده آل انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده نسبت به متغیر کاهیده τ برای محاسبه انرژی درونی به صورت زیر می باشد:

$$\alpha_{\tau}^o = \sum_{i=1}^N x_i \frac{T_{c,i}}{T_r} \left(\frac{\partial \alpha_{oi}^o}{\partial (T_{c,i}/T)} \right)_{\rho} \quad 25-3$$

که در آن جمله $\left(\frac{\partial \alpha_{oi}^o}{\partial (T_{c,i}/T)} \right)_{\rho}$ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\left(\frac{\partial \alpha_{oi}^o}{\partial (T_{c,i}/T)} \right)_{\rho} = \frac{R^*}{R} \left[n_{oi,2}^o + n_{oi,3}^o \frac{T}{T_{c,i}} + \sum_{k=4,6} n_{oi,k}^o \frac{g_{oi,k}^o}{\tanh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right)} - \sum_{k=5,7} n_{oi,k}^o g_{oi,k}^o \tanh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right] \quad 26-3$$

همچنین مشتق اول بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز نسبت به متغیر کاهیده τ برای محاسبه انرژی درونی به صورت زیر می باشد:

$$\alpha_{\tau}^r = \sum_{i=1}^N x_i \left(\frac{\partial \alpha_{oi}^r}{\partial \tau} \right)_{\delta} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left(\frac{\partial \alpha_{ij}^r}{\partial \tau} \right)_{\delta} \quad 27-3$$

که در آن روابط جملات $\left(\frac{\partial \alpha_{ij}^r}{\partial \tau} \right)_{\delta}$ و $\left(\frac{\partial \alpha_{oi}^r}{\partial \tau} \right)_{\delta}$ به صورت زیر می باشد:

$$\left(\frac{\partial \alpha_{oi}^r}{\partial \tau}\right)_{\delta} = \sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} t_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}-1} + \sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} t_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}-1} \exp(-\delta^{c_{oi,k}}) \quad 28-3$$

$$\left(\frac{\partial \alpha_{ij}^r}{\partial \tau}\right)_{\delta} = \sum_{k=1}^{k_{pol,ij}} n_{ij,k} d_{ij,k} t_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}-1} \tau^{t_{ij,k}-1} + \sum_{k=k_{pol,ij}+1}^{k_{pol,ij}+k_{Exp,ij}} n_{ij,k} t_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}-1} \exp(-\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k} (\delta - \gamma_{ij,k})) \quad 29-3$$

و در نهایت معادله موردنظر برای محاسبه انرژی درونی با معادله حالت GERG-2008 مطابق با استاندارد ISO20765-2 به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{u(\delta, \tau, \bar{x})}{RT} = \tau(\alpha_{\tau}^o + \alpha_{\tau}^r) \quad 30-3$$

۳-۳-۳- آنتالپی

مقدار گرمای داده شده یا گرفته شده از یک دستگاه در طی یک فرایند فشار ثابت با تغییرات آنتالپی آن برابر است. آنتالپی نیز مانند انرژی درونی یکی از خواص مهم و پرکاربرد ترمودینامیکی می باشد که می توان در محاسبه کار خالص داده شده به کمپرسورها یا کار خالص گرفته شده از توربین ها از این خاصیت ترمودینامیکی استفاده کرد

برای محاسبه آنتالپی نیاز به محاسبه مشتق اول انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده نسبت به متغیر کاهیده τ داریم که در روابط قبل محاسبه شدند. همچنین نیاز به محاسبه مشتق بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده نسبت به متغیر کاهیده δ می باشد که مقدار آن را نیز محاسبه کردیم.

در نهایت معادله موردنظر برای محاسبه آنتالپی با معادله حالت GERG-2008 مطابق با استاندارد

$$\frac{h(\delta, \tau, \bar{x})}{RT} = 1 + \tau(\alpha_r^o + \alpha_r^r) + \delta\alpha_s^r \quad 31-3$$

3-3-4- آنترپی

آنترپی معیاری برای بی‌نظمی سیستم ترمودینامیکی می‌باشد و همچنین انجام پذیر بودن یا غیر قابل انجام بودن یک فرایند ترمودینامیکی به علامت آنترپی تولیدی سیستم و محیط وابسته است. آنترپی در محاسبه انرژی یک سیستم ترمودینامیکی نیز کاربرد دارد.

برای محاسبه آنترپی نیاز به محاسبه مشتق اول انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده نسبت به متغیر کاهیده τ و همچنین محاسبه α^o سهم گاز ایده آل انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده و α^r سهم بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده می‌باشد که همگی در روابط قبل محاسبه شدند.

و در نهایت معادله موردنظر برای محاسبه آنترپی در معادله حالت GERG-2008 و مطابق با استاندارد ISO20765-2 به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{s(\delta, \tau, \bar{x})}{R} = \tau(\alpha_r^o + \alpha_r^r) - \alpha^o - \alpha^r \quad 32-3$$

3-3-5- ظرفیت گرمایی حجم ثابت و فشار ثابت

گرمای داده شده به یک جسم با تغییر دمای آن جسم متناسب است. بنابراین ظرفیت گرمایی به صورت نسبت گرمای داده شده به یک جسم به تغییر دمای آن جسم پفته می‌شود.

برای محاسبه ظرفیت گرمایی در حجم و فشار ثابت نیاز به محاسبه مشتق دوم انرژی آزاد هلمهولتز نسبت به متغیر کاهیده τ داریم. از این رو پس از محاسبه انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده که در روابط قبل محاسبه شد به محاسبه مشتق دوم آن نسبت به متغیر کاهیده τ پرداخته می‌شود:

مشتقات بخش گاز ایده آل انرژی آزاد هلمهولتز کاهش یافته با توجه به متغیرهای کاهش یافته δ و τ برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه در حجم و فشار ثابت و مطابق با استاندارد ISO20765-2 به صورت زیر می باشد:

$$\alpha_{\tau\tau}^o = \sum_{i=1}^N x_i \left(\frac{T_{c,i}}{T_r} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^o}{\partial (T_{c,i}/T)^2} \right)_\rho \quad 33-3$$

که در آن عبارت $\left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^o}{\partial (T_{c,i}/T)^2} \right)_\rho$ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^o}{\partial (T_{c,i}/T)^2} \right)_\rho = \frac{R^*}{R} \left[-n_{oi,3}^o \left(\frac{T}{T_{c,i}} \right)^2 - \sum_{k=4,6} n_{oi,k}^o \frac{(g_{oi,k}^o)^2}{\left(\sinh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right)^2} - \sum_{k=5,7} n_{oi,k}^o \frac{(g_{oi,k}^o)^2}{\left(\cosh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right)^2} \right] \quad 3$$

344-3

بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز کاهش یافته α مخلوط قبلاً محاسبه شد. مشتقات بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز کاهش یافته با توجه به متغیرهای کاهش یافته δ و τ برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت طبق استاندارد ISO20765-2 به صورت زیر می باشد:

$$\alpha_{\tau\tau}^r = \sum_{i=1}^N x_i \left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \tau^2} \right)_\delta + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \tau^2} \right)_\delta \quad 35-3$$

که عبارات $\left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \tau^2} \right)_\delta$ و $\left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \tau^2} \right)_\delta$ در معادله (35-3) به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \tau^2}\right)_\delta = \sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} t_{oi,k} (t_{oi,k} - 1) \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k} - 2} + \sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} t_{oi,k} (t_{oi,k} - 1) \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k} - 2} \exp(-\delta^{c_{oi,k}})$$

۳۶۶-۳

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \tau^2}\right)_\delta = \sum_{k=1}^{k_{pol,ij}} n_{ij,k} t_{ij,k} (t_{ij,k} - 1) \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k} - 2} + \sum_{k=k_{pol,ij}+1}^{k_{pol,ij}+k_{Exp,ij}} n_{ij,k} t_{ij,k} (t_{ij,k} - 1) \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k} - 2} \exp(-\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k} (\delta - \gamma_{ij,k}))$$

۳۷۷-۳

و در نهایت معادله موردنظر برای محاسبه ظرفیت گرمایی در حجم ثابت از معادله حالت GERG-2008 و طبق استاندارد ISO20765-2 به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{C_v}{R} = -\tau^2 \alpha_{\tau\tau}$$

۳۸-۳

برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت نیاز به محاسبه مشتقات بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده با توجه به متغیرهای کاهیده δ و τ می باشد. این مشتقات عبارت اند از $\alpha_{\tau\tau}^r$ ، $\alpha_{\delta\delta}^r$ و $\alpha_{\delta\tau}^r$.

$\alpha_{\delta\delta}^r$ را از قبل محاسبه کردیم و $\alpha_{\tau\tau}^r$ مشتق دوم بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده نسبت به متغیر کاهیده τ از معادله (۳-۳۵) محاسبه شد. $\alpha_{\delta\tau}^r$ نیز به صورت زیر بیان می شود:

$$\alpha_{\delta\tau}^r = \sum_{i=1}^N x_i \left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \delta \partial \tau}\right) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \delta \partial \tau}\right)$$

۳۹-۳

که در آن عبارات $\left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \delta \partial \tau}\right)$ و $\left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \delta \partial \tau}\right)$ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \delta \partial \tau}\right) = \sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} d_{oi,k} t_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}-1} \tau^{t_{oi,k}-1} +$$

$$\sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} t_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}-1} (d_{oi,k} - c_{oi,k} \delta^{c_{oi,k}}) \tau^{t_{oi,k}-1} \exp(-\delta^{c_{oi,k}})$$
۴۰-۳

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \delta \partial \tau}\right) = \sum_{k=1}^{k_{pol,ij}} n_{ij,k} d_{ij,k} t_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}-1} \tau^{t_{ij,k}-1} +$$

$$\sum_{k=k_{pol,ij}+1}^{k_{pol,ij}+k_{Exp,ij}} n_{ij,k} t_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}-1} \exp(-\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k} (\delta - \gamma_{ij,k})) \left[\frac{d_{ij,k}}{\delta} - 2\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k}) - \beta_{ij,k} \right]$$
۴۰-۳

حال به محاسبه $\alpha_{\delta\delta}^r$ می پردازیم. مشتق دوم بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز نسبت به متغیر کاهیده δ به صورت زیر بیان می شود:

$$\alpha_{\delta\delta}^r = \sum_{i=1}^N x_i \left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \delta^2} \right)_{\tau} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \delta^2} \right)_{\tau}$$
۴۱-۳

که در آن عبارات $\left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \delta^2}\right)_{\tau}$ و $\left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \delta^2}\right)_{\tau}$ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_{oi}^r}{\partial \delta^2}\right)_{\tau} = \sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} d_{oi,k} (d_{oi,k} - 1) \delta^{d_{oi,k}-2} \tau^{t_{oi,k}} +$$

$$\sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}-2} ((d_{oi,k} - c_{oi,k} \delta^{c_{oi,k}}) (d_{oi,k} - 1 - c_{oi,k} \delta^{c_{oi,k}}) - c_{oi,k}^2 \delta^{c_{oi,k}}) \tau^{t_{oi,k}} \exp(-\delta^{c_{oi,k}})$$
۴۲۳-۳

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_{ij}^r}{\partial \delta^2}\right)_{\tau} = \sum_{k=1}^{k_{pol,ij}} n_{ij,k} d_{ij,k} (d_{ij,k} - 1) \delta^{d_{ij,k}-2} \tau^{t_{ij,k}}$$
۴۳-۳

و در نهایت معادله موردنظر برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت از معادله حالت

GERG-2008 و طبق استاندارد ISO20765-2 به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{c_p}{R} = -\tau^2 \alpha_{\tau\tau} + \frac{(1 + \delta \alpha_{\delta}^r - \delta \tau \alpha_{\delta\tau}^r)^2}{1 + 2\delta \alpha_{\delta}^r + \delta^2 \alpha_{\delta\delta}^r} \quad ۴۴-۳$$

۳-۳-۶- سرعت صوت

فاصله‌ای که موج صوتی در یک محیط و در واحد زمان می‌پیماید، سرعت صوت نام دارد. سرعت صوت به محیط انتشار آن وابسته است. هر چقدر محیط تراکم بیشتری داشته باشد، صوت با سرعت بالاتری انتقال می‌یابد، به این علت که در محیط متراکم مولکول‌ها فاصله کمتری دارند و صوت سریع‌تر منتشر می‌گردد.

معادله سرعت صوت که از انرژی آزاد هلمهولتز و با استفاده از معادله حالت GERG-2008 طبق استاندارد ISO20765-2 محاسبه شده است به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{(S_0 s)^2 (\delta, \tau, \bar{x}) M}{RT} = 1 + 2\delta \alpha_{\delta}^r + \delta^2 \alpha_{\delta\delta}^r - \frac{(1 + \delta \alpha_{\delta}^r - \delta \tau \alpha_{\delta\tau}^r)^2}{\tau^2 (\alpha_{\tau\tau}^o + \alpha_{\tau\tau}^r)} \quad ۴۵-۳$$

در معادله (۴۶-۳) مشتق‌های α_{δ}^r ، $\alpha_{\delta\delta}^r$ ، $\alpha_{\delta\tau}^r$ ، $\alpha_{\tau\tau}^o$ و $\alpha_{\tau\tau}^r$ همگی در بخش‌های قبلی محاسبه شده است و تنها مجهول، سرعت صوت می‌باشد که به راحتی محاسبه می‌شود. در این معادله M وزن مولکولی مخلوط می‌باشد.

۳-۳-۷- ضریب ژول-تامسون

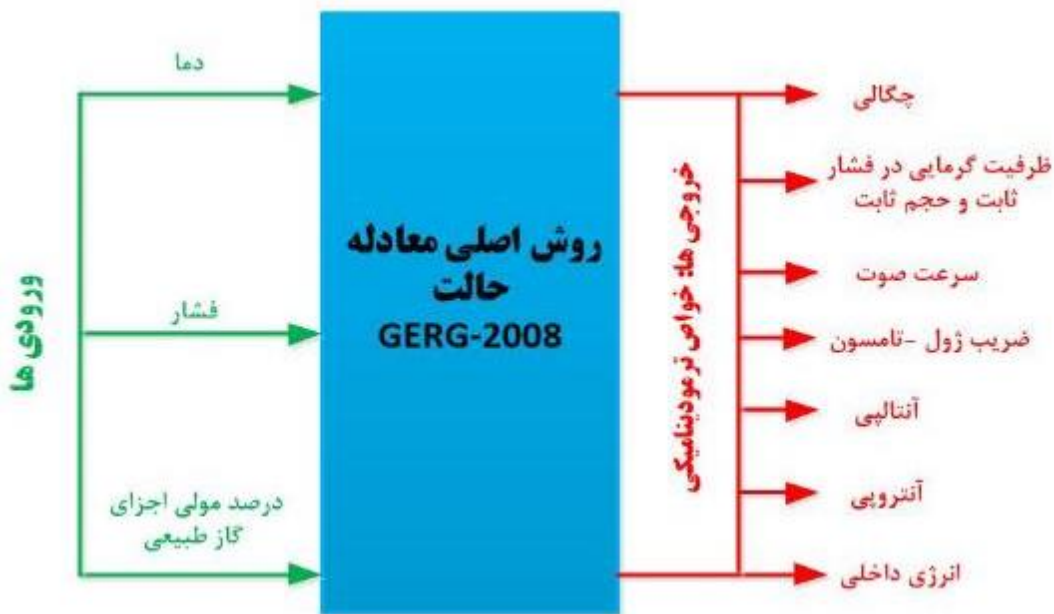
ضریب ژول تامسون معیاری از چگونگی تغییر دما در طول یک فرایند افت فشار می‌باشد، و به صورت افت دما در یک فرایند آنتالپی ثابت همراه با افت فشار تعریف می‌گردد. معادله موردنظر برای محاسبه ضریب ژول-تامسون از معادله حالت GERG-2008 و مطابق با استاندارد ISO20765-2 به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_{II} R \rho = \frac{-(\delta\alpha_{\delta}^r + \delta^2\alpha_{\delta\delta}^r + \delta\tau\alpha_{\delta\tau}^r)}{(1 + \delta\alpha_{\delta}^r - \delta\tau\alpha_{\delta\tau}^r)^2 - \tau^2(\alpha_{\tau\tau}^o + \alpha_{\tau\tau}^r)(1 + 2\delta\alpha_{\delta}^r + \delta^2\alpha_{\delta\delta}^r)} \quad ۴۶-۳$$

برای محاسبه ضریب ژول-تامسون نیاز به محاسبه مشتقات لازم از انرژی آزاد هلمهولتز کاهش یافته α می باشد که در این معادله تمامی پارامترها و مشتقات اول و دوم بخش گاز ایده آل و بخش باقیمانده انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده قبلاً محاسبه شده است و تنها مجهول آن ضریب ژول-تامسون می باشد.

۴-۳- روش محاسبه خواص ترمودینامیکی با معادله حالت GERG-2008

شکل (۳-۱) شماتیکی کلی از ورودی‌ها و خروجی‌های معادله حالت GERG-2008 را نشان می‌دهد. در این قسمت نحوه پیاده‌سازی روش و اجرای نرم‌افزار تهیه شده به صورت گام به گام و مطابق با شکل (۳-۲) توضیح داده خواهد شد.



شکل ۳-۱ شماتیک روش اصلی معادله حالت GERG-2008 در محاسبه خواص ترمودینامیکی

مرحله اول: در این مرحله لازم است که ورودی‌های ما که ترکیب گاز، دما و فشار مطلق هستند، به برنامه داده شوند. لذا دما بر حسب کلوین و فشار بر حسب مگاپاسکال وارد شود. اگر واحد دما و فشار

متفاوت بودند باید به کلوین و مگاپاسکال تبدیل شوند. ترکیب گاز نیز به صورت کسر مولی تک تک اجزاء وارد می‌گردد به طوری که مجموع آن‌ها مساوی با یک شود.

مرحله دوم: در این مرحله جرم مولی ترکیب گاز محاسبه می‌شود. با توجه به توضیحاتی که از قبل داده شد، از رابطه محاسبه جرم مولی گاز استفاده می‌شود:

$$M(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \cdot M_i$$

مرحله سوم:

الف) در این مرحله پس از اینکه جرم مولی ترکیب گاز را محاسبه کردیم برای به دست آوردن متغیرهای کاهیده δ و τ باید توابع کاهیده برای چگالی و دما را که روابط آن‌ها قبلاً توضیح داده شده است محاسبه کنیم که به صورت محاسبه می‌شدند:

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^N x_i^2 \frac{1}{\rho_{c,i}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N 2x_i x_j \beta_{v,ij} \gamma_{v,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v,ij}^2 x_i + x_j} \left[\frac{1}{8} \right] \left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}} \right)^3$$

$$T_r(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i^2 T_{c,i} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 2x_i x_j \beta_{T,ij} \gamma_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j} (T_{c,i} \cdot T_{c,j})^{0.5}$$

که در این معادلات ρ_c و T_c به ترتیب چگالی و دمای بحرانی برای هر یک از اجزای گاز طبیعی می‌باشد.

ب) در این قسمت دمای کاهیده معکوس را با توجه به دمای ورودی محاسبه می‌کنیم که رابطه آن به صورت زیر بود:

$$\tau = T_r / T$$

مرحله چهارم: معادله حالت GERG-2008 تابعی از سه متغیر دمای کاهیده، ترکیب گاز و چگالی کاهیده می‌باشد که دمای کاهیده از دمای ورودی و ترکیب گاز از ورودی‌های مستقیم کاربر محاسبه می‌شود. اما یکی دیگر از ورودی‌های ما به برنامه فشار مطلق می‌باشد. لذا با استفاده از فرمول زیر می‌توان چگالی کاهیده را بر اساس فشار محاسبه نمود:

$$\frac{p\tau}{\delta\rho_r(\bar{x})RT_r(\bar{x})} = Z(\delta, \tau, \bar{x}) = 1 + \delta\alpha'_\delta(\delta, \tau, \bar{x}) \quad 47-3$$

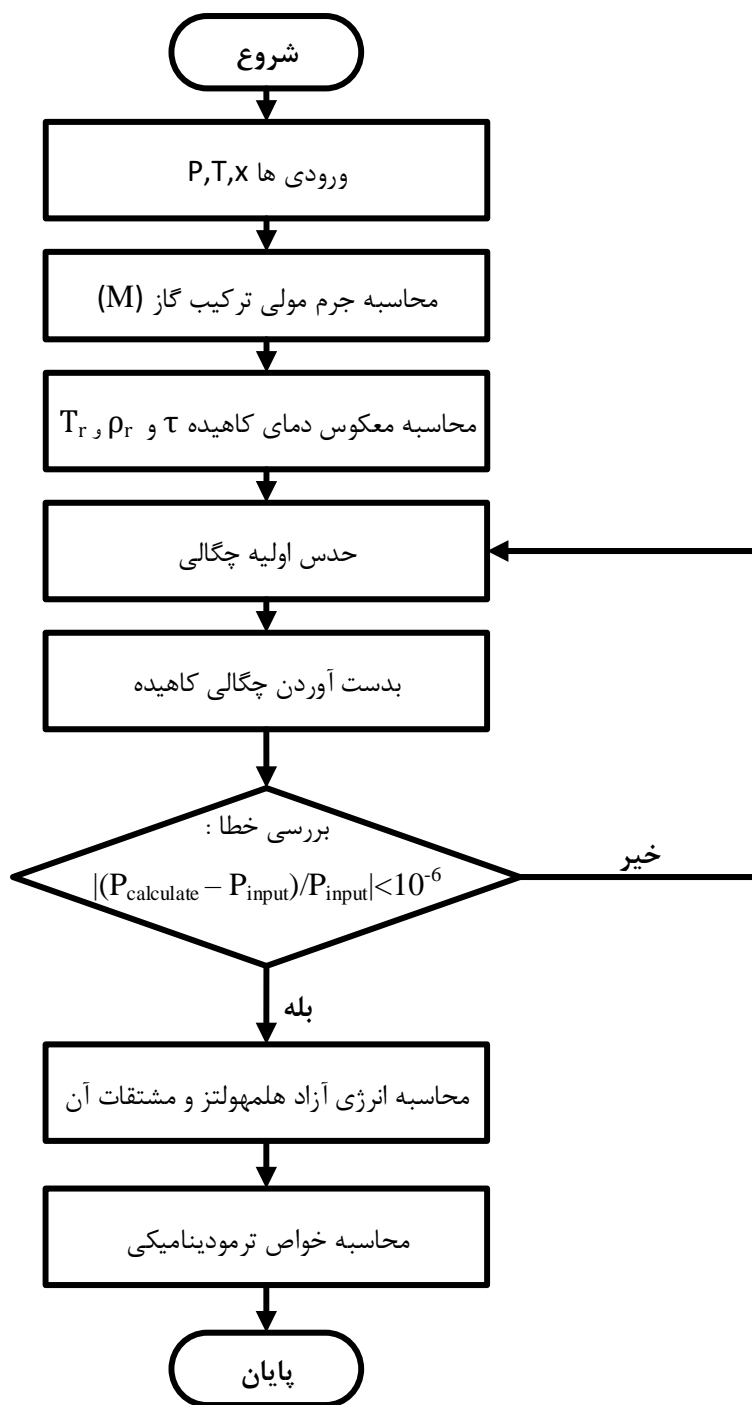
برای محاسبه چگالی کاهیده بر اساس فشار باید معادله غیر خطی بالا حل شود. بنابراین یک حدس اولیه برای چگالی، که همان چگالی گاز ایده آل است زده می‌شود. سپس فشار بدست آمده از فرمول بالا را با فشار ورودی مقایسه کرده و در صورتی که خطای محاسباتمان از مقدار مطلوب $|(P_{calculate} - P_{input})/P_{input}| < 10^{-6}$ کمتر بود، چگالی محاسبه شده صحیح است. ولی در صورتی که خطای محاسبه شده بیشتر از مقدار مورد نظرمان باشد این حلقه تکرار می‌شود تا نهایتاً چگالی مورد نظر محاسبه شود.

مرحله پنجم: در این مرحله پس از محاسبه مقدار چگالی کاهیده δ و با توجه به مقادیر معکوس دمای کاهیده τ و ترکیب مولی گاز، انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده که برابر مجموع انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده بخش گاز ایده آل و انرژی آزاد هلمهولتز باقیمانده است و همچنین مشتقات اول و دوم آن‌ها قابل محاسبه می‌باشند.

$$\begin{aligned}
\alpha(\delta, \tau, \bar{x}) = & \sum_{i=1}^N x_i \frac{R^*}{R} \left[n_{oi,1}^o + n_{oi,2}^o \frac{T_{c,i}}{T} + n_{oi,3}^o \ln \left(\frac{T_{c,i}}{T} \right) + \sum_{k=4,6} n_{oi,k}^o \ln \left| \sinh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \right. \\
& - \sum_{k=5,7} n_{oi,k}^o \ln \left| \cosh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \left. \right] + \sum_{i=1}^N x_i \left[\ln \left(\frac{\rho}{\rho_{c,i}} \right) + \ln x_i \right] \\
& + \sum_{i=1}^N x_i \left[\sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} + \sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} e^{-\delta^{c_{oi,k}}} \right] \\
& + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left[\sum_{k=1}^{k_{pol,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} + \sum_{k=k_{pol,ij}+1}^{k_{pol,ij}+k_{Exp,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} e^{-\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k} (\delta - \gamma_{ij,k})} \right]
\end{aligned}$$

۴۸-۳

مرحله ششم: در این مرحله خواص ترمودینامیکی شامل ضریب تراکم‌پذیری، چگالی، انرژی داخلی، آنتالپی، آنتروپی، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، ظرفیت گرمایی در حجم ثابت، سرعت صوت و ضریب ژول تامسون با توجه به روابط (۳-۲۰) تا (۳-۴۷) محاسبه شده است.



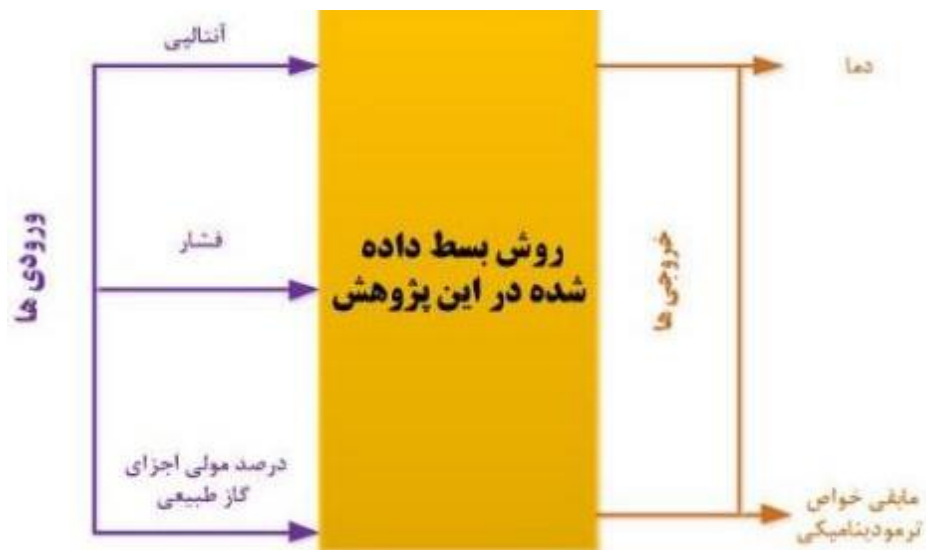
شکل ۳-۲ روند محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی توسط روش اصلی معادله GERG-2008

۳-۵- روش محاسبه خواص ترمودینامیکی با ورودی‌های متفاوت

برای محاسبه خواص ترمودینامیکی به دو پارامتر مستقل مانند دما و فشار به‌عنوان ورودی مسئله نیاز است؛ اما در تحقیق حاضر، تمامی خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با همه اجزای تشکیل‌دهنده آن بر اساس ورودی‌های متفاوت (فشار، آنتالپی و ترکیب گاز)، (فشار، آنتروپی و ترکیب گاز) و (انرژی درونی، حجم مخصوص و ترکیب گاز) نیز محاسبه شده است و نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان از دقت بالای این روش‌ها با استفاده از معادله حالت GERG-2008 می‌دهد. حال در زیر نحوه پیاده‌سازی و اجرای برنامه به‌صورت گام‌به‌گام ارائه خواهد شد.

۳-۵-۱- روش محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از آنتالپی و فشار

در این حالت ورودی‌های ما آنتالپی و فشار می‌باشند. لذا برای محاسبه خواص ترمودینامیکی ابتدا باید دمای موردنظر و مطابق با این آنتالپی و فشار را محاسبه نماییم. سپس توسط فشار و دمای محاسبه‌شده می‌توان خواص ترمودینامیکی دیگر را محاسبه نمود. پس از محاسبه دمای موردنظر می‌توان صحت آن را با فشار و آنتالپی داده‌شده بررسی نمود. شکل (۳-۳) شماتیکی کلی از ورودی‌ها و خروجی‌های معادله GERG-2008 را در این حالت نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳ شماتیک روش محاسبه خواص با آنتالپی و فشار

در این قسمت نحوه پیاده‌سازی و اجرای برنامه برای حالت ورودی‌های فشار، آنتالپی و ترکیب مولی اجزای گاز توضیح داده خواهد شد.

مرحله اول: در این مرحله لازم است که ترکیب گاز، آنتالپی و فشار مطلق به‌عنوان ورودی به برنامه داده شود. لذا فشار بر حسب مگاپاسکال وارد شود. اگر واحد فشار متفاوت بود باید به مگاپاسکال تبدیل شود. ترکیب گاز نیز به صورت کسر مولی تک تک اجزاء وارد می‌گردد به طوری که مجموع آن‌ها مساوی با یک شود.

مرحله دوم: در مرحله دوم باید جرم مولی ترکیب گاز را محاسبه کنیم. پس با توجه به توضیحاتی که از قبل داده شد، رابطه محاسبه جرم مولی گاز استفاده می‌شود:

$$M(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \cdot M_i$$

مرحله سوم: یکی از ورودی‌های معادله حالت GERG-2008 برای محاسبه خواص ترمودینامیکی دمای کاهیده می‌باشد، لذا برای محاسبه خواص ترمودینامیکی باید دمای ترکیب گاز را محاسبه کنیم؛ بنابراین دمایی را به‌عنوان دمای ورودی حدس می‌زنیم.

مرحله چهارم:

الف) در این مرحله برای به دست آوردن متغیرهای کاهیده τ و δ باید توابع کاهیده برای چگالی و دما را محاسبه کنیم که روابط آن‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^N x_i^2 \frac{1}{\rho_{c,i}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N 2x_i x_j \beta_{v,ij} \gamma_{v,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v,ij}^2 x_i + x_j} \left[\frac{1}{8} \right] \left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}} \right)^3$$

$$T_r(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i^2 T_{c,i} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 2x_i x_j \beta_{T,ij} \gamma_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j} (T_{c,i} \cdot T_{c,j})^{0.5}$$

که در این معادلات ρ_c و T_c به ترتیب چگالی و دمای بحرانی برای هر یک از اجزای گاز طبیعی می باشد.

ب) در این قسمت دمای کاهیده معکوس را با توجه به دمایی که حدس زدیم محاسبه می کنیم که

رابطه آن به صورت زیر می باشد:

$$\tau = \frac{T_r}{T}$$

مرحله پنجم: معادله حالت GERG-2008 تابعی از سه متغیر دمای کاهیده، ترکیب گاز و چگالی

کاهیده می باشد، لذا دمای کاهیده از دمای حدس زده شده و ترکیب گاز از ورودی های مستقیم کاربر

محاسبه می شود. اما یکی دیگر از ورودی های ما به برنامه فشار مطلق می باشد. پس همانند روش قبل

با استفاده از فرمول زیر می توان چگالی کاهیده را بر اساس فشار محاسبه نمود:

$$\frac{p\tau}{\delta\rho_r(\bar{x})RT_r(\bar{x})} = Z(\delta, \tau, \bar{x}) = 1 + \delta\alpha'_\delta(\delta, \tau, \bar{x})$$

برای محاسبه چگالی کاهیده بر اساس فشار باید معادله غیر خطی بالا حل شود. بنابراین یک حدس

اولیه برای چگالی، که همان چگالی گاز ایده آل است زده می شود. سپس فشار بدست آمده از فرمول

بالا را با فشار ورودی مقایسه کرده و در صورتی که خطای محاسباتمان از مقدار

مطلوب $10^{-6} < |(P_{calculate} - P_{input})/P_{input}|$ کمتر بود، چگالی محاسبه شده صحیح است. ولی در

صورتی که خطای محاسبه شده بیشتر از مقدار مورد نظرمان باشد این حلقه تکرار می شود تا نهایتاً

چگالی مورد نظر محاسبه شود.

مرحله ششم: پس از به دست آوردن چگالی و دمای کاهیده، در این مرحله انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده که برابر مجموع انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده بخش گاز ایده آل و انرژی آزاد هلمهولتز باقیمانده است و همچنین مشتقات اول و دوم آن‌ها قابل محاسبه می‌باشند.

$$\begin{aligned} \alpha(\delta, \tau, \bar{x}) = & \sum_{i=1}^N x_i \frac{R^*}{R} \left[n_{oi,1}^o + n_{oi,2}^o \frac{T_{c,i}}{T} + n_{oi,3}^o \ln \left(\frac{T_{c,i}}{T} \right) + \sum_{k=4,6} n_{oi,k}^o \ln \left| \sinh \left(\mathcal{G}_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \right. \\ & \left. - \sum_{k=5,7} n_{oi,k}^o \ln \left| \cosh \left(\mathcal{G}_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \right] + \sum_{i=1}^N x_i \left[\ln \left(\frac{\rho}{\rho_{c,i}} \right) + \ln x_i \right] \\ & + \sum_{i=1}^N x_i \left[\sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} + \sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} e^{-\delta^{c_{oi,k}}} \right] \\ & + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left[\sum_{k=1}^{k_{pol,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} + \sum_{k=k_{pol,ij}+1}^{k_{pol,ij}+k_{Exp,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} e^{-\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k} (\delta - \gamma_{ij,k})} \right] \end{aligned}$$

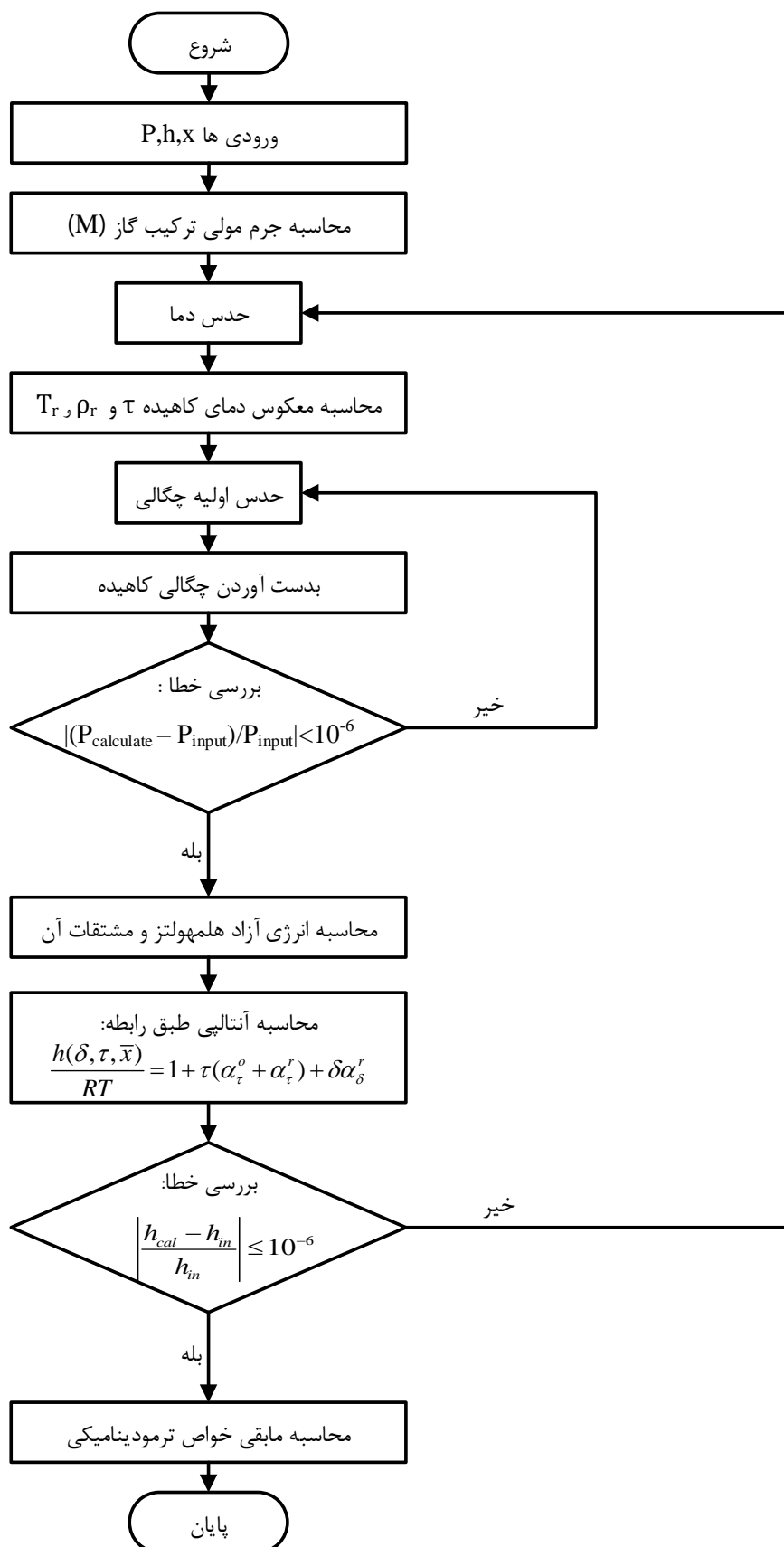
مرحله هفتم: در این مرحله پس از محاسبه انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده، مقدار آنتالپی را با توجه به چگالی و دمای کاهیده و مشتقات انرژی آزاد هلمهولتز طبق رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{h(\delta, \tau, \bar{x})}{RT} = 1 + \tau(\alpha_{\tau}^o + \alpha_{\tau}^r) + \delta \alpha_{\delta}^r$$

سپس آنتالپی محاسبه شده را با آنتالپی ورودی مقایسه کرده و اگر مقدار مطلوب 10^{-6} را

ارضا کرد، آنگاه دمای آن ترکیب گاز در آنتالپی و فشار گزارش شده به دست آمده است و اگر مقدار خطا بیشتر از این مقدار باشد، این حلقه تکرار می‌پذیرد و حدس اولیه برای دما را اصلاح کرده تا به دمای مطلوب برسد.

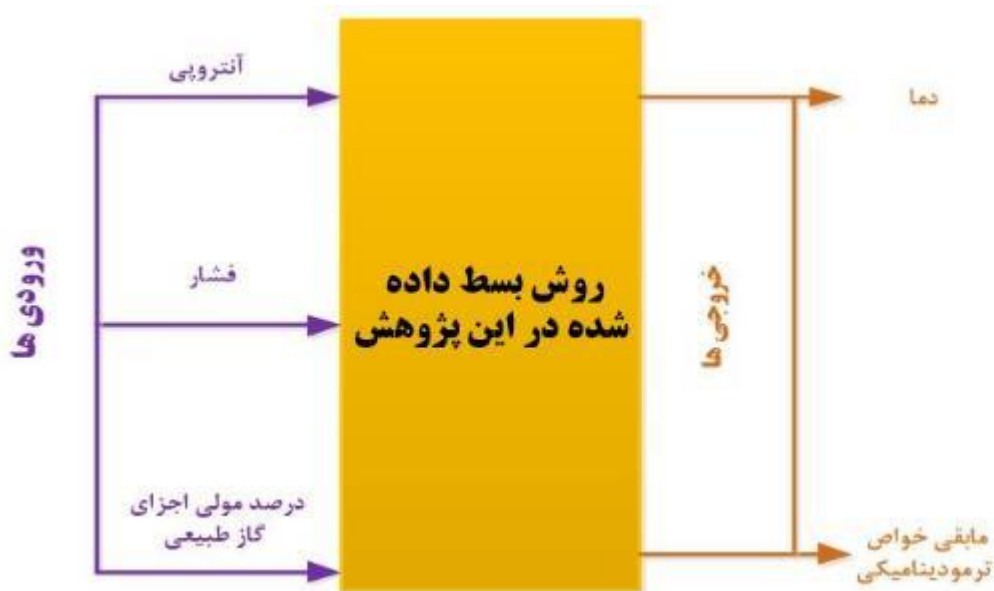
مرحله هشتم: در این مرحله مابقی خواص ترمودینامیکی شامل ضریب تراکم‌پذیری، چگالی، انرژی داخلی، آنتروپی، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، ظرفیت گرمایی در حجم ثابت، سرعت صوت و ضریب ژول تامسون با توجه به روابط (۳-۲۰) تا (۳-۴۷) محاسبه شده است.



شکل ۳-۴ روند محاسبه خواص ترمودینامیکی با آنتالپی و فشار توسط معادله GERG-2008

۳-۵-۲- روش محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از آنترופی و فشار

در این حالت ورودی‌های ما آنترופی و فشار می‌باشند. لذا برای محاسبه خواص ترمودینامیکی مانند حالت قبلی باید ابتدا دمای موردنظر و مطابق با این آنترופی و فشار را محاسبه نماییم. سپس توسط فشار و دمای محاسبه شده می‌توان خواص ترمودینامیکی دیگر را محاسبه نمود. در این حالت نیز پس از محاسبه دمای موردنظر می‌توانیم صحت آن را با استفاده از فشار و آنتالپی داده‌شده بررسی نماییم. شکل (۳-۵) شماتیکی کلی از ورودی‌ها و خروجی‌های معادله GERG-2008 را در این حالت نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ شماتیک روش محاسبه خواص با آنترופی و فشار

در این قسمت نحوه پیاده‌سازی و اجرای برنامه برای حالت ورودی‌های فشار، آنترופی و ترکیب مولی اجزای گاز توضیح داده خواهد شد.

مرحله اول: در این مرحله لازم است که ترکیب گاز، آنترופی و فشار مطلق به‌عنوان ورودی به برنامه داده شود. لذا فشار بر حسب مگاپاسکال وارد شود. اگر واحد فشار متفاوت بود باید به مگاپاسکال تبدیل

شود. ترکیب گاز نیز به صورت کسر مولی تک تک اجزاء وارد می‌گردد به طوری که مجموع آن‌ها مساوی با یک شود.

مرحله دوم: در مرحله دوم باید جرم مولی ترکیب گاز را محاسبه کنیم. پس با توجه به توضیحاتی که از قبل داده شد رابطه محاسبه جرم مولی گاز استفاده می‌شود:

$$M(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \cdot M_i$$

مرحله سوم: یکی از ورودی‌های معادله حالت GERG-2008 برای محاسبه خواص ترمودینامیکی دمای کاهیده می‌باشد، لذا برای محاسبه خواص ترمودینامیکی باید دمای ترکیب گاز را محاسبه کنیم، بنابراین دمایی را به عنوان دمای ورودی حدس می‌زنیم.

مرحله چهارم:

الف) در این مرحله برای به دست آوردن متغیرهای کاهیده τ و δ باید توابع کاهیده برای چگالی و دما را محاسبه کنیم که روابط آن‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^N x_i^2 \frac{1}{\rho_{c,i}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N 2x_i x_j \beta_{v,ij} \gamma_{v,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v,ij}^2 x_i + x_j} \left[\frac{1}{8} \right] \left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}} \right)^3$$

$$T_r(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i^2 T_{c,i} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 2x_i x_j \beta_{T,ij} \gamma_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j} (T_{c,i} \cdot T_{c,j})^{0.5}$$

که در این معادلات ρ_c و T_c به ترتیب چگالی و دمای بحرانی برای هر یک از اجزای گاز طبیعی می‌باشد.

ب) در این قسمت دمای کاهیده معکوس را با توجه به دمایی که حدس زدیم محاسبه می‌کنیم که رابطه آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\tau = T_r / T$$

مرحله پنجم: معادله حالت GERG-2008 تابعی از سه متغیر دمای کاهیده، ترکیب گاز و چگالی کاهیده می‌باشد، لذا دمای کاهیده از دمای حدس زده شده و ترکیب گاز از ورودی‌های مستقیم کاربر محاسبه می‌شود. اما یکی دیگر از ورودی‌های ما به برنامه فشار مطلق می‌باشد. پس همانند روش قبل با استفاده از فرمول زیر می‌توان چگالی کاهیده را بر اساس فشار محاسبه نمود:

$$\frac{p\tau}{\delta\rho_r(\bar{x})RT_r(\bar{x})} = Z(\delta, \tau, \bar{x}) = 1 + \delta\alpha'_\delta(\delta, \tau, \bar{x})$$

برای محاسبه چگالی کاهیده بر اساس فشار باید معادله غیر خطی بالا حل شود. بنابراین یک حدس اولیه برای چگالی، که همان چگالی گاز ایده آل است زده می‌شود. سپس فشار بدست آمده از فرمول بالا را با فشار ورودی مقایسه کرده و در صورتی که خطای محاسباتمان از مقدار مطلوب $|(P_{calculate} - P_{input})/P_{input}| < 10^{-6}$ کمتر بود، چگالی محاسبه شده صحیح است. ولی در صورتی که خطای محاسبه شده بیشتر از مقدار مورد نظرمان باشد این حلقه تکرار می‌شود تا نهایتاً چگالی مورد نظر محاسبه شود.

مرحله ششم: پس از به دست آوردن چگالی و دمای کاهیده، در این مرحله انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده که برابر مجموع انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده بخش گاز ایده آل و انرژی آزاد هلمهولتز باقیمانده است و همچنین مشتقات اول و دوم آن‌ها قابل محاسبه می‌باشند.

$$\alpha(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \frac{R^*}{R} \left[n_{oi,1}^o + n_{oi,2}^o \frac{T_{c,i}}{T} + n_{oi,3}^o \ln \left(\frac{T_{c,i}}{T} \right) + \sum_{k=4,6} n_{oi,k}^o \ln \left| \sinh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \right. \\ \left. - \sum_{k=5,7} n_{oi,k}^o \ln \left| \cosh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \right] + \sum_{i=1}^N x_i \left[\ln \left(\frac{\rho}{\rho_{c,i}} \right) + \ln x_i \right] \\ + \sum_{i=1}^N x_i \left[\sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} + \sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} e^{-\delta^{c_{oi,k}}} \right] \\ + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left[\sum_{k=1}^{k_{pol,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} + \sum_{k=k_{pol,ij}+1}^{k_{pol,ij}+k_{Exp,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} e^{-\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k} (\delta - \gamma_{ij,k})} \right]$$

مرحله هفتم: در این مرحله پس از محاسبه انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده، مقدار آنتروپی را با توجه به

چگالی و دمای کاهیده و مشتقات انرژی آزاد هلمهولتز طبق رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{s(\delta, \tau, \bar{x})}{R} = \tau(\alpha'_\tau + \alpha'_\tau) - \alpha^o - \alpha^r$$

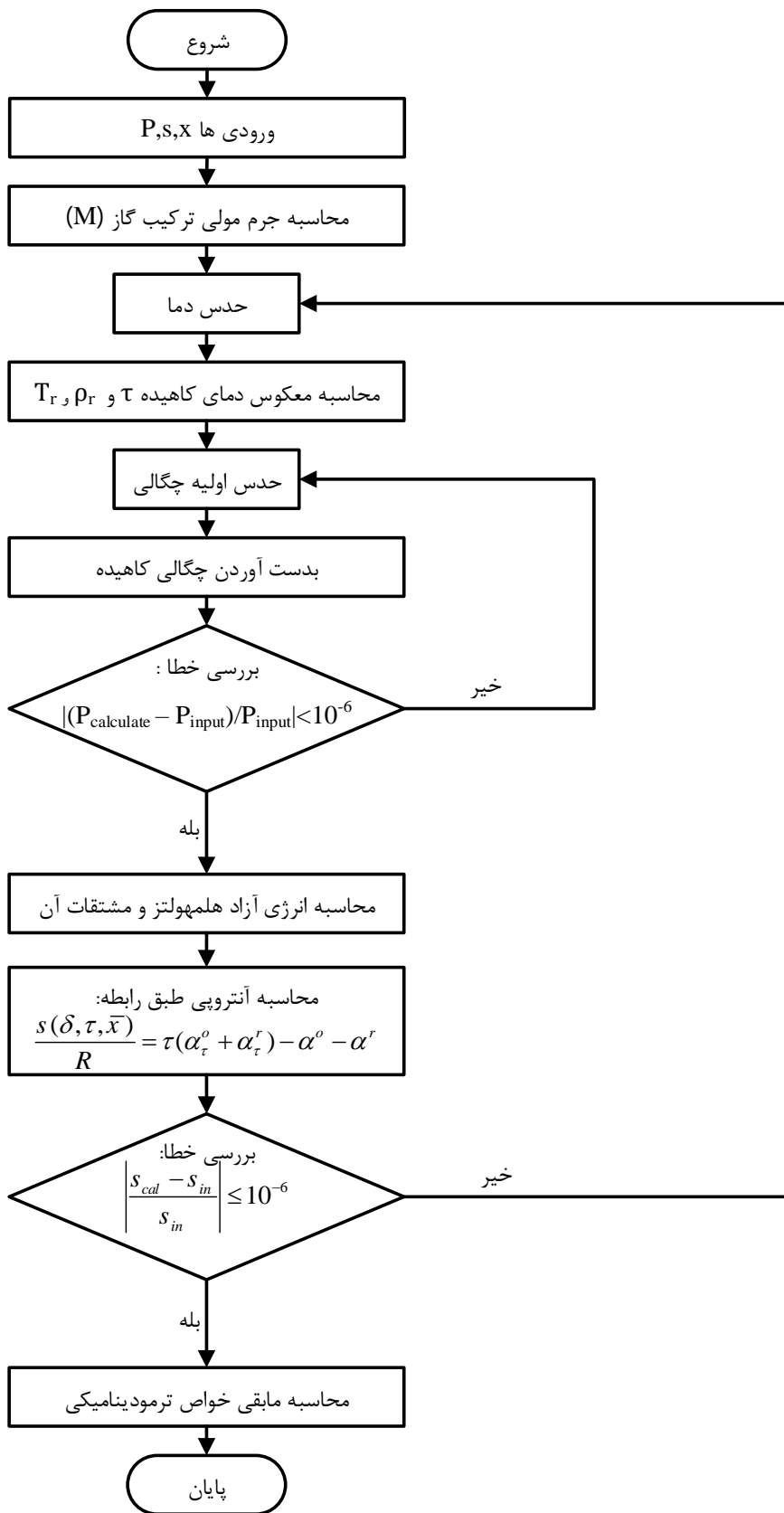
سپس آنتروپی محاسبه شده را با آنتروپی ورودی مقایسه کرده و اگر مقدار مطلوب $\leq 10^{-6}$ $\frac{s_{cal} - s_{in}}{s_{in}}$

را ارضا کرد، آنگاه دمای آن ترکیب گاز در آنتروپی و فشار گزارش شده به دست آمده است و اگر مقدار خطا بیشتر از این مقدار باشد، این حلقه تکرار می‌پذیرد و حدس اولیه برای دما را اصلاح کرده تا به دمای مطلوب برسد.

مرحله هشتم: در این مرحله مابقی خواص ترمودینامیکی شامل ضریب تراکم‌پذیری، چگالی، انرژی

داخلی، آنتالپی، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، ظرفیت گرمایی در حجم ثابت، سرعت صوت و ضریب

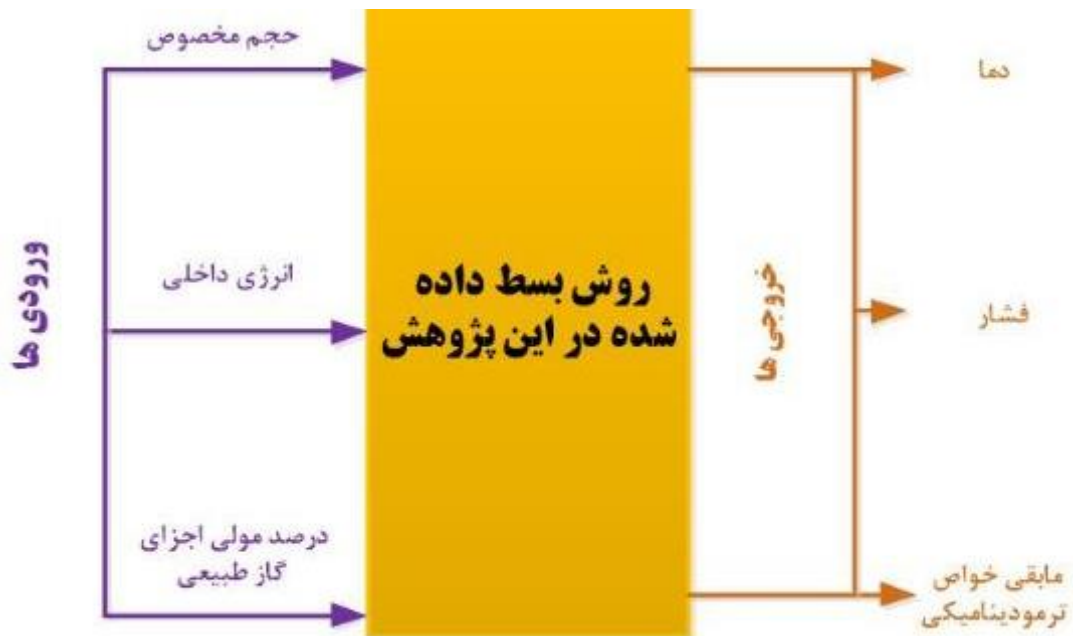
ژول تامسون با توجه به روابط (۳-۲۰) تا (۳-۴۷) محاسبه شده است.



شکل ۳-۶ روند محاسبه خواص ترمودینامیکی با آنتروپی و فشار توسط معادله GERG-2008

۳-۵-۳- روش محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از انرژی داخلی و حجم مخصوص

در این حالت ورودی‌های ما انرژی درونی و حجم مخصوص خواهند بود و برای محاسبه خواص ترمودینامیکی بایستی مانند حالت‌های قبلی ابتدا فشار و دمای مطابق با این انرژی داخلی و حجم مخصوص را محاسبه نمود و سپس سایر خواص ترمودینامیکی را از این طریق محاسبه کرد. شکل (۳-۷) شماتیکی کلی از ورودی‌ها و خروجی‌های معادله GERG-2008 را در این حالت نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷ شماتیک روش محاسبه خواص با انرژی داخلی و حجم مخصوص

در این قسمت نحوه پیاده‌سازی و اجرای برنامه برای حالت ورودی‌های انرژی داخلی، حجم مخصوص و ترکیب مولی اجزای گاز توضیح داده خواهد شد.

مرحله اول: در این مرحله لازم است که ترکیب گاز، انرژی درونی و حجم مخصوص به‌عنوان ورودی به برنامه داده شود. باید به این نکته توجه کرد که ترکیب گاز باید به‌صورت اجزای مولی بیان شود به‌نحوی که مجموع کسر مولی آن‌ها برابر یک شود.

مرحله دوم: در مرحله دوم باید جرم مولی ترکیب گاز را محاسبه کنیم. پس با توجه به توضیحاتی که از قبل داده شد، رابطه محاسبه جرم مولی گاز استفاده می‌شود:

$$M(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \cdot M_i$$

مرحله سوم: ورودی‌های لازم برای معادله حالت GERG-2008، چگالی کاهیده، معکوس دمای کاهیده و کسر مولی ترکیب گاز می‌باشد. لذا برای محاسبه پارامترهای نامبرده و همچنین محاسبه خواص ترمودینامیکی نیاز به محاسبه دما و فشار مطلق داریم. پس برای این کار یک فشار و یک دما حدس می‌زنیم.

مرحله چهارم:

الف) در این مرحله برای به دست آوردن متغیرهای کاهیده τ و δ باید توابع کاهیده برای چگالی و دما را محاسبه کنیم که روابط آن‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^N x_i^2 \frac{1}{\rho_{c,i}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N 2x_i x_j \beta_{v,ij} \gamma_{v,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v,ij}^2 x_i + x_j} \left[\frac{1}{8} \right] \left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}} \right)^3$$

$$T_r(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i^2 T_{c,i} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 2x_i x_j \beta_{T,ij} \gamma_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j} (T_{c,i} T_{c,j})^{0.5}$$

که در این معادلات T_c و ρ_c به ترتیب چگالی و دمای بحرانی برای هر یک از اجزای گاز طبیعی می‌باشد.

ب) در این قسمت دمای کاهیده معکوس را با توجه به دمایی که حدس زدیم محاسبه می‌کنیم که رابطه آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\tau = T_r / T$$

مرحله پنجم: معادله حالت GERG-2008 تابعی از سه متغیر دمای کاهیده، ترکیب گاز و چگالی کاهیده می‌باشد، لذا دمای کاهیده از دمای حدس زده شده و ترکیب گاز از ورودی‌های مستقیم کاربر محاسبه می‌شود. اما برای محاسبه چگالی کاهیده طبق فرمول زیر و با استفاده از فشاری که حدس زده شد عمل می‌شود:

$$\frac{p\tau}{\delta\rho_r(\bar{x})RT_r(\bar{x})} = Z(\delta, \tau, \bar{x}) = 1 + \delta\alpha'_\delta(\delta, \tau, \bar{x})$$

برای محاسبه چگالی کاهیده بر اساس فشار باید معادله غیر خطی بالا حل شود. بنابراین یک حدس اولیه برای چگالی، که همان چگالی گاز ایده آل است زده می‌شود. سپس فشار بدست آمده از فرمول بالا را با فشار حدسی ورودی مقایسه کرده و در صورتی که خطای محاسباتمان از مقدار مطلوب $10^{-6} < |(P_{calculate} - P_{input})/P_{input}|$ کمتر بود، چگالی محاسبه شده صحیح است. ولی در صورتی که خطای محاسبه شده بیشتر از مقدار مورد نظرمان باشد این حلقه تکرار می‌شود تا نهایتاً چگالی مورد نظر محاسبه شود.

مرحله ششم: پس از به دست آوردن چگالی و دمای کاهیده، در این مرحله انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده که برابر مجموع انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده بخش گاز ایده آل و انرژی آزاد هلمهولتز باقیمانده است و همچنین مشتقات اول و دوم آن‌ها قابل محاسبه می‌باشند.

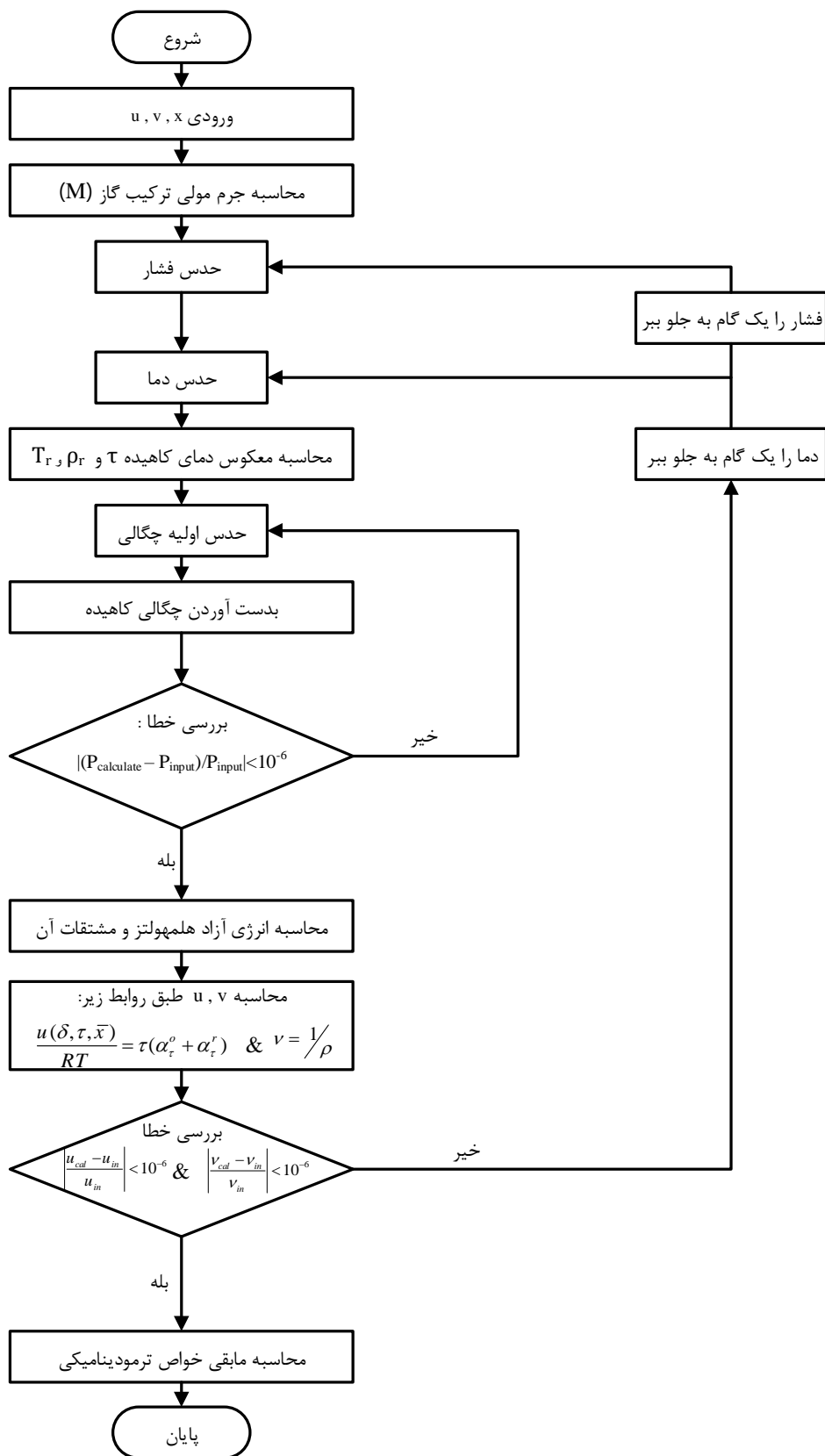
$$\alpha(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \frac{R^*}{R} \left[n_{oi,1}^o + n_{oi,2}^o \frac{T_{c,i}}{T} + n_{oi,3}^o \ln \left(\frac{T_{c,i}}{T} \right) + \sum_{k=4,6} n_{oi,k}^o \ln \left| \sinh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \right. \\ \left. - \sum_{k=5,7} n_{oi,k}^o \ln \left| \cosh \left(g_{oi,k}^o \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right| \right] + \sum_{i=1}^N x_i \left[\ln \left(\frac{\rho}{\rho_{c,i}} \right) + \ln x_i \right] \\ + \sum_{i=1}^N x_i \left[\sum_{k=1}^{k_{pol,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} + \sum_{k=k_{pol,i}+1}^{k_{pol,i}+k_{Exp,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} e^{-\delta^{c_{oi,k}}} \right] \\ + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \left[\sum_{k=1}^{k_{pol,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} + \sum_{k=k_{pol,ij}+1}^{k_{pol,ij}+k_{Exp,ij}} n_{ij,k} \delta^{d_{ij,k}} \tau^{t_{ij,k}} e^{-\eta_{ij,k} (\delta - \varepsilon_{ij,k})^2 - \beta_{ij,k} (\delta - \gamma_{ij,k})} \right]$$

مرحله هفتم: در این مرحله پس از محاسبه انرژی آزاد هلمهولتز کاهیده، مقدار انرژی درونی را با توجه به چگالی و دمای کاهیده و مشتقات انرژی آزاد هلمهولتز طبق رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{u(\delta, \tau, \bar{x})}{RT} = \tau(\alpha_\tau^o + \alpha_\tau^r)$$

همچنین پس از اینکه چگالی کاهیده را محاسبه کردیم مقدار حجم مخصوص را نیز طبق رابطه $v = 1/\rho$ محاسبه می‌کنیم. سپس انرژی درونی و حجم مخصوص محاسبه شده را با انرژی درونی و حجم مخصوص ورودی مقایسه کرده و اگر مقدار مطلوب $\left| \frac{u_{cal} - u_{in}}{u_{in}} \right| \leq 10^{-6}$ و $\left| \frac{v_{cal} - v_{in}}{v_{in}} \right| < 10^{-6}$ را ارضا کرد، آنگاه دما و فشار آن ترکیب گاز در انرژی درونی و حجم مخصوص گزارش شده به دست آمده است، ولی اگر مقدار خطا بیشتر از این مقدار باشد، این حلقه تکرار می‌پذیرد و حدس اولیه برای دما و فشار را اصلاح کرده تا به دما و فشار مطلوب برسد.

مرحله هشتم: در این مرحله مابقی خواص ترمودینامیکی شامل ضریب تراکم پذیری، چگالی، آنتالپی، آنتروپی، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، ظرفیت گرمایی در حجم ثابت، سرعت صوت و ضریب ژول تامسون با توجه به روابط (۳-۲۰) تا (۳-۴۷) محاسبه شده است.



شکل ۳-۸، روند محاسبه خواص با استفاده از انرژی داخلی و حجم مخصوص توسط معادله GERG-2008

۴- فصل چهارم: نتایج

۱-۴- معبر سازی محاسبات

برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از معادله حالت GERG-2008 برای تعیین خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با استفاده از ورودی‌های متفاوت، نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی مقایسه شده است. ترکیب مولی گاز طبیعی با توجه به ناحیه استخراج گاز متفاوت است، اما همیشه درصد بالایی از آن متان می‌باشد، به طوری که بیش از ۹۸ درصد گاز طبیعی حاصل شده از مخازن گازی سرخس را متان تشکیل می‌دهد. بنابراین می‌توان رفتار گاز متان را با رفتار گاز طبیعی مشابه در نظر گرفت. از این رو، برای اعتبارسنجی بعضی از خواص ترمودینامیکی به علت در دسترس نبودن داده‌های تجربی برای ترکیبات پیچیده، از متان خالص استفاده شده است.

برای اعتبارسنجی خواص ترمودینامیکی، دو پارامتر خطا و انحراف مطلق میانگین AAD مورد استفاده قرار گرفته است که به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\text{Error}(\%) = 100 * \frac{\text{Property}_{\text{Experimental}} - \text{Property}_{\text{calculate}}}{\text{Property}_{\text{Experimental}}} \quad 1-4$$

$$\text{AAD}(\%) = \frac{100}{N} \sum_1^N \left| \frac{\text{Property}_{\text{Experimental}} - \text{Property}_{\text{calculate}}}{\text{Property}_{\text{Experimental}}} \right| \quad 2-4$$

سپس مقادیر خطای مطلق به صورت نموداری نمایش داده شده است و همچنین مقادیر انحراف مطلق میانگین نیز به صورت جدول مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۴- محاسبه چگالی برای گاز طبیعی با کسر مولی‌های مختلف

در این بخش اعتبارسنجی محاسبات چگالی ارائه شده است. این معبر سازی برای سه ترکیب مختلف گاز طبیعی در ۴ دمای ثابت و به ازای فشارهای مختلف انجام گرفته است. جدول ۱-۴ کسر مولی این سه ترکیب را نشان می‌دهد. تطبیق بسیار خوب نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی و خطای

پایین در نمودارهای خطای مطلق، نشان دهنده عملکرد خوب معادله GERG-2008 در محاسبه چگالی ترکیب گاز طبیعی می باشد.

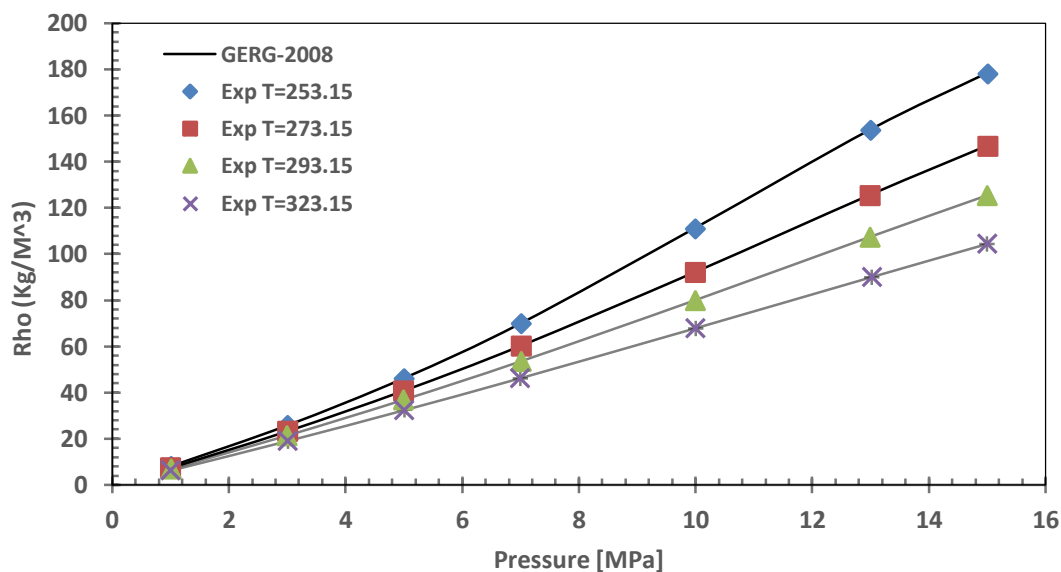
جدول ۴-۱ درصد مولی ترکیبات مورد استفاده در محاسبات چگالی گاز طبیعی

	Component	Mix 1	Mix 2	Mix 3
1	Methane	۰/۹۸۳۵۲	۰/۹۰۳۶۲	۰/۹۲۴۳۶
۲	Nitrogen	۰/۰۰۸۴۱	۰/۰۱۴۷۴	۰/۰۵۷۵۱
۳	Carbon dioxide	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۶۴۷	۰/۰۰۰۵۲
۴	Ethane	۰/۰۰۵۱۱	۰/۰۵۷۰۸	۰/۱۲۸۵
۵	Propane	۰/۰۰۱۵۳	۰/۰۱۱۲۴	۰/۰۰۳۴۸
۶	n-Hexane	۰	۰/۰۰۰۱۱	۰
۷	n-Heptane	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۳۰۱	۰/۰۰۰۴۱
۸	n-Octane	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۰۱۶۹	۰/۰۰۰۴۶
۹	n-Nonane	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵۹	۰/۰۰۰۱۵
۱۰	n-Decane	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۱۴
۱۱	Hydrogen	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۱۲
۱۲	Oxygen	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳۵	۰
۱۳	Carbon monoxide	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۸	۰
۱۴	Helium	۰	۰/۰۰۰۱۵	۰

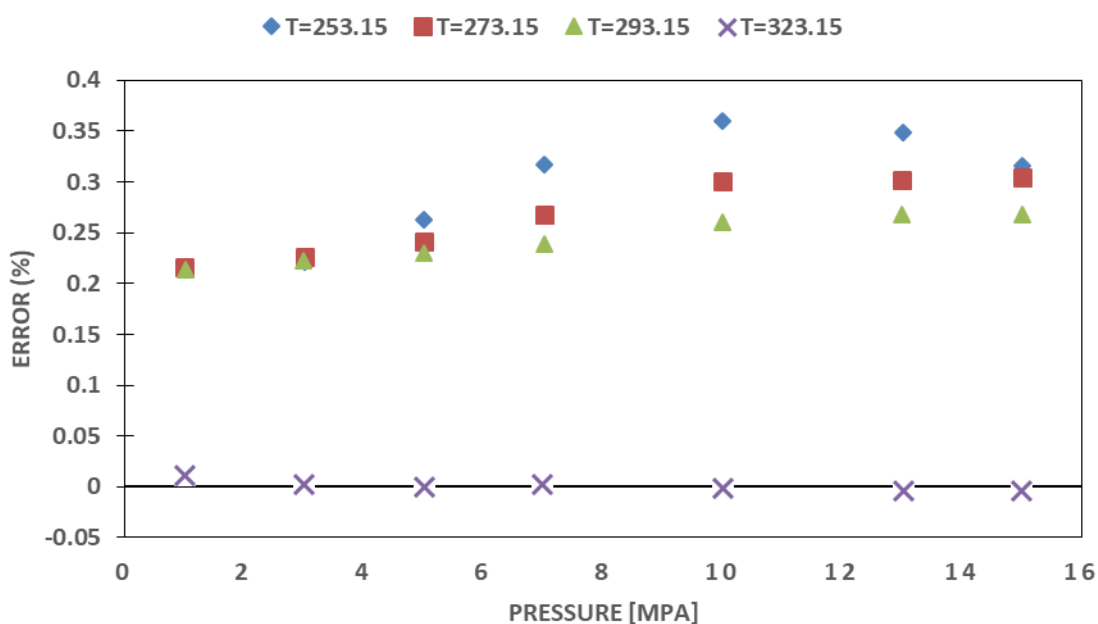
۴-۲-۱- محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix1

ترکیب گاز طبیعی Mix1 در جدول ۴-۱ داده شده است. سپس با استفاده از معادله GERG-2008 چگالی برای فشارهای تا ۱۵ مگاپاسکال و برای حالت‌های دما ثابت ۲۵۳/۱۵ کلوین، ۲۷۳/۱۵ کلوین، ۲۹۳/۱۵ کلوین و ۳۲۳/۱۵ کلوین محاسبه شده است. شکل ۴-۱ محاسبات چگالی را برای این ترکیب در دماهای ثابت نشان می‌دهد و شکل ۴-۲ نمودار درصد خطای محاسبه شده در مقایسه با

داده‌های تجربی برای این ترکیب می‌باشد. با توجه به این نمودار، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۳/۱۵ کلوین برابر با ۰/۳۵۹۷ درصد، برای حالت دما ثابت ۲۷۳/۱۵ کلوین برابر ۰/۳۰۴ درصد، برای حالت دما ثابت ۲۹۳/۱۵ کلوین برابر با ۰/۲۶۷۵ درصد و برای حالت دما ثابت ۳۲۳/۱۵ کلوین برابر با ۰/۱۰۷ درصد می‌باشد.



شکل ۴-۱ نمودار چگالی گاز طبیعی Mix1 بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۱]).



شکل ۴-۲ درصد خطا در محاسبات چگالی گاز طبیعی Mix 1 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۱]).

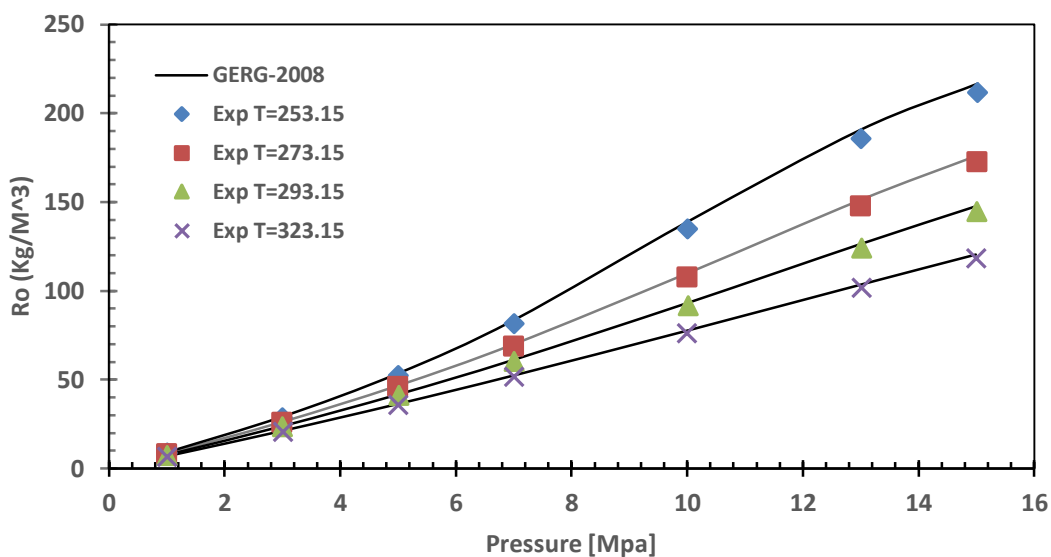
محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲ انحراف مطلق میانگین در محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix1

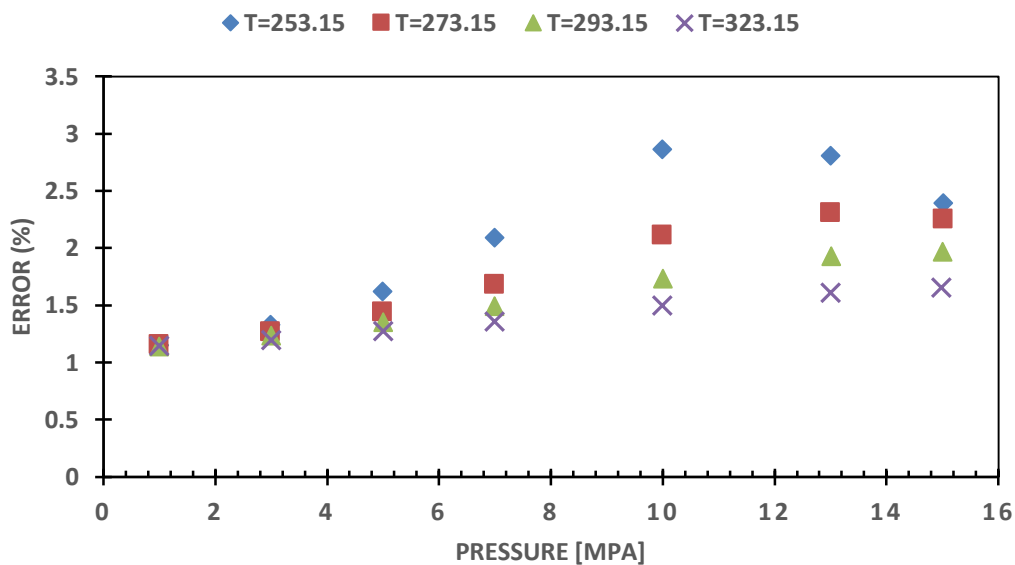
دما (کلوین)	۲۵۳/۱۵	۲۷۳/۱۵	۲۹۳/۱۵	۳۲۳/۱۵
AAD (%)	۰/۲۹۱۱	۰/۲۶۵۵	۰/۲۴۲۷	۰/۰۰۳۴

۴-۲-۲- محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix2

شکل ۴-۳ محاسبات چگالی ترکیب گاز طبیعی Mix2 با ترکیب مولی مشخص ارائه شده در جدول ۴-۱ را نشان می دهد و شکل ۴-۴ نمودار درصد خطای محاسبه شده برای این ترکیب گاز طبیعی می باشد که از مقایسه محاسبات حاصل از معادله حالت GERG-2008 با داده های آزمایشگاهی حاصل شده است نشان می دهد. در این نمودار، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۳/۱۵ کلوین برابر با ۲/۸۶۰۷، برای حالت دما ثابت ۲۷۳/۱۵ کلوین برابر با ۲/۳۰۴۵، برای حالت دما ثابت ۲۹۳/۱۵ کلوین برابر با ۱/۹۶۷۳ و برای حالت دما ثابت ۳۲۳/۱۵ کلوین ۱/۶۵۰۹ گزارش شده است.



شکل ۳-۴ نمودار چگالی گاز طبیعی Mix2 بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۶]).



شکل ۴-۴ درصد خطا در محاسبات چگالی گاز طبیعی Mix 2 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۶]).

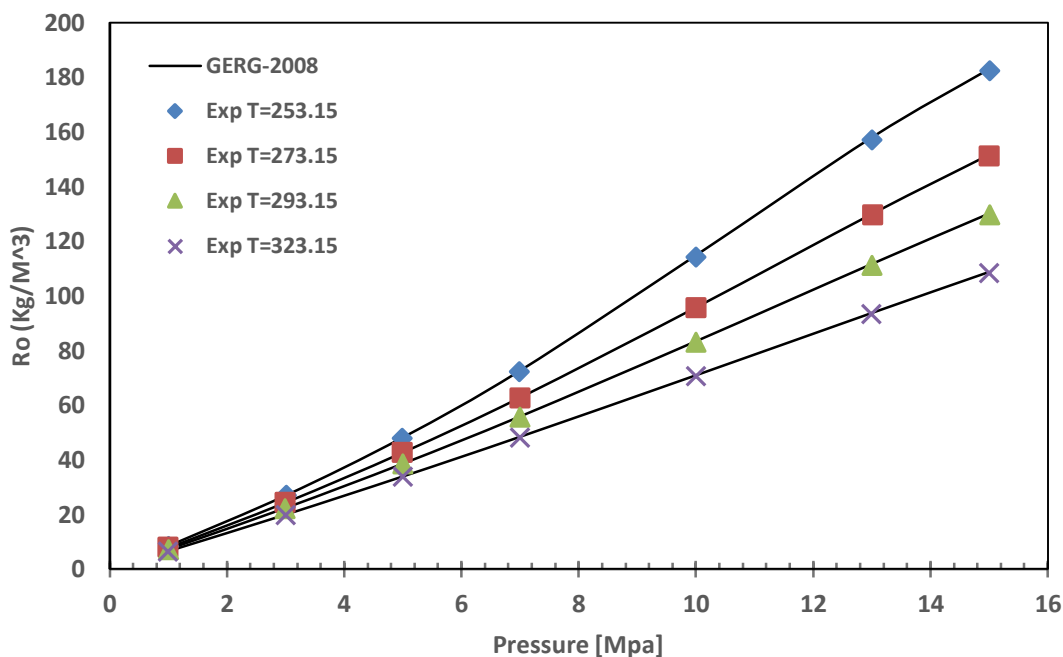
محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۳-۴ نشان داده شده است.

جدول ۳-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix2

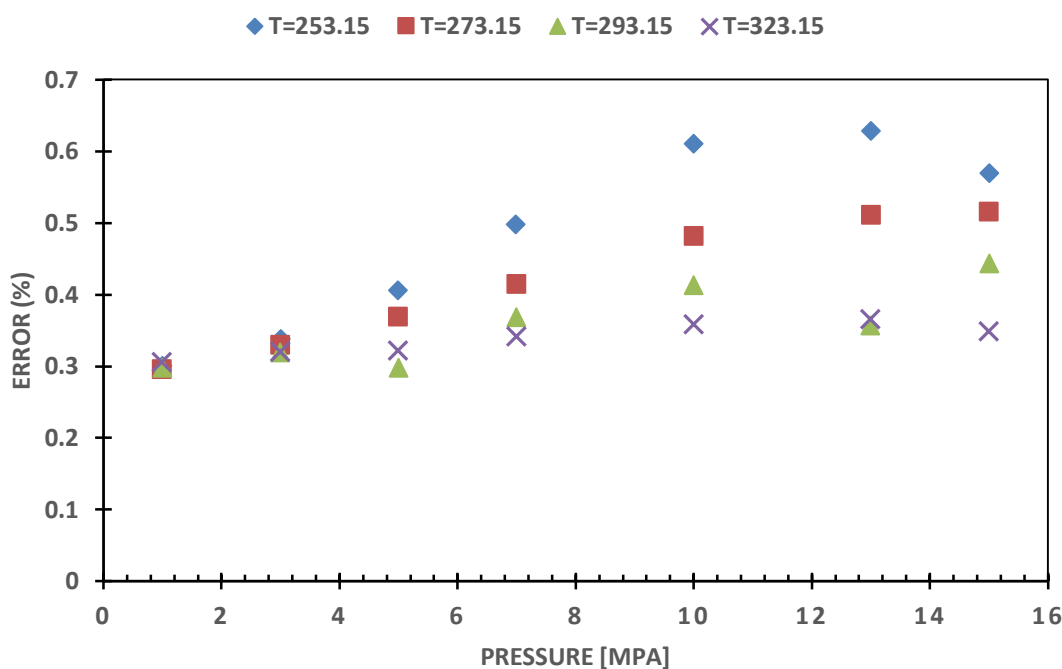
۳۲۳/۱۵	۲۹۳/۱۵	۲۷۳/۱۵	۲۵۳/۱۵	دما (کلوین)
۱/۳۸۷۶	۱/۵۴۷۹	۱/۷۴۳۵	۲/۰۳۳۴	AAD (%)

۴-۲-۳- محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix3

شکل ۴-۵ محاسبات چگالی ترکیب گاز طبیعی Mix3 را با ترکیب مولی داده شده در جدول ۴-۱ و شکل ۴-۶ نمودار مقدار خطای محاسبات را نشان می‌دهد که از مقایسه نتایج حاصل از معادله حالت با داده‌های تجربی حاصل شده است. در این نمودار، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۳/۱۵ کلوین برابر با ۰/۶۲۹۱، برای حالت دما ثابت ۲۷۳/۱۵ کلوین برابر با ۰/۵۱۵۶، برای حالت دما ثابت ۲۹۳/۱۵ کلوین برابر با ۰/۴۴۳۶ و برای حالت دما ثابت ۳۲۳/۱۵ کلوین ۰/۳۶۵۸ می‌باشد.



شکل ۴-۵ نمودار چگالی گاز طبیعی Mix3 بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۷]).



شکل ۴-۶ میزان خطا در محاسبات چگالی گاز طبیعی Mix 3 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۷]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه چگالی گاز طبیعی Mix2

۳۲۳/۱۵	۲۹۳/۱۵	۲۷۳/۱۵	۲۵۳/۱۵	دما (کلوین)
۰/۳۳۷۹	۰/۳۵۷	۰/۴۱۶۶	۰/۴۷۹۱	AAD (%)

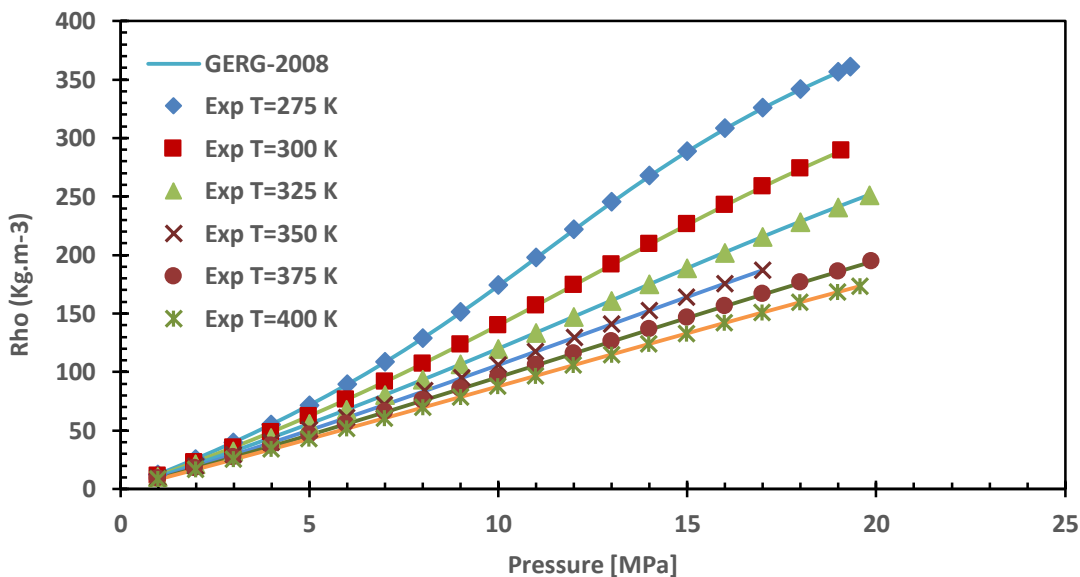
۴-۲-۴- اعتبار سنجی محاسبه چگالی بیوگاز

در این قسمت محاسبات چگالی را برای ترکیب بیوگاز ارائه خواهیم کرد. اعتبار سنجی حاصله برای این ترکیب بیوگاز در ۶ دمای ثابت و به ازای فشارهای مختلف محاسبه خواهیم کرد. جدول ۴-۵ نشان دهنده جزء مولی این مخلوط می باشد که در این قسمت بررسی خواهد شد. همان طور که در جدول مشاهده می شود عناصر غیر هیدروکربنی نظیر نیتروژن و دی اکسید کربن نیز در این مخلوطها وجود دارند. دقت بالای نتایج حاصله مخصوصاً در نمودارهای خطای مطلق، از دقت بالای معادله GERG-2008 در تعیین چگالی مواد می باشد.

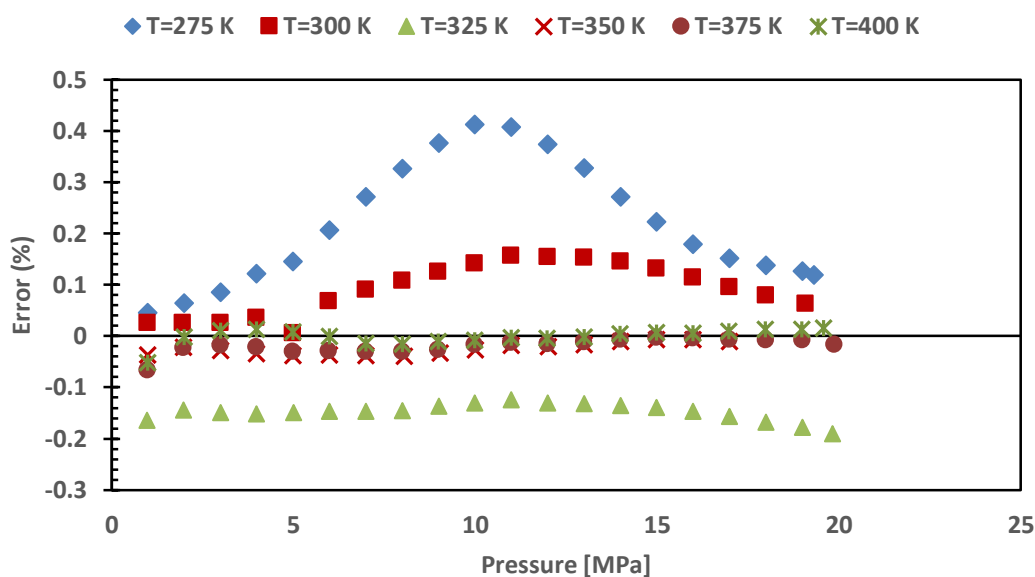
جدول ۴-۵ درصد مولی ترکیب مورد استفاده در محاسبات چگالی بیوگاز

composition	proportion
متان	۰٫۴۹۸۱۴۱
کربن دی اکسید	۰٫۳۵۲۰۲۸
نیتروژن	۰٫۰۹۹۹۱۶
کربن مونواکسید	۰٫۰۴۹۹۱۵

شکل ۴-۷ نمودار محاسبات چگالی بیوگاز با ترکیب مولی داده شده در جدول ۴-۵ و شکل ۴-۸ نمودار درصد خطای محاسبات را نشان می‌دهد که از مقایسه داده‌های بدست آمده از این معادله حالت با داده‌های آزمایشگاهی حاصل شده است. در این نمودار، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۰٫۴۱۲۷، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۰٫۱۵۷۴، برای حالت دما ثابت ۳۲۵ کلوین برابر با ۰٫۱۹۰۲، برای حالت دما ثابت ۳۵۰ کلوین برابر با ۰٫۰۳۸۳، برای حالت دما ثابت ۳۷۵ کلوین برابر با ۰٫۰۶۶ و برای حالت دما ثابت ۴۰۰ کلوین برابر با ۰٫۰۵۱۵ می‌باشد.



شکل ۴-۷ نمودار چگالی بیوگاز بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۲۳]).



شکل ۴-۸ میزان خطا در محاسبات چگالی بیوگاز (داده های آزمایشگاهی مرجع [۲۳]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶ انحراف مطلق میانگین در محاسبه چگالی بیوگاز

دما (کلوین)	۲۷۵	۳۰۰	۳۲۵	۳۵۰	۳۷۵	۴۰۰
AAD (%)	۰/۲۳۰۷	۰/۰۹۲۳	۰/۱۴۷۷	۰/۰۲۴۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۰۶

۴-۳-۳-۴ اعتبارسنجی محاسبات ضریب تراکم پذیری

در این قسمت اعتبارسنجی ضریب تراکم پذیری برای دو ترکیب مختلف گاز طبیعی با کسر مولی داده شده محاسبه شده است و سپس داده های حاصل با داده های تجربی مقایسه شده است. اعتبارسنجی حاصله برای دو ترکیب گاز طبیعی Mix1 و ترکیب گاز طبیعی Mix2 با ترکیبات مولی مشخص داده شده در جداول ۴-۷ و ۴-۹ انجام گرفته است.

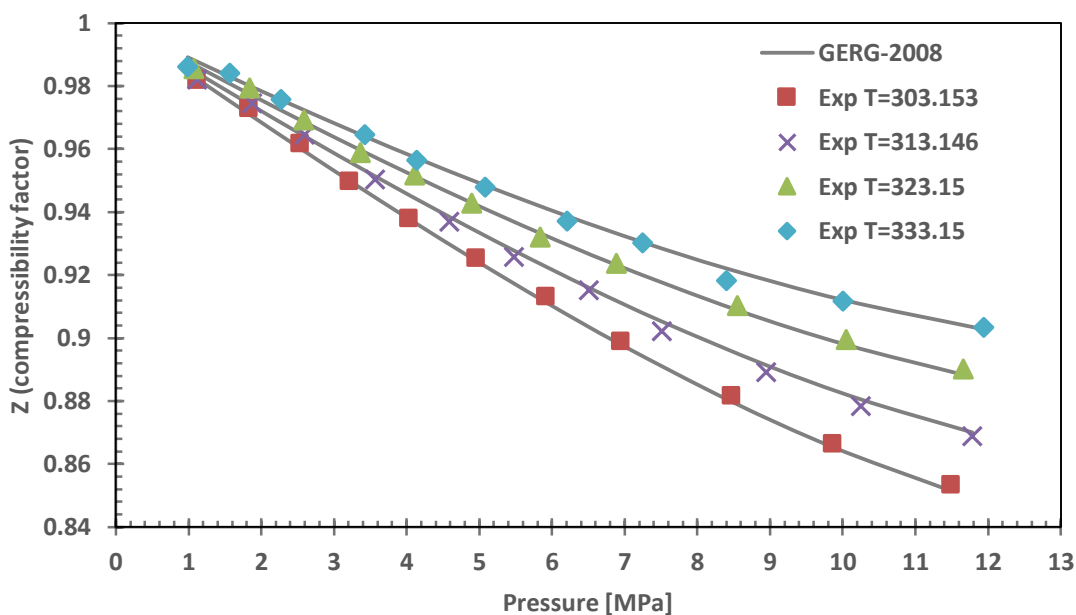
۴-۳-۳-۴-۱ محاسبه ضریب تراکم پذیری برای ترکیب گاز طبیعی Mix1

کسر مولی ترکیب Mix1، در جدول ۴-۷ داده شده است. اعتبارسنجی ضریب تراکم پذیری برای فشارهای تا ۱۲ مگاپاسکال و برای حالت های دما ثابت ۳۰۳ کلوین، ۳۱۳ کلوین، ۳۲۳ کلوین و ۳۳۳ کلوین محاسبه شده است.

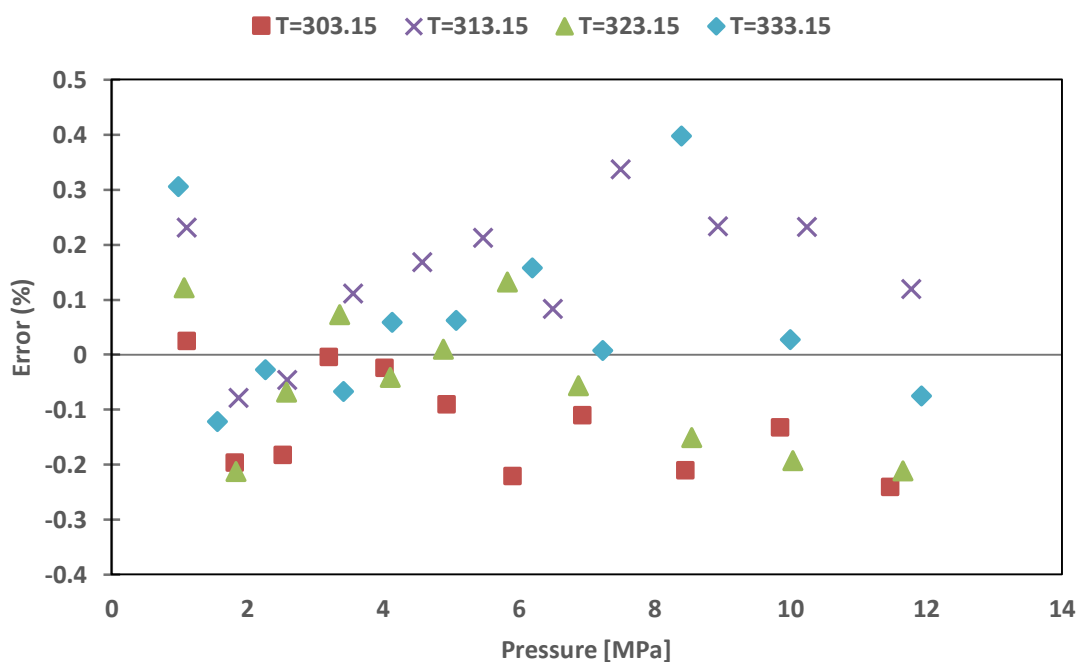
جدول ۴-۷ جزء مولی مخلوط اول

Component	Fraction	Percentage
CH₄	۰/۹۸۶۱	۹۸/۶۱
N₂	۰/۰۱۰۹	۱/۰۹
CO₂	۰/۰۰۳	۰/۳

شکل ۴-۹ نشان‌دهنده نمودار محاسبات ضریب تراکم‌پذیری برای ترکیب Mix1 در دماهای ثابت می‌باشد. شکل ۴-۱۰ نمودار درصد خطای داده‌های حاصل از محاسبات معادله حالت GERG-2008 می‌باشد که با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این نمودار، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۳۰۳ کلوین برابر ۰/۲۴۰۹-، برای حالت دما ثابت ۳۱۳ کلوین برابر با ۰/۳۳۷۲-، برای حالت دما ثابت ۳۲۳ کلوین برابر با ۰/۲۱۱۷- و برای حالت دما ثابت ۳۳۳ کلوین برابر با ۰/۳۹۸۶- می‌باشد.



شکل ۴-۹ نمودار ضریب تراکم‌پذیری برای مخلوط Mix1 برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۸]).



شکل ۴-۱۰ درصد خطا در محاسبات ضریب تراکم‌پذیری Mix1 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۸]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۸ نشان داده شده است.

جدول ۴-۸ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب تراکم‌پذیری Mix1

۳۲۳	۳۲۳	۳۱۳	۳۰۳	دما (کلوین)
۰/۱۱۹۱	۰/۱۱۵۳	۰/۱۶۸۷	۰/۱۳۰۹	AAD (%)

۴-۳-۲- محاسبه ضریب تراکم‌پذیری برای گاز طبیعی Mix2

درصد مولی داده شده برای ترکیب دوم در جدول ۴-۹ داده شده است. اعتبارسنجی ضریب

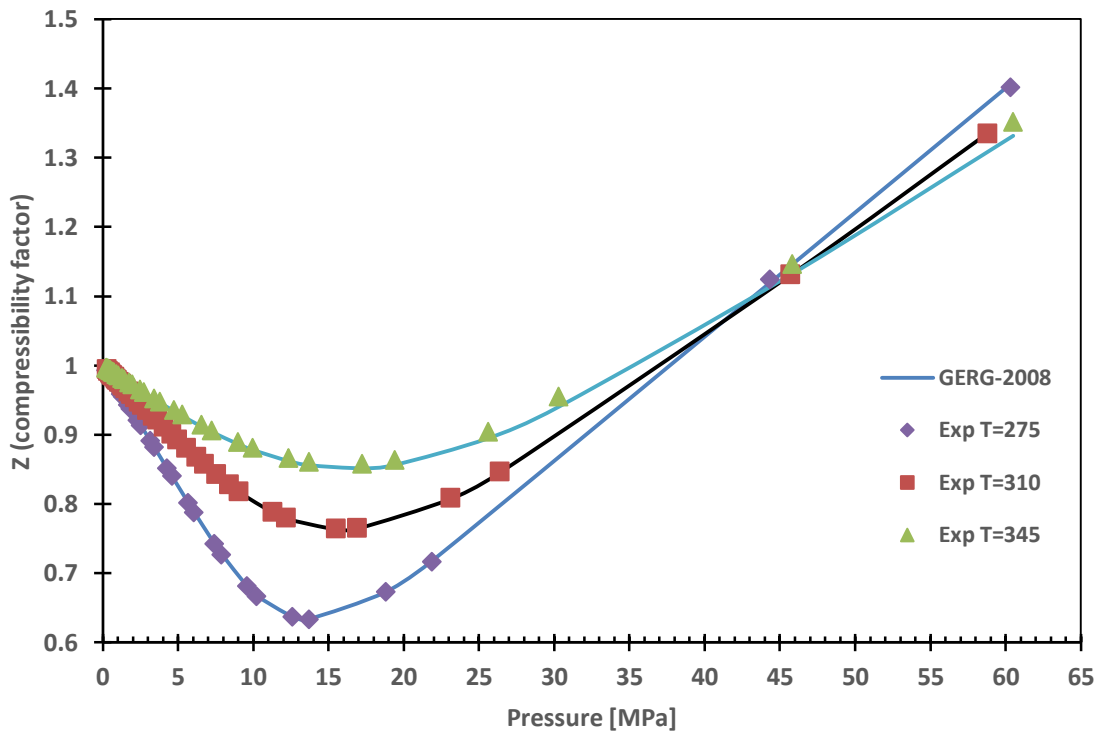
تراکم‌پذیری برای فشارهای تا ۶۰ مگاپاسکال و برای حالت‌های دما ثابت ۲۷۵ کلوین، ۳۱۰ کلوین، ۳۴۵

کلوین محاسبه شده است.

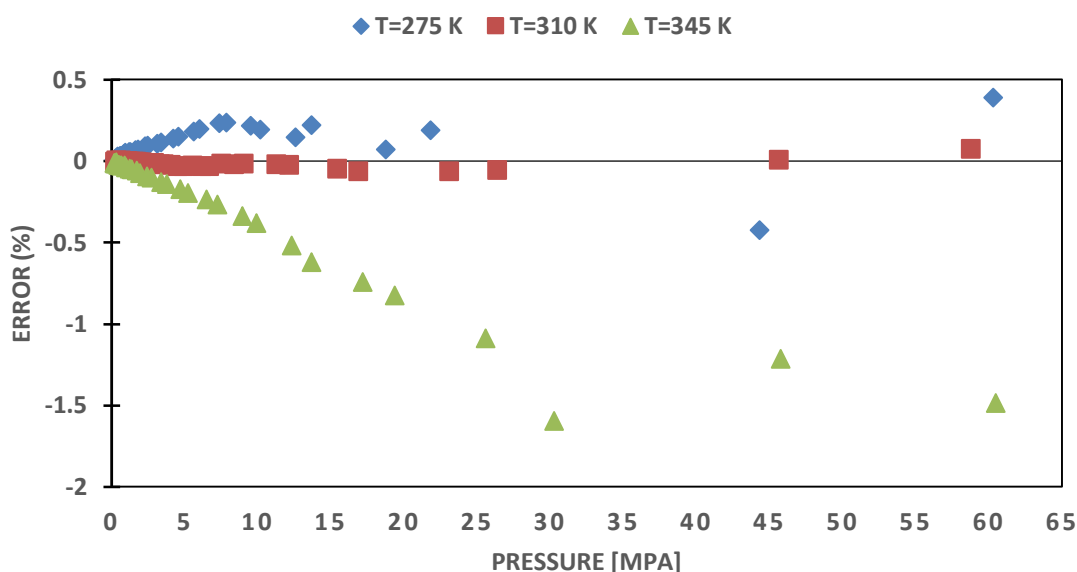
جدول ۴-۹ جزء مولی مخلوط دوم

Component	Fraction	Percentage
CH4	۰/۶۲۶۵	۶۲/۶۵
N2	۰/۱۲۰۹	۱۲/۰۹
C2H6	۰/۲۵۲۶	۲۵/۲۶

شکل ۴-۱۱ نمودار ضریب تراکم‌پذیری ترکیب گاز طبیعی Mix2 و شکل ۴-۱۲ نمودار درصد خطای محاسبات حاصل از این معادله حالت می‌باشد که با داده‌های تجربی مقایسه شده است. در این نمودار، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر ۰/۴۲۰۷، برای حالت دما ثابت ۳۱۰ کلوین برابر با ۰/۰۷۳۴، برای حالت دما ثابت ۳۴۵ کلوین برابر با ۱/۵۹۵۲- می‌باشد.



شکل ۴-۱۱ نمودار ضریب تراکم‌پذیری برای مخلوط Mix2 برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۹]).



شکل ۴-۱۲ درصد خطا در محاسبات ضریب تراکم‌پذیری Mix2 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۹]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۰ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب تراکم‌پذیری Mix2

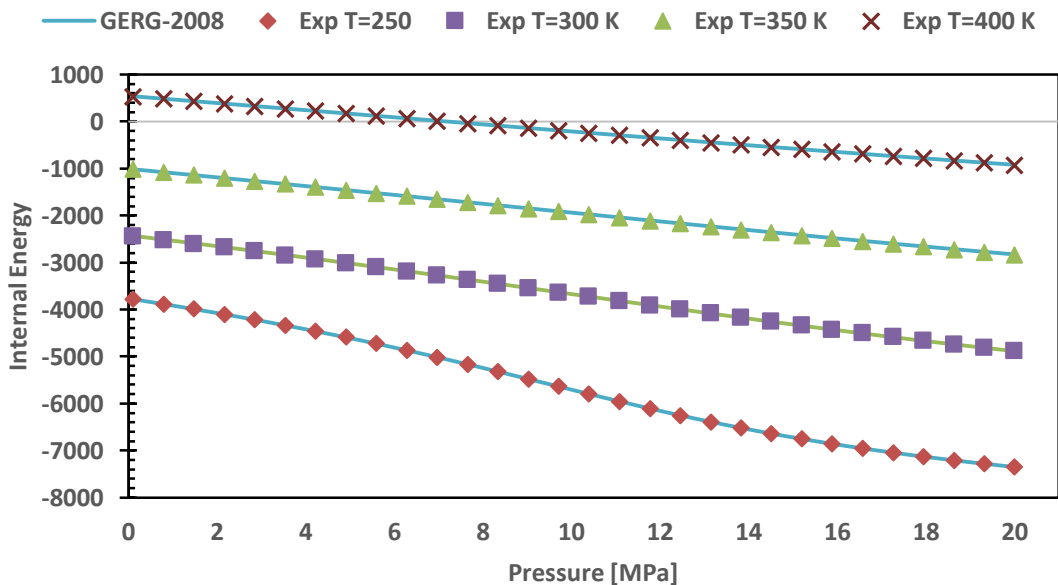
۳۴۵	۳۱۰	۲۷۵	دما (کلوین)
۰/۳۲۹	۰/۰۱۹۴	۰/۱۲۷۳	AAD (%)

۴-۴- اعتبارسنجی محاسبات انرژی داخلی

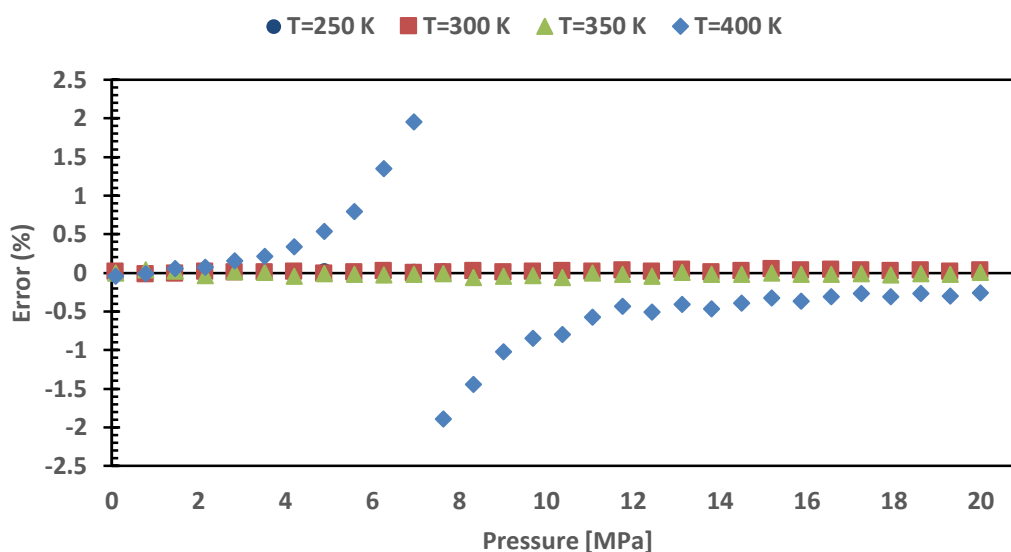
در این قسمت اعتبارسنجی محاسبات انرژی داخلی متان خالص بررسی شده است. همان‌طور که در بخش ۱-۲ گفته شد، اندازه‌گیری برخی خاصیت‌های ترمودینامیکی مانند انرژی داخلی، آنتروپی و آنتالپی در آزمایشگاه ممکن نیست. بنابراین به علت نبود داده‌های آزمایشگاهی برای مخلوط هیدروکربن‌های مختلف، اعتبارسنجی خواص نام برده، تنها با متان خالص مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، به علت تفاوت حالت مرجع در محاسبات گوناگون، جهت مقایسه‌ی نتایج حاصل از این معادله حالت با داده‌های آزمایشگاهی، محاسبه اختلاف انرژی درونی حالت موردنظر با حالت مرجع ضروری می‌باشد. حالت مرجع در نظر گرفته شده، دمای ۲۹۸ کلوین و فشار ۰/۱ مگاپاسکال می‌باشد.

۴-۴-۱- معبر سازی محاسبات انرژی داخلی برای متان خالص

در این قسمت، اعتبارسنجی انرژی داخلی متان خالص در ۴ دمای ثابت و در فشارهای مختلف محاسبه شده است. شکل ۴-۱۳ نمودار محاسبات این قسمت را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۴ نمودار درصد خطا را برای محاسبات انجام گرفته در این بخش را نمایش می‌دهد. ماکزیمم درصد خطا در دمای ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۳۳، در دمای ۳۰۰ کلوین برابر ۰/۰۵۰۴، در دمای ۳۵۰ کلوین ۰/۰۵۵۲ و در دمای ۴۰۰ کلوین برابر ۱/۹۶ است.



شکل ۴-۱۳ نمودار انرژی داخلی برای متان خالص بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]).



شکل ۴-۱۴ میزان خطا در محاسبه انرژی داخلی متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۰])

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۱ انحراف مطلق میانگین در محاسبه انرژی داخلی متان خالص

۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	دما (کلوین)
۰/۵۵۶۳	۰/۰۲۰۷	۰/۰۲۱۵	۰/۰۱۴۷	AAD (%)

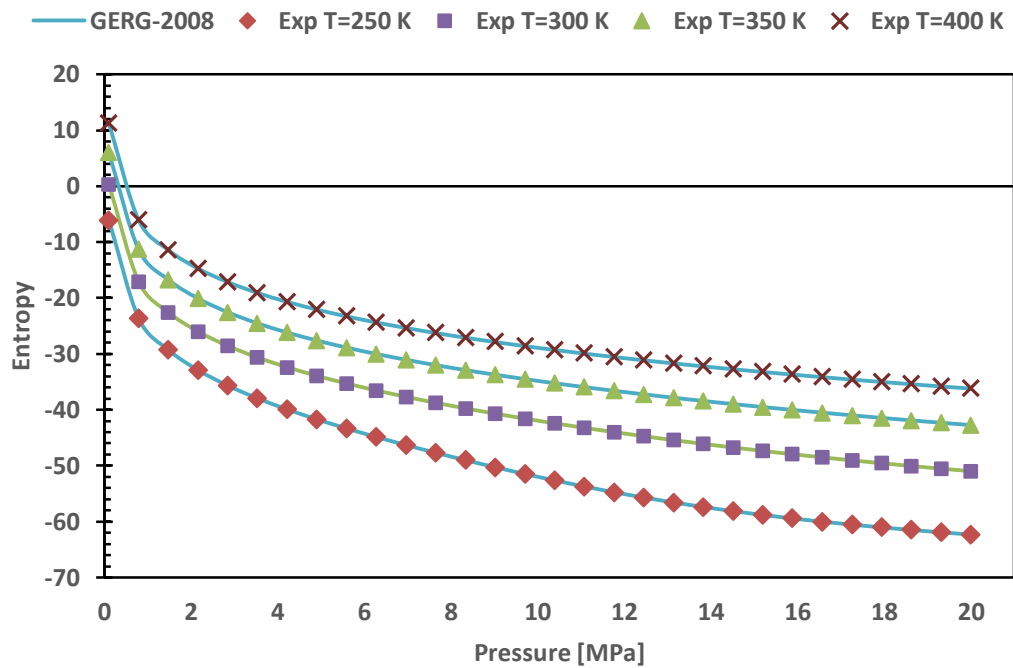
۴-۵- اعتبارسنجی محاسبات آنروپی

در این قسمت اعتبارسنجی محاسبات آنروپی برای متان خالص مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مقادیر خطای محاسبات حاصل شده از این معادله حالت با مقادیر آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته و به صورت نمودار ارائه شده اند.

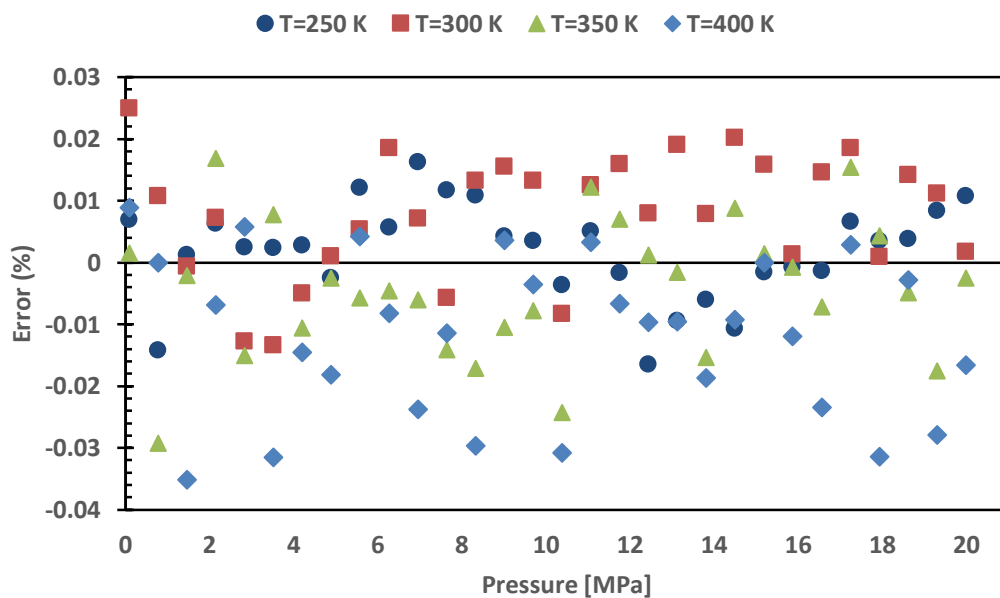
۴-۵-۱- معتبر سازی محاسبات آنروپی برای متان خالص

در این قسمت اعتبارسنجی محاسبات آنروپی متان خالص در ۴ دمای ثابت و در فشارهای مختلف انجام شده است. شکل ۴-۱۵ نمودار رفتار آنروپی را نشان می دهد. شکل ۴-۱۶ نیز نمودار مقدار خطای نتایج حاصله از این معادله حالت در مقایسه با داده های تجربی را نشان می دهد. ماکزیمم درصد خطا در دمای ثابت ۲۵۰ کلوین برابر ۰/۰۱۶۵-، در دمای ۳۰۰ کلوین برابر ۰/۰۲۵، در دمای ۳۵۰ کلوین

برابر ۰/۰۲۹۲- و در دمای ۴۰۰ برابر ۰/۰۳۵۱- است.



شکل ۴-۱۵ نمودار آنتروپی برای متان خالص بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]).



شکل ۴-۱۶ درصد خطا در محاسبه آنتروپی متان خالص (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۲ انحراف مطلق میانگین در محاسبه آنتروپی متان خالص

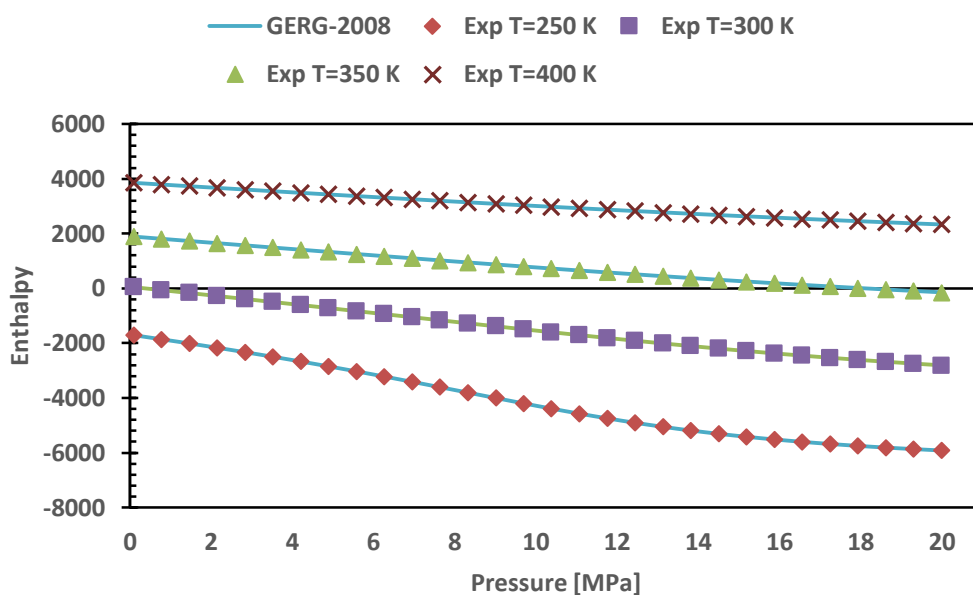
۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	دما (کلوین)
۰/۰۱۳۷	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۰۸	۰/۰۰۶۴	AAD (%)

۴-۶- اعتبارسنجی محاسبات آنتالپی

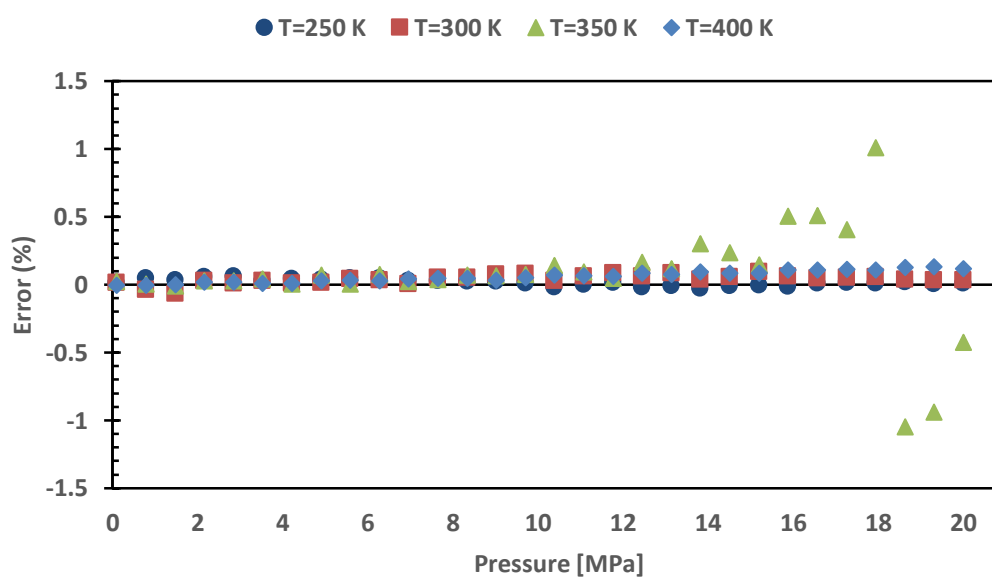
در این قسمت محاسبات آنتالپی برای متان خالص اعتبارسنجی شده است و نتایج حاصله با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و خطای محاسبات گزارش شده است. خطای پایین محاسبات نشان دهنده دقت بالای معادله حالت GERG-2008 برای محاسبات آنتالپی می‌باشد. همچنین حالت مرجع مورد نظر دمای ۲۹۸ کلوین و فشار ۰/۱ مگاپاسکال است.

۴-۶-۱- معتبر سازی محاسبات آنتالپی متان خالص

در این قسمت محاسبات آنتالپی متان خالص در ۴ دمای ثابت و در فشارهای مختلف معتبر سازی شده است. شکل ۴-۱۷ نمودار این معتبر سازی را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۸ نیز نمودار خطای محاسبه شده برای نتایج حاصل از این معادله حالت در مقایسه با داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. ماکزیمم درصد خطا در دمای ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۵۸۶، در دمای ۳۰۰ کلوین برابر ۰/۰۹۳۸، در دمای ۳۵۰ کلوین برابر ۱/۰۴۷۸- و در دمای ۴۰۰ کلوین برابر ۰/۱۲۸۶ است.



شکل ۴-۱۷ نمودار آنتالپی برای متان خالص بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]).



شکل ۴-۱۸ درصد خطا در محاسبه آنتالپی متان خالص (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۱۳ نشان داده شده است.

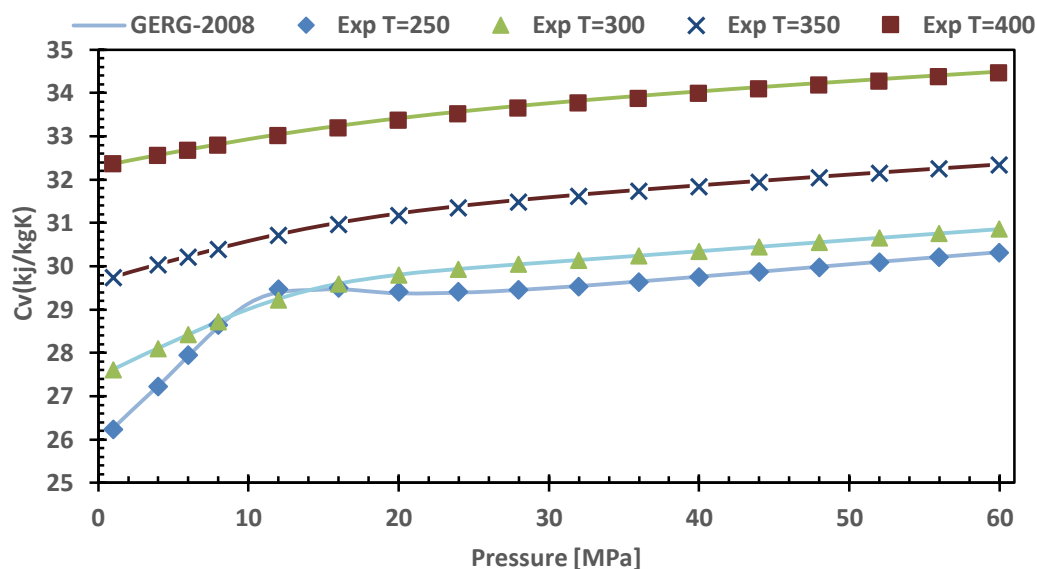
جدول ۴-۱۳ انحراف مطلق میانگین در محاسبه آنتالپی متان خالص

۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	دما (کلوین)
۰/۰۵۸۷	۰/۲۲۰۵	۰/۰۴۴۱	۰/۰۲۲۸	AAD (%)

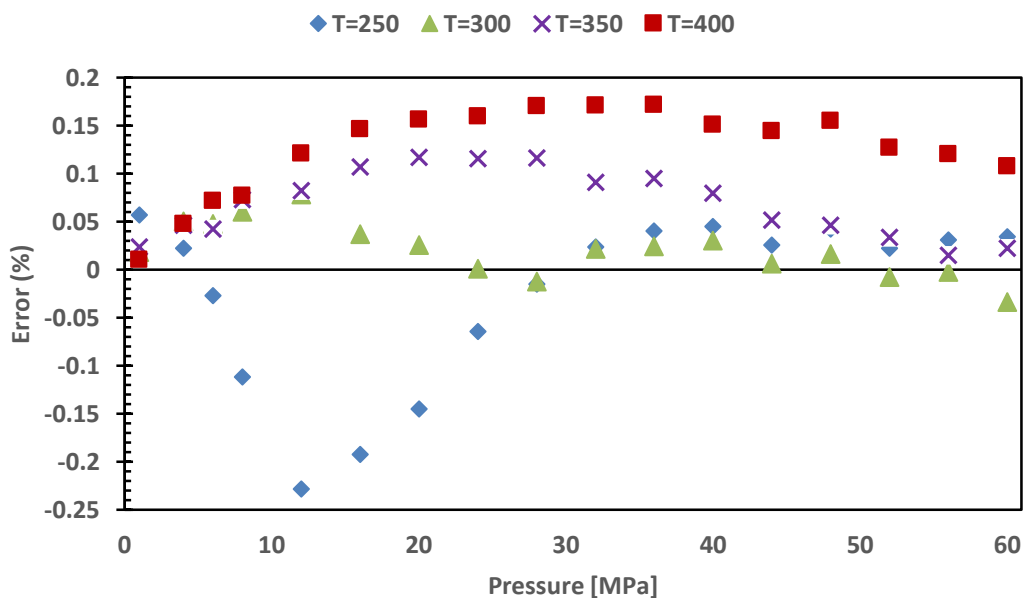
۴-۷- اعتبارسنجی محاسبات ظرفیت گرمایی حجم ثابت

در این بخش معتبرسازی محاسبات ظرفیت گرمایی حجم ثابت برای متان خالص و یک ترکیب دوتایی متان-اتان انجام گرفته است و خطای حاصل از محاسبات در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی به صورت نمودار ارائه می‌گردد. محاسبه ظرفیت گرمایی حجم ثابت متان خالص

در این بخش اعتبار محاسبات ظرفیت گرمایی حجم ثابت برای متان خالص در ۴ دمای ثابت و در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴-۱۹ نمودار این اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، نمودار خطای محاسبات حاصل از این معادله حالت در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نیز در شکل ۴-۲۰ نمایش داده شده است. ماکزیمم درصد خطا برای دمای ۲۵۰ کلوین برابر ۰/۲۲۸-، برای دمای ۳۰۰ کلوین ۰/۰۳۳۷-، برای دمای ۳۵۰ کلوین ۰/۱۱۶۷ و برای دمای ۴۰۰ کلوین برابر با ۰/۱۷۱۲ است.



شکل ۴-۱۹ نمودار ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت برای متان خالص برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به‌صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]).



شکل ۴-۲۰ درصد خطا در محاسبه Cv متان خالص (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cv متان خالص

دما (کلوین)	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰
AAD (%)	۰/۰۵۷۲	۰/۰۷۸	۰/۰۶۸۱	۰/۱۲۳۹

۴-۷-۱- معتبر سازی محاسبات ظرفیت گرمایی حجم ثابت برای ترکیب دوتایی متان -

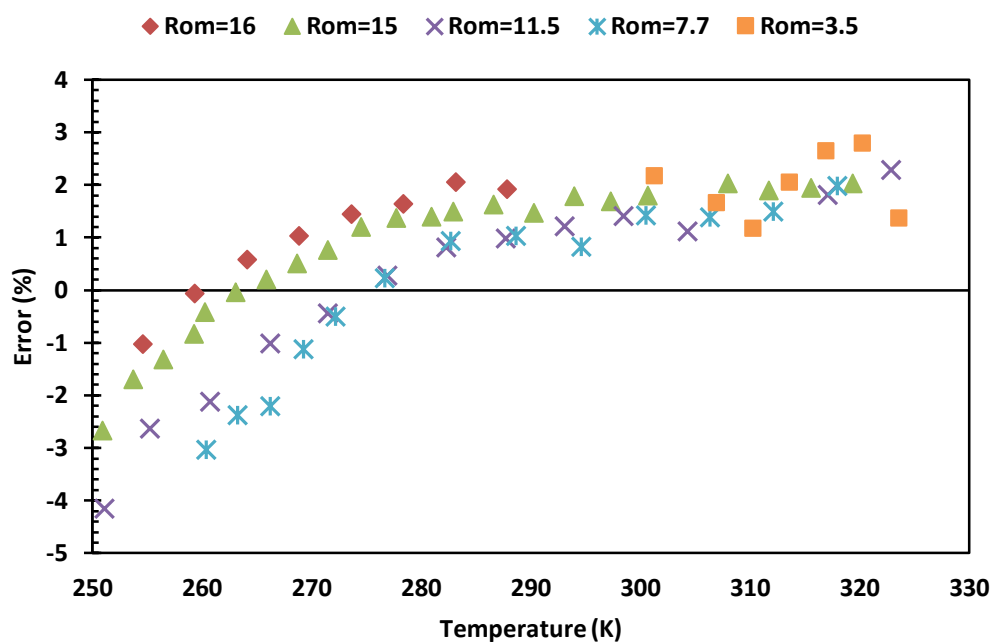
اتان

در این بخش معتبر سازی محاسبات ظرفیت گرمایی حجم ثابت برای مخلوط دوتایی متان - اتان با ترکیب مولی داده شده در جدول (۴-۱۵)، برای حالت‌های دانسیته مولار ثابت، انجام گرفته است. دما بین ۲۵۰ تا ۳۲۳ کلوین متغیر است و اعتبارسنجی در فشارهای پایین تر از ۳۵ مگاپاسکال انجام گرفته است.

جدول ۴-۱۵ نشان دهنده جزء مولی ترکیب

composition	proportion
متان	۰/۶۸۵۳
اتان	۰/۳۱۴۷

شکل (۴-۲۱)، نمودار درصد خطای نتایج حاصل از معادله حالت GERG-2008 در محاسبه ظرفیت گرمایی در حجم ثابت برای مخلوط دوتایی متان - اتان در مقایسه با داده‌های تجربی می‌باشد، که بر حسب دما و برای حالت‌های دانسیته مولار ثابت ۱۶، ۱۵، ۱۱/۵، ۷/۷ و ۳/۵ کیلو مول بر مترمکعب، نمایش داده شده است. ماکزیمم درصد خطا برای دانسیته مولار ثابت ۱۶ کیلو مول بر مترمکعب برابر با ۲/۰۶۳۳٪، برای دانسیته مولار ثابت ۱۵ کیلو مول بر مترمکعب برابر با ۲/۶۶۴۷٪، برای دانسیته مولار ثابت ۱۱/۵ کیلو مول بر مترمکعب برابر با ۴/۱۴۶۴٪، برای دانسیته مولار ثابت ۷/۷ کیلو مول بر مترمکعب برابر با ۳/۰۳۳٪ و برای دانسیته مولار ثابت ۳/۵ کیلو مول بر مترمکعب برابر با ۲/۷۹۱۴٪، می‌باشند.



شکل ۴-۲۱ درصد خطا در محاسبه ظرفیت گرمایی در حجم ثابت برای مخلوط متان-اتان (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۱])

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۶ انحراف مطلق میانگین در محاسبه CV ترکیب متان-اتان

۱۶	۱۵	۱۱/۵	۷/۷	۳/۵	Rom
۱/۲۲۱۱	۱/۳۷۴۲	۱/۵۶	۱/۴۲۶۹	۱/۹۷۶	AAD (%)

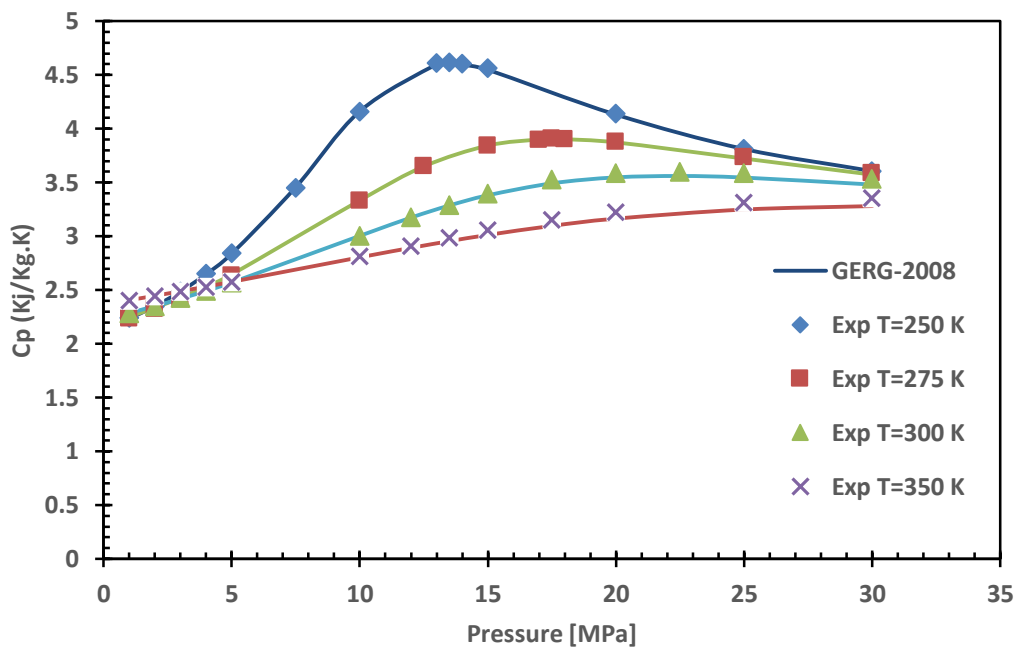
۸-۴-۱ اعتبارسنجی محاسبات ظرفیت گرمایی فشار ثابت

در این بخش معتبرسازی محاسبات ظرفیت گرمایی در فشار ثابت برای متان خالص انجام گرفته است. علاوه بر این، خطای محاسبات حاصل از این معادله حالت در مقایسه با داده‌های تجربی گزارش شده است.

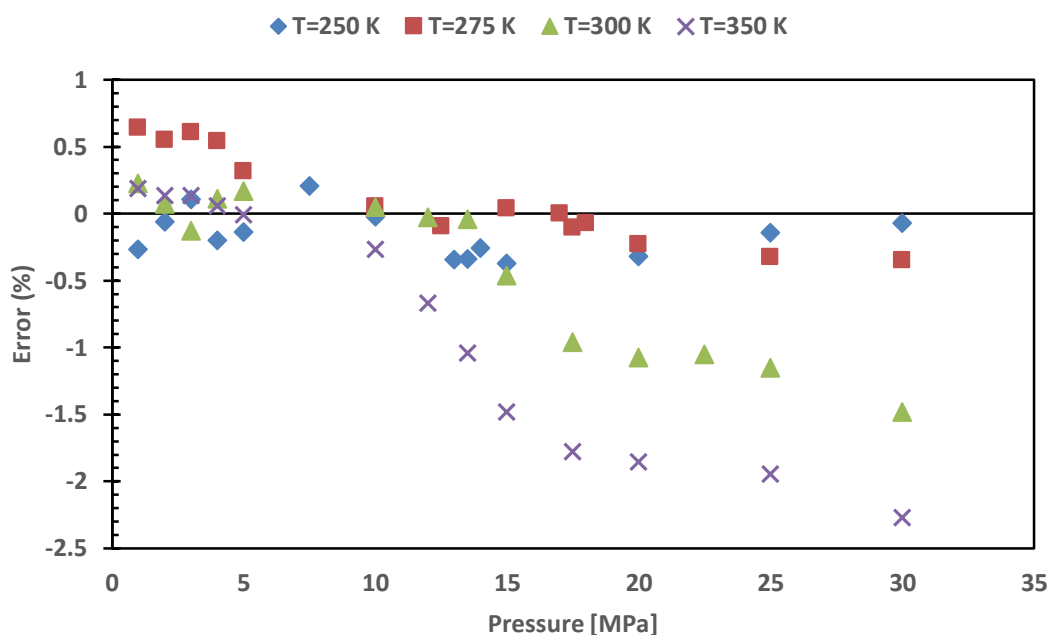
۴-۸-۱-۱ محاسبه ظرفیت گرمایی فشار ثابت برای متان خالص

شکل ۴-۲۲ نمودار محاسبات ظرفیت گرمایی در فشار ثابت برای متان خالص در ۴ دمای ثابت و در فشارهای مختلف را نمایش می‌دهد. همچنین خطای محاسبات حاصل از این معادله حالت با داده‌های

تجربی مقایسه شده است. شکل ۴-۲۳ نیز نمودار درصد خطا در این محاسبات را برای متان خالص نشان می دهد. ماکزیمم درصد خطا در دمای ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۳۷۲۶-، در دمای ۲۷۵ کلوین برابر با ۰/۶۴۳۴، در دمای ۳۰۰ کلوین برابر با ۱/۴۷۷۵- و در دمای ۳۵۰ کلوین برابر با ۲/۲۶۸۹- است.



شکل ۴-۲۲ نمودار ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت برای متان خالص بر حسب فشار و برای حالت های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).



شکل ۴-۲۳ درصد خطا محاسبه شده Cp برای متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۱۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۷ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cp متان خالص

دما (کلوین)	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰	۳۵۰
AAD (%)	۰/۲۰۱۷	۰/۲۸۰۱	۰/۵۰۰۸	۰/۹۰۹۸

۴-۸-۲- محاسبه ظرفیت گرمایی فشار ثابت برای ترکیب دوتایی متان-اتان

معتبرسازی ظرفیت گرمایی فشار ثابت برای ترکیب دوتایی متان-اتان با ترکیب مولی داده شده در

جدول (۴-۱۸) تا فشار ۳۰ مگاپاسکال و حالت های دما ثابت ۲۵۰ کلوین، ۲۷۵ کلوین، ۳۰۰ کلوین و

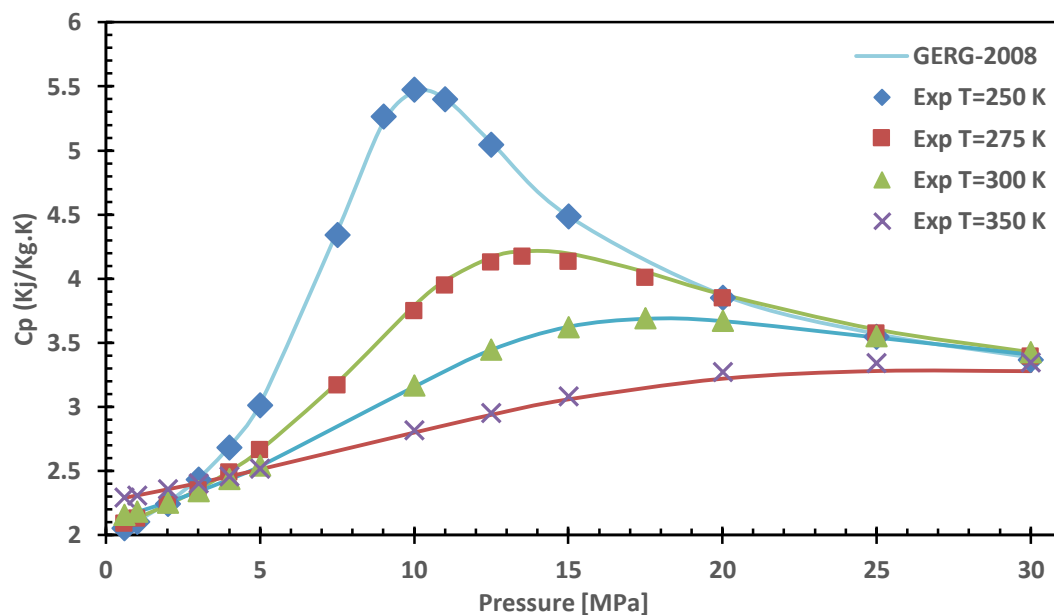
۳۵۰ کلوین، با استفاده از معادله حالت GERG-2008 انجام گرفته است. همچنین محاسبات انجام شده

را با داده های تجربی مقایسه شده است.

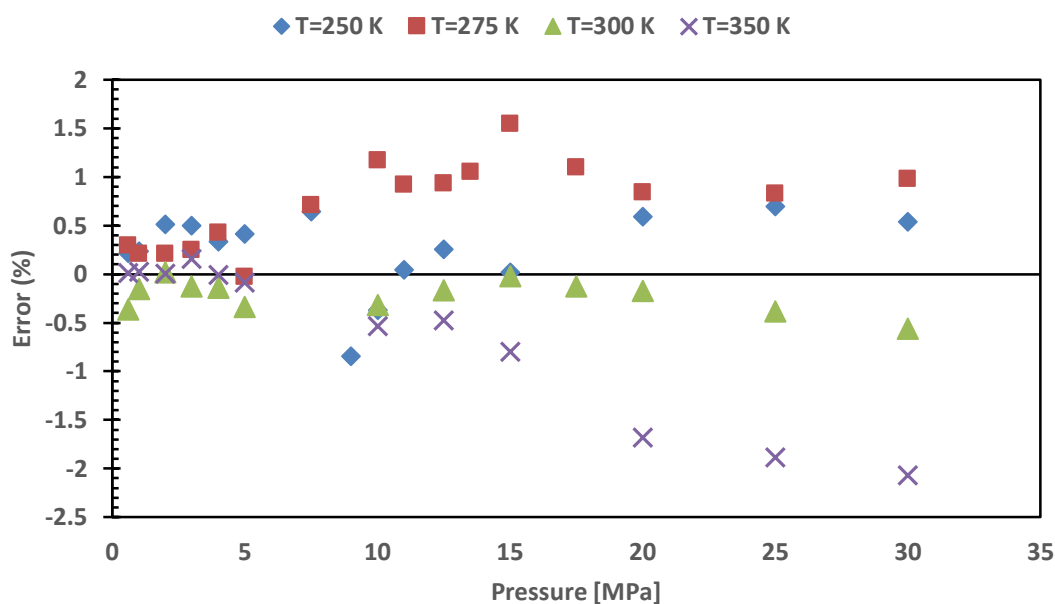
جدول ۴-۱۸ نشان دهنده جزء مولی ترکیب متان-اتان

composition	proportion
متان	۰/۸۵
اتان	۰/۱۵

شکل (۴-۲۴) رفتار ظرفیت گرمایی فشار ثابت برای ترکیب دوتایی متان-اتان را نمایش می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده فشار می‌باشد. همچنین شکل (۴-۲۵)، نمودار خطای محاسبات حاصل از این معادله حالت برای ظرفیت گرمایی فشار ثابت ترکیب دوتایی متان-اتان را برای حالت‌های دما ثابت، نشان می‌دهد. نمودار شکل (۴-۲۵)، ماکزیمم درصد خطای محاسبه شده برای حالت دما ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۸۴۱۳٪، برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۱/۵۵٪، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۰/۵۵۶۸٪ و برای حالت دما ثابت ۳۵۰ کلوین برابر با ۲/۰۶۸۹٪، می‌باشند.



شکل ۴-۲۴ نمودار ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برای ترکیب متان-اتان برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).



شکل ۴-۲۵ درصد خطا محاسبه شده Cp ترکیب متان-اتان (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۹ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cp ترکیب متان-اتان

۳۵۰	۳۰۰	۲۷۵	۲۵۰	دما (کلوین)
۰/۶۴۴۸	۰/۲۱۹۲	۰/۷۲۱۵	۰/۴۱۵۷	AAD (%)

۴-۸-۳- محاسبه ظرفیت گرمایی در فشار ثابت برای ترکیب گاز طبیعی

یک گاز طبیعی با ترکیب مولی معلوم در جدول (۴-۲۰) نشان داده شده است. ظرفیت گرمایی

فشار ثابت تا فشار ۳۰ مگاپاسکال و در ۴ دمای ثابت ۲۵۰ کلوین، ۲۷۵ کلوین، ۳۰۰ کلوین و ۳۵۰

کلوین، با بکارگیری از معادله حالت GERG-2008 برای این ترکیب گاز طبیعی محاسبه شده است.

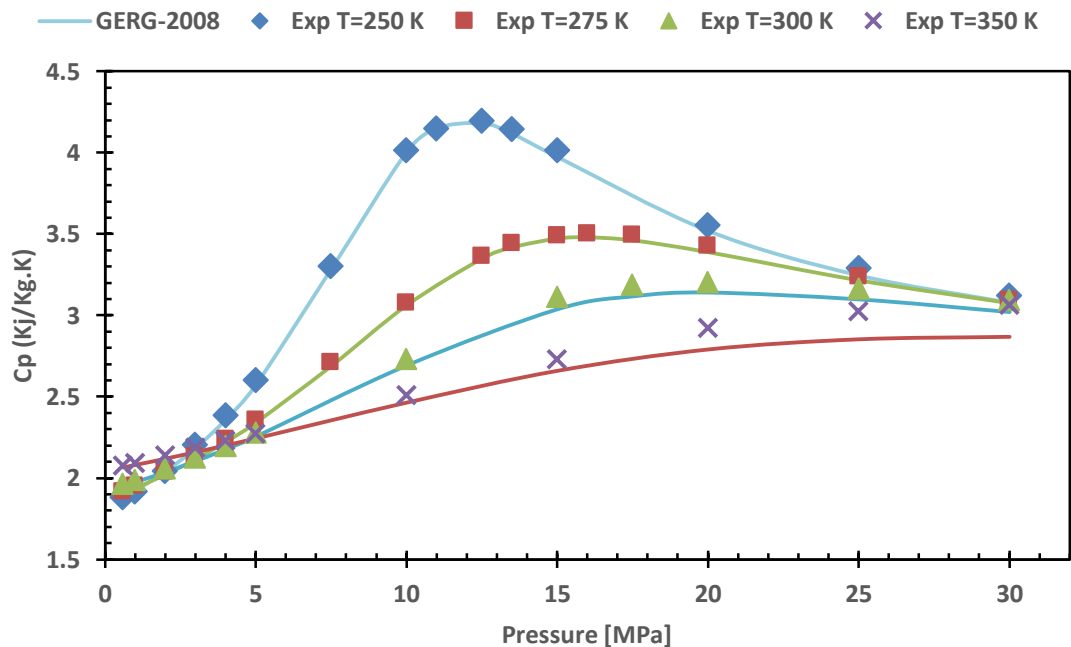
همچنین محاسبات حاصل از این معادله حالت با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است و خطای این

محاسبات گزارش شده اند.

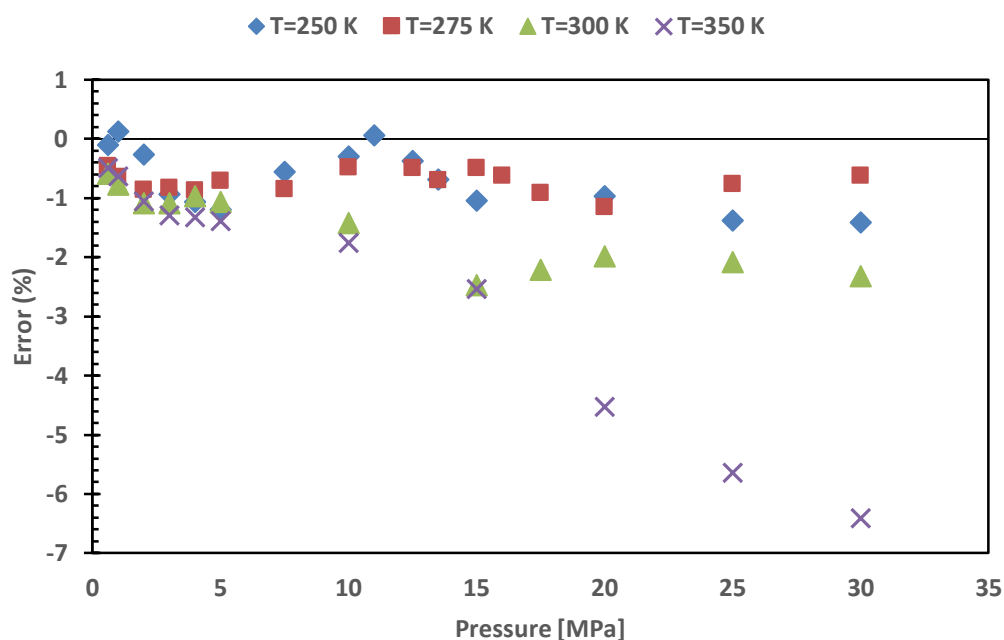
جدول ۲۰-۴ نشان‌دهنده جزء مولی ترکیب گاز طبیعی

composition	proportion
متان	۰/۷۹۹۴۲
نیتروژن	۰/۰۹۹۳۹
کربن دی‌اکسید	۰/۰۲۰۹
اتان	۰/۰۵۰۲۹
پروپان	۰/۰۳

شکل (۲۶-۴) نشان‌دهنده رفتار ظرفیت گرمایی ویژه فشار ثابت برحسب فشار برای گاز طبیعی می‌باشد. خطای محاسبات حاصل از این معادله حالت در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۴-۲۷)، نمایش داده شده‌است. با توجه به شکل (۴-۲۷)، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۱/۴۰۹-، برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۱/۴۷۲-، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۲/۴۶۳۲- و برای حالت دما ثابت ۳۵۰ کلوین برابر با ۶/۴۰۸- می‌باشند.



شکل ۲۶-۴ نمودار ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برای گاز طبیعی برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه‌شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۳]).



شکل ۴-۲۷ درصد خطای محاسبه شده ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برای گاز طبیعی داده شده (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۳]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۲۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۱ انحراف مطلق میانگین در محاسبه Cp گاز طبیعی

دما (کلوین)	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰	۳۵۰
AAD (%)	۰/۶۹۵	۰/۷۱۱۸	۱/۵۰۱۵	۲/۴۵۶۴

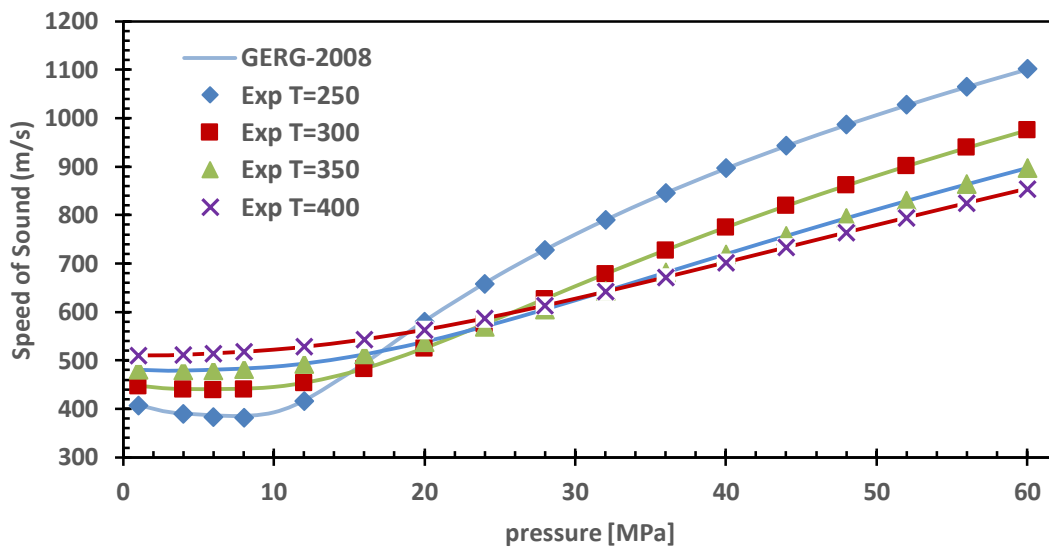
۹-۴-۹- اعتبارسنجی محاسبات سرعت صوت

در این بخش محاسبات سرعت صوت برای متان خالص، یک ترکیب گاز طبیعی و همچنین برای یک بیوگاز با استفاده از معادله حالت GERG-2008 محاسبه شده و نتایج حاصل با داده های آزمایشگاهی، مقایسه شده است. همچنین نمودار درصد خطا و درصد انحراف مطلق میانگین محاسبات نسبت به داده های آزمایشگاهی بدست آمده است.

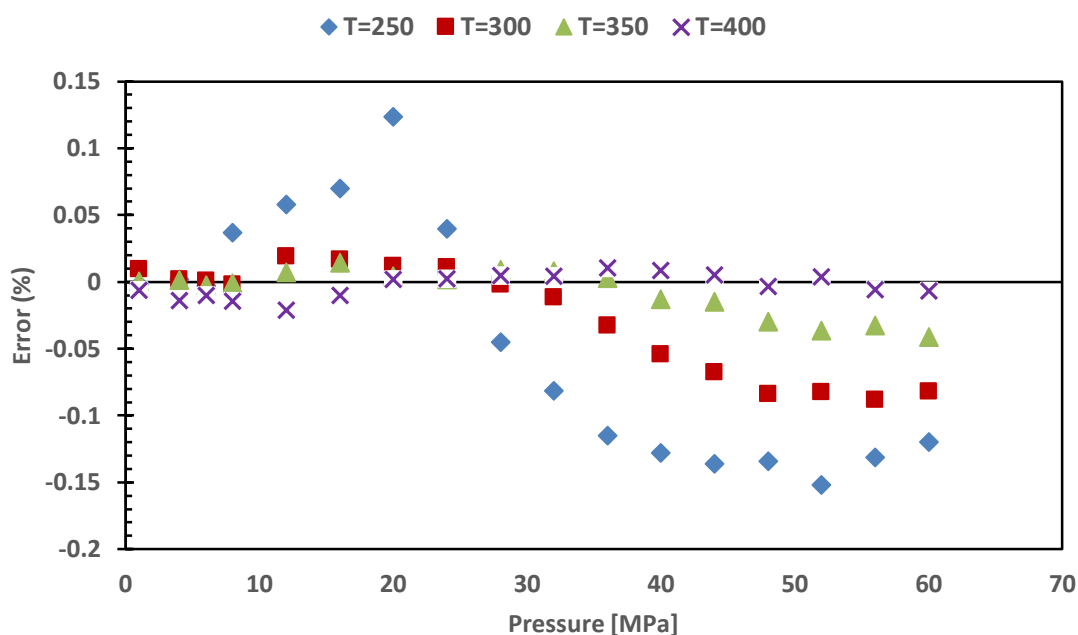
۹-۴-۹-۱- معتبر سازی محاسبات سرعت صوت برای متان خالص

در این بخش محاسبات سرعت صوت برای متان خالص انجام گرفته است. نتایج حاصل شده از معادله حالت GERG-2008 با داده های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین انحراف

مطلق میانگین نیز گزارش شده است. در شکل (۴-۲۸) نمودار سرعت صوت متان خالص برای دماهای ثابت ۲۵۰ کلوین، ۳۰۰ کلوین، ۳۵۰ کلوین و ۴۰۰ کلوین نمایش داده شده است. شکل (۴-۲۹) نیز، نمودار درصد خطای نتایج حاصله برای سرعت صوت را در مقایسه با داده‌های تجربی برای متان خالص نشان می‌دهد. ماکزیمم درصد خطا در دمای ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۱۵۲-، در دمای ۳۰۰ کلوین ۰/۰۸۸۲-، در دمای ۳۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۴۱۱- و در دمای ۴۰۰ کلوین برابر با ۰/۰۲۰۸- است.



شکل ۴-۲۸ نمودار سرعت صوت برای متان خالص بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۴]).



شکل ۴-۲۹ درصد خطای محاسبه شده سرعت صوت برای متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۴]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۲۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۲ انحراف مطلق میانگین در محاسبه سرعت صوت متان خالص

۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	دما (کلوین)
۰/۰۰۷۹	۰/۰۱۳	۰/۰۳۴	۰/۰۸۱	AAD (%)

۴-۹-۲- معتبر سازی محاسبات سرعت صوت برای ترکیب گاز طبیعی

در این بخش محاسبات سرعت صوت برای یک گاز طبیعی با ترکیب مولی داده شده در جدول (۴-۴)

(۲۳)، تا فشار ۶۰ مگاپاسکال و دماهای ثابت ۳۲۳/۳۱ کلوین، ۳۴۶/۴۸ کلوین، ۳۶۹/۴۱ کلوین و ۳۹۲/۳۴

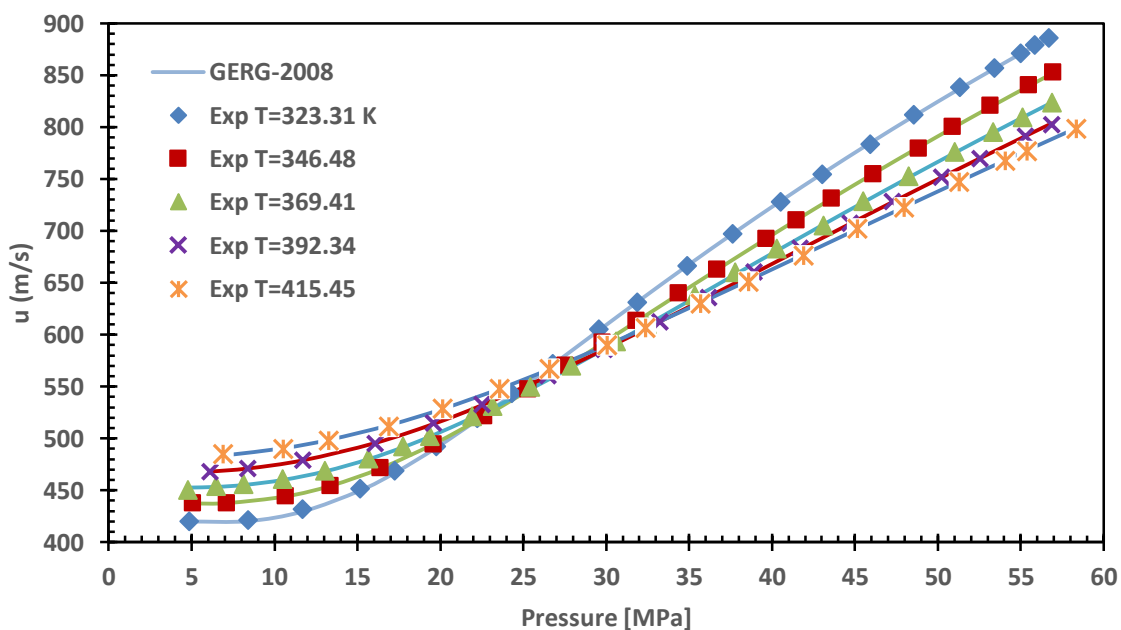
کلوین و ۴۱۵/۴۵ کلوین با بکارگیری معادله حالت GERG-2008 انجام گرفته است. سپس نتایج حاصل

از این معادله حالت با داده های تجربی مقایسه شده است.

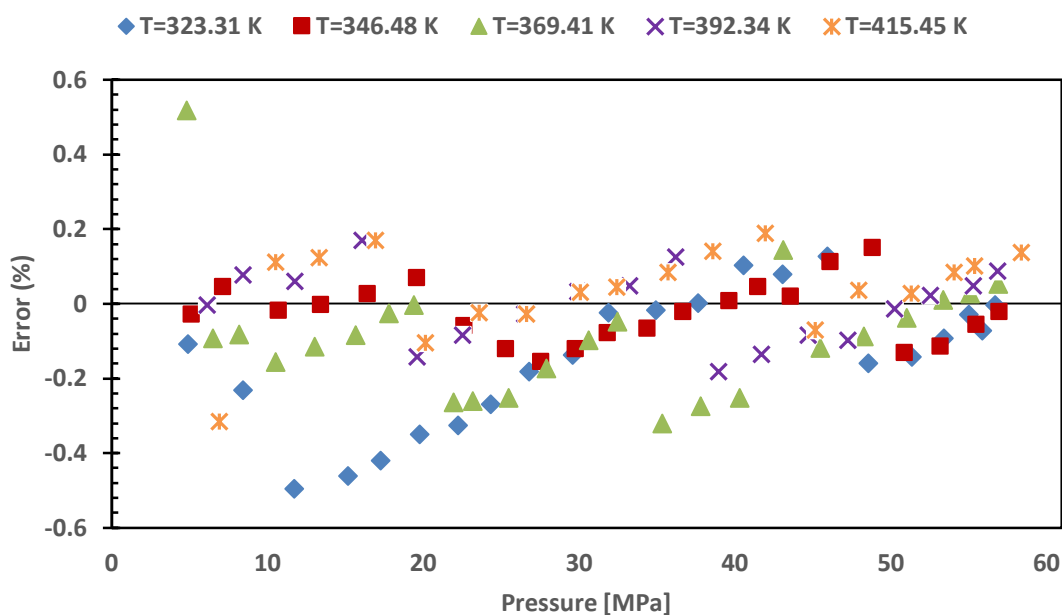
جدول ۴-۲۳ نشان دهنده جزء مولی ترکیب گاز طبیعی

composition	proportion
متان	۰/۸۷۹۴۲۷
نیتروژن	۰/۰۱۵۰۲۰
کربن دی اکسید	۰/۰۲۰۱۳۰
اتان	۰/۰۶
پروپان	۰/۰۲۰۴۳۰
ان-بوتان	۰/۰۰۲۹۹۸
ایزوبوتان	۰/۰۰۱۹۹۵

شکل (۴-۳۰) نمودار سرعت صوت را برای ترکیب گاز طبیعی و برای حالت‌های دما ثابت نشان می‌دهد. همچنین شکل (۴-۳۱)، درصد خطا در محاسبه سرعت صوت برای گاز طبیعی را برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت، نشان می‌دهد. بیشترین درصد خطا در دمای ثابت ۳۲۳/۳۱ کلوین برابر با ۰/۴۹۴۲-، در دمای ۳۴۶/۴۸ کلوین ۰/۱۵۵۴-، در دمای ۳۶۹/۴۱ کلوین برابر با ۰/۵۱۸۱ و در دمای ۳۹۲/۳۴ کلوین برابر با ۰/۱۸۱۶- و در دمای ۴۱۵/۴۵ برابر ۰/۳۱۵- است.



شکل ۴-۳۰ نمودار سرعت صوت برای ترکیب گاز طبیعی برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۵]).



شکل ۴-۳۱ درصد خطای محاسبه شده سرعت صوت برای متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۵]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۲۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۴ انحراف مطلق میانگین در محاسبه سرعت صوت ترکیب گاز طبیعی

۴۱۵/۴۵	۳۹۲/۳۴	۳۶۹/۴۱	۳۴۶/۴۸	۳۲۳/۳۱	دما (کلوین)
۰/۱۰۱۵	۰/۰۸۰۱	۰/۱۵۱۶	۰/۰۶۶۸	۰/۱۷۳۸	AAD (%)

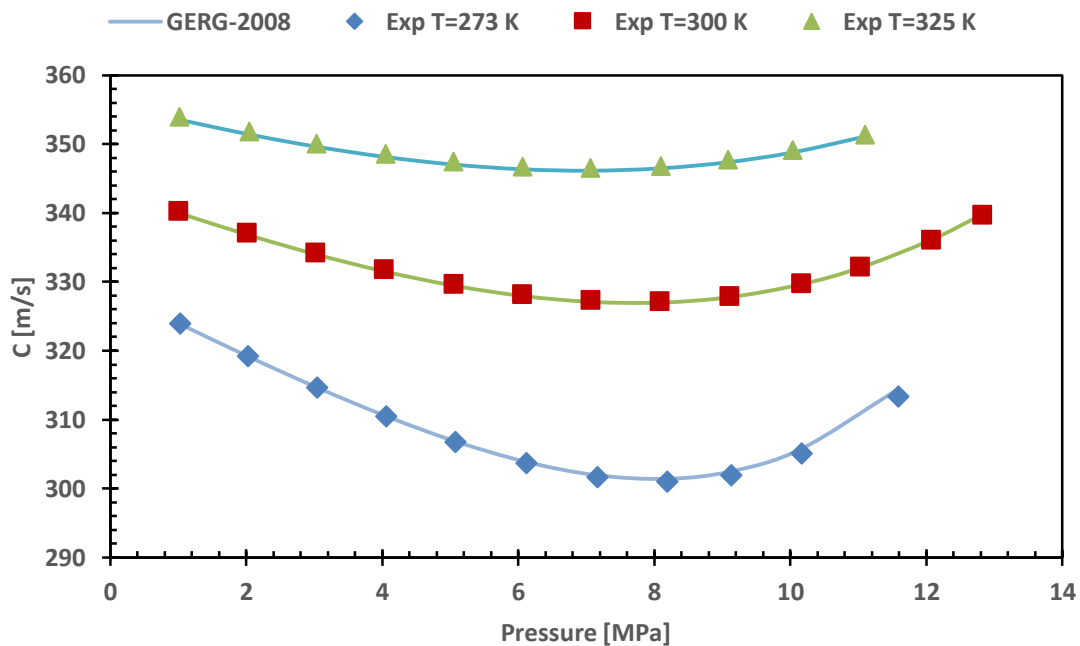
۴-۹-۳- اعتبار سنجی محاسبه سرعت صوت بیوگاز

در این قسمت محاسبات سرعت صوت برای ترکیب بیوگاز ارائه خواهد شد. اعتبار سنجی حاصله برای این ترکیب بیوگاز در ۳ دمای ثابت و به ازای فشارهای مختلف محاسبه شده است. جدول (۴-۲۵) نشان دهنده جزء مولی این مخلوط می باشد که در این قسمت بررسی خواهد شد. دقت بالای نتایج حاصله مخصوصاً در نمودارهای خطای مطلق، نشان دهنده دقت بالای معادله حالت GERG-2008 در تعیین چگالی بیوگاز می باشد.

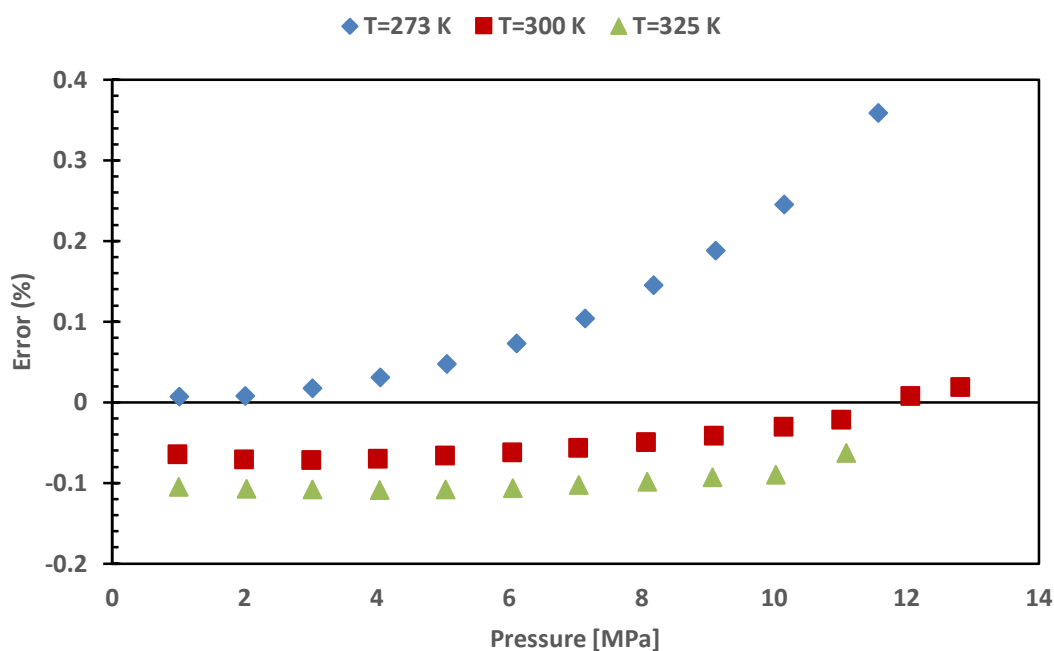
جدول ۴-۲۵ درصد مولی ترکیب مورد استفاده در محاسبات سرعت صوت بیوگاز

composition	proportion
متان	۰/۴۹۸۴۷۸
کربن دی اکسید	۰/۳۵۱۴۸۴
نیتروژن	۰/۱۰۰۱۳۸
کربن مونواکسید	۰/۰۴۹۸۹۹

شکل ۴-۳۲ نشان دهنده محاسبات سرعت صوت بیوگاز با درصد مولی مشخص در جدول ۴-۲۵ و شکل ۴-۳۳ نشان دهنده درصد خطای این محاسبات در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به این شکل، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۷۳ کلوین برابر با ۰/۳۵۹۲، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۰/۰۷۲۴- و برای حالت دما ثابت ۳۲۵ کلوین برابر با ۰/۱۰۸۲- می‌باشد.



شکل ۴-۳۲ نمودار سرعت صوت برای بیوگاز بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۳۳]).



شکل ۴-۳۳ درصد خطای محاسبه شده سرعت صوت برای بیوگاز (داده های آزمایشگاهی مرجع [۳۳]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۲۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۶ انحراف مطلق میانگین در محاسبه سرعت صوت ترکیب گاز طبیعی

۳۲۵	۳۰۰	۲۷۳	دما (کلوین)
۰/۰۹۸۷	۰/۰۴۸۸	۰/۱۱۱۷	AAD (%)

۴-۱۰- اعتبارسنجی محاسبات ضریب ژول-تامسون

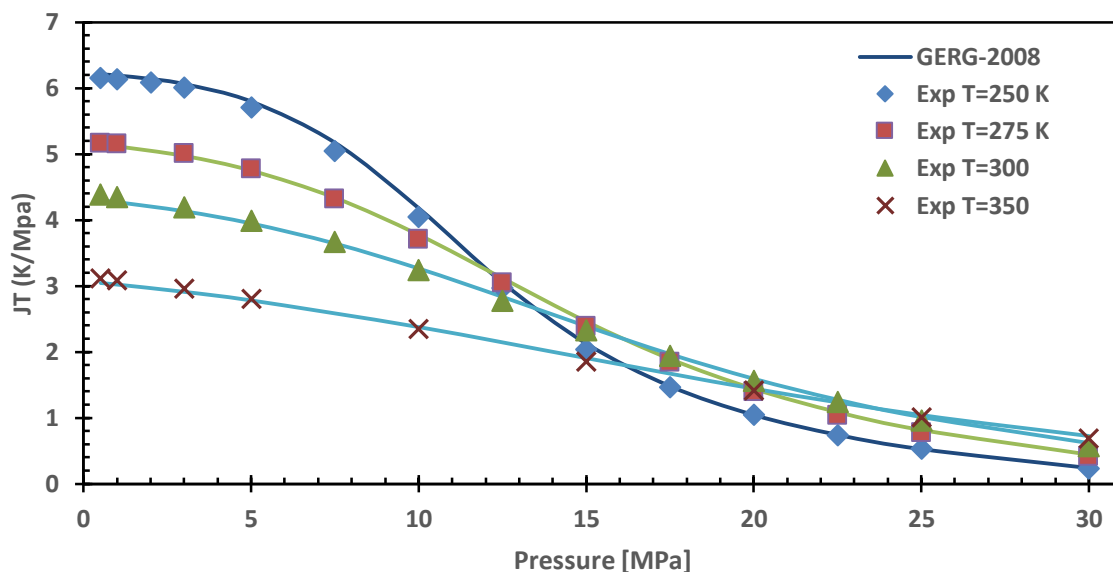
در این بخش معتبرسازی محاسبات ضریب ژول-تامسون برای متان خالص، ترکیب دوتایی متان-اتان و ترکیبی از گاز طبیعی با درصد مولی مشخص شده در جدول (۴-۲۷) انجام گرفته است. همچنین نتایج حاصله از معادله حالت GERG-2008 در محاسبه ضریب ژول-تامسون با داده های تجربی مقایسه شده است و خطای محاسبات به صورت نمودار و جدول گزارش شده است.

جدول ۴-۲۷ درصد مولی ترکیبات مورد استفاده در محاسبات ضریب ژول-تامسون

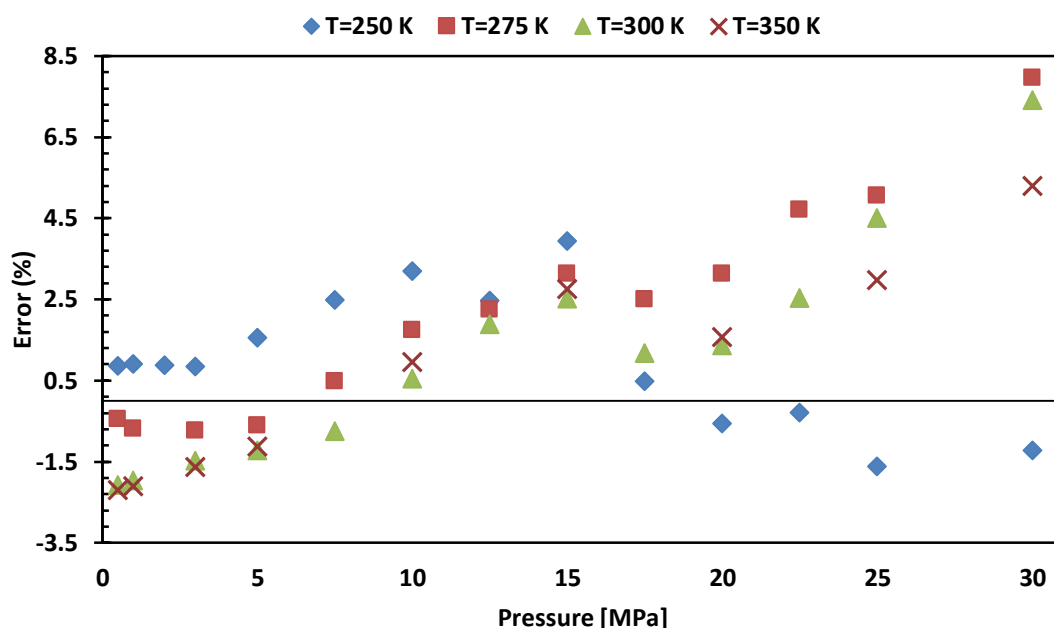
component	Mix1	Mix2	Mix3
متان	۱	۰/۸۵	۰/۷۹۹۴۲
نیتروژن	-	-	۰/۰۹۹۳۹
کربن دی اکسید	-	-	۰/۰۲۰۹
اتان	-	۰/۱۵	۰/۰۵۰۲۹
پروپان	-	-	۰/۰۳

۴-۱۰-۱- معبر سازی محاسبات ضریب ژول-تامسون برای متان خالص

در این قسمت محاسبات ضریب ژول-تامسون برای متان خالص برای ۳ حالت دما ثابت در شکل ۴-۳۴ آورده شده است. همچنین شکل ۴-۳۵ نشان دهنده درصد خطای این محاسبات در مقایسه با داده‌های تجربی می‌باشد. بیشترین درصد خطا برای حالت دمای ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۳/۹۵۲۵، دمای ۲۷۵ کلوین برابر ۷/۹۷، دمای ۳۰۰ کلوین برابر ۷/۴۲۳۹ و دمای ۳۵۰ کلوین برابر ۵/۲۹ است.



شکل ۴-۳۴ نمودار ضریب ژول-تامسون متان خالص بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).



شکل ۴-۳۵ درصد خطای محاسبه شده ضریب ژول-تامسون متان خالص (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۲۸ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۸ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب ژول-تامسون متان خالص

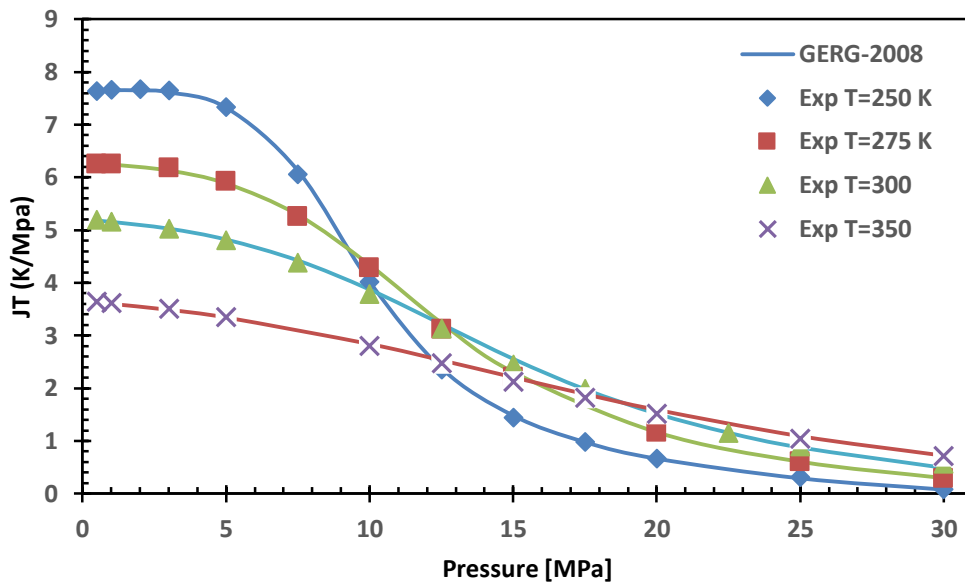
۳۵۰	۳۰۰	۲۷۵	۲۵۰	دما (کلوین)
۲/۲۹۰۲	۲/۲۶۴	۲/۵۷۷۳	۱/۵۲۴۸	AAD (%)

۴-۱۰-۲- محاسبه ضریب ژول-تامسون برای ترکیب متان-اتان

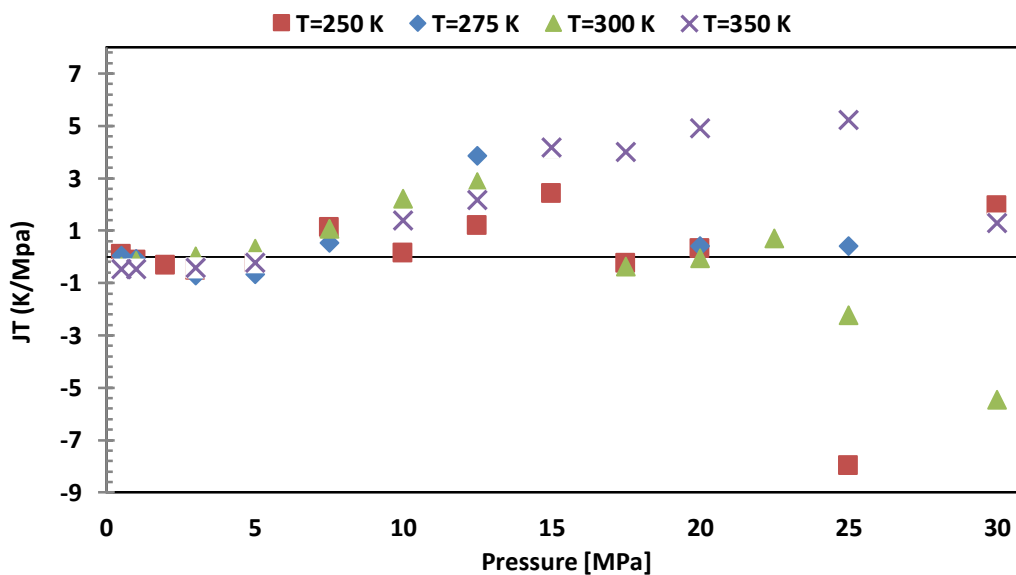
در این قسمت اعتبارسنجی محاسبات ضریب ژول-تامسون برای ترکیب دوتایی متان-اتان با درصد مولی مشخص در جدول (۴-۲۷) انجام گرفته است. محاسبات در بازه فشاری تا ۳۰ مگاپاسکال و دماهای ثابت ۲۵۰ کلوین، ۲۷۵ کلوین، ۳۰۰ کلوین و ۳۵۰ کلوین قرار دارد. نهایتاً نتایج حاصل شده با استفاده از معادله حالت GERG-2008 با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده‌اند.

شکل (۴-۳۶) نشان‌دهنده نمودار ضریب ژول-تامسون برحسب فشار برای ترکیب دوتایی متان-اتان می‌باشد. همچنین شکل (۴-۳۷)، نمودار درصد خطای نتایج بدست آمده ضریب ژول-تامسون از معادله حالت GERG-2008 در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی برای ترکیب دوتایی متان-اتان را نمایش

می‌دهد. با توجه به شکل (۴-۳۷)، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۷/۹-، برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۴/۱۹-، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۵/۴۵۵۳- و برای حالت دما ثابت ۳۵۰ کلوین برابر با ۵/۲۳- می‌باشند.



شکل ۴-۳۶ نمودار ضریب ژول-تامسون برحسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).



شکل ۴-۳۷ درصد خطای محاسبه شده ضریب ژول-تامسون (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۲۹ نشان داده شده است.

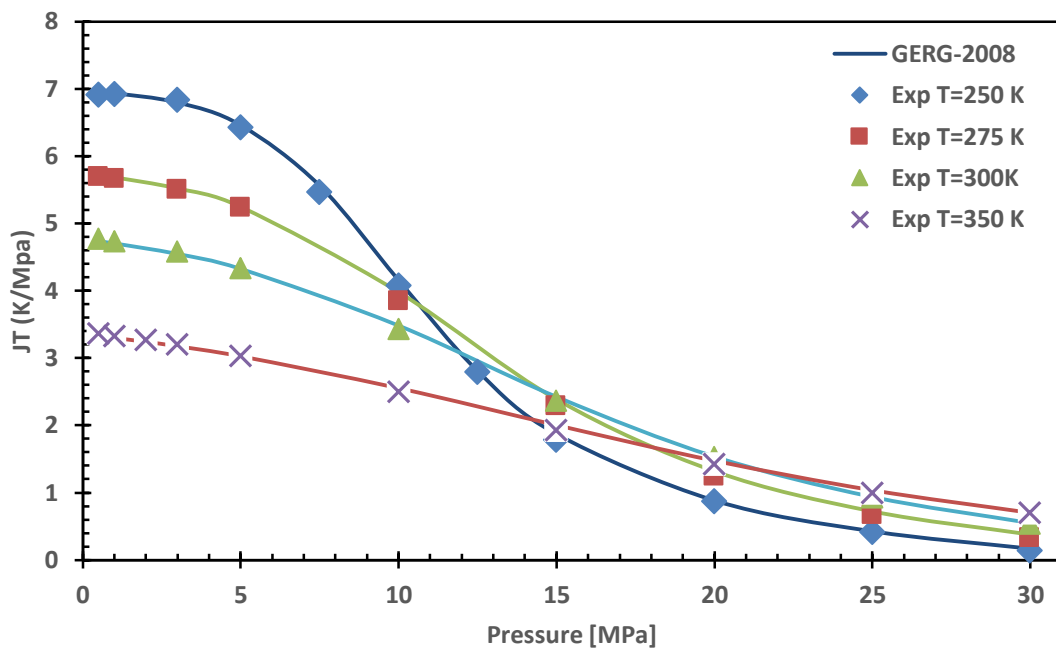
جدول ۴-۲۹ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب ژول-تامسون ترکیب متان-تان

۳۵۰	۳۰۰	۲۷۵	۲۵۰	دما (کلوین)
۲/۲۴۷۶	۲/۱۱۵۳	۱/۲۳۱۹	۱/۲۸۲۸	AAD (%)

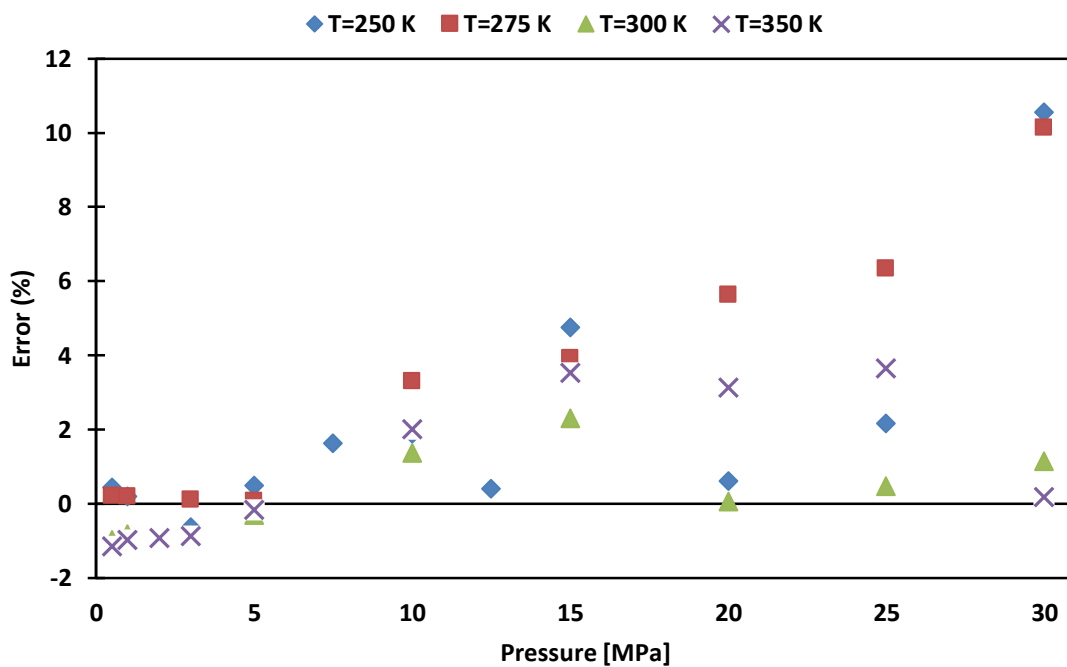
۴-۱۰-۳- محاسبه ضریب ژول-تامسون برای ترکیب گاز طبیعی

در این قسمت اعتبارسنجی محاسبات ضریب ژول-تامسون برای گاز طبیعی با ترکیب مولی داده شده در جدول (۴-۱۸) انجام شده است. محدوده فشار تا ۳۰ مگاپاسکال و دماهای ثابت ۲۵۰ کلوین، ۲۷۵ کلوین، ۳۰۰ کلوین و ۳۵۰ کلوین می باشد. سپس نتایج بدست آمده با استفاده از معادله حالت GERG-2008 با داده های آزمایشگاهی مقایسه گردیده اند.

شکل (۴-۳۸) نشان دهنده نمودار ضریب ژول-تامسون برحسب فشار برای گاز طبیعی می باشد. شکل (۴-۳۹)، نشان دهنده درصد خطای نتایج بدست آمده برای ضریب ژول-تامسون در مقایسه با داده های تجربی می باشد. با توجه به شکل (۴-۳۹)، ماکزیمم درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۱۰/۵۵، برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۱۰/۱۴۷۹، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۲/۳۰۴۳ و برای حالت دما ثابت ۳۵۰ کلوین برابر با ۳/۶۵۰۵ می باشند.



شکل ۳۸-۴ نمودار ضریب ژول-تامسون بر حسب فشار و برای حالت‌های دما ثابت محاسبه شده به صورت آزمایشگاهی و معادله حالت GERG-2008 (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).



شکل ۳۹-۴ درصد خطای محاسبه شده ضریب ژول-تامسون (داده های آزمایشگاهی مرجع [۴۲]).

محاسبات انحراف مطلق میانگین برای این ترکیب در جدول ۴-۳۰ نشان داده شده است.

جدول ۴-۳۰ انحراف مطلق میانگین در محاسبه ضریب ژول-تامسون ترکیب گاز طبیعی

۳۵۰	۳۰۰	۲۷۵	۲۵۰	دما (کلوین)
۱/۶۵۸	۰/۹۲۱	۳/۳۲۴	۲/۱۵۸	AAD (%)

۴-۱۱- افت دما در شیر فشارشکن

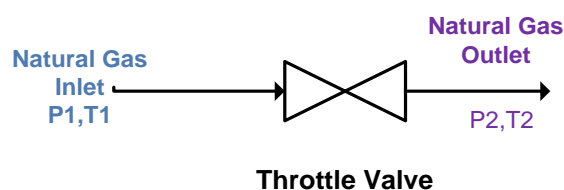
در این قسمت یک شیر فشارشکن را شبیه‌سازی کرده و به بررسی میزان افت دما در آن می‌پردازیم

۴-۱۱-۱- فرآیند هم‌آنتالپی (آنتالپی ثابت)

فرایندی است که طی آن آنتالپی H یا آنتالپی مخصوص h آن سامانه تغییر نمی‌کند؛ یعنی:

$$h_1 = h_2$$

در حالت پایدار، در فرایند جریان پایدار، می‌توان تغییرات بزرگ در فشار و دمای سیال داشت درحالی‌که فرایند همچنان هم‌آنتالپی باقی‌مانده است به شرطی که: هیچ انتقال حرارتی بین محیط و سامانه صورت نگیرد و هیچ کاری روی محیط یا توسط محیط انجام نشود و هیچ تغییری در انرژی جنبشی سیال اتفاق نیفتد. (اگر در تحلیل این فرایند یک حجم کنترل در نظر بگیریم هر چیزی خارج از این حجم کنترل محیط به حساب می‌آید). نمونه این فرایند در شیر اختناق اتفاق می‌افتد. در این قسمت به کمک معادله حالت GERG-2008 به بررسی افت دما در یک شیر اختناق می‌پردازیم. شکل زیر یک شیر اختناق شبیه‌سازی شده به صورت خلاصه و با شرایط ورودی و خروجی آن نشان می‌دهد:



شکل ۴-۴۰ شیر اختناق

۴-۱۱-۲- نحوه محاسبه دمای خروجی

مرحله اول: در این مرحله ابتدا با توجه به دما و فشار ورودی شیر اختناق و کسر مولی اجزا مقدار آنتالپی را با استفاده از روش اصلی معادله حالت GERG-2008 محاسبه می‌کنیم. سپس همان‌طور که در بالا به آن اشاره شد شیر اختناق یک فرایند آنتالپی ثابت را طی می‌کند. پس بنابراین می‌توان آنتالپی ورودی و خروجی این شیر را با یکدیگر یکسان در نظر گرفت.

$$H1 = \text{Enthalpy}(T1, P1, X(i))$$

$$H2 = H1$$

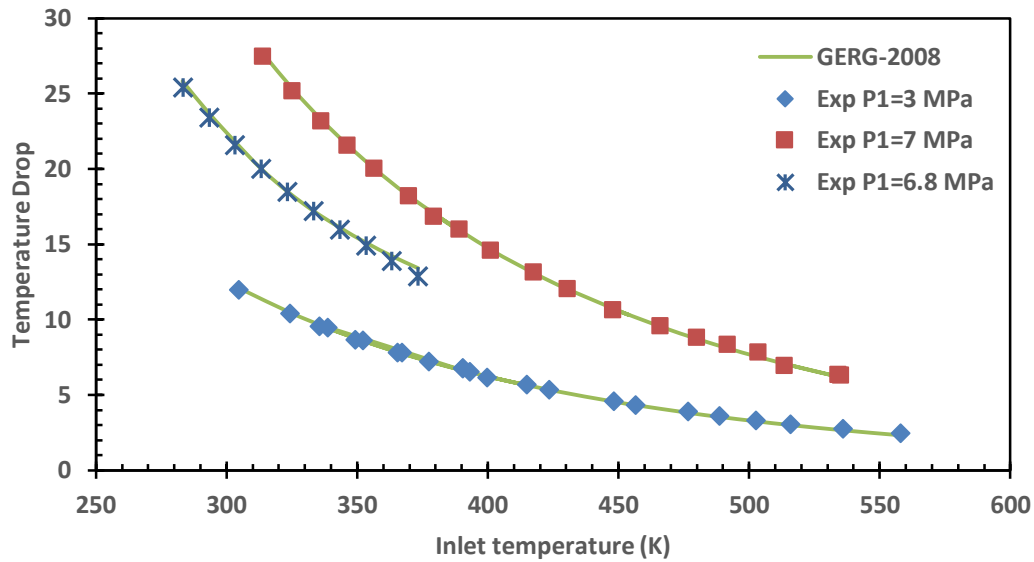
مرحله دوم: برای محاسبه دمای خروجی شیر اختناق دو پارامتر فشار و آنتالپی خروجی و کسر مولی اجزا را در اختیار داریم. پس با مشخص بودن این پارامترها و با استفاده از نرم‌افزار تهیه‌شده جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی بر اساس ورودی‌های فشار، آنتالپی و ترکیب گاز، مقدار دمای خروجی شیر اختناق و در نتیجه افت دما به دست می‌آید.

$$T2 = \text{Temperature}(P2, H2, X(i))$$

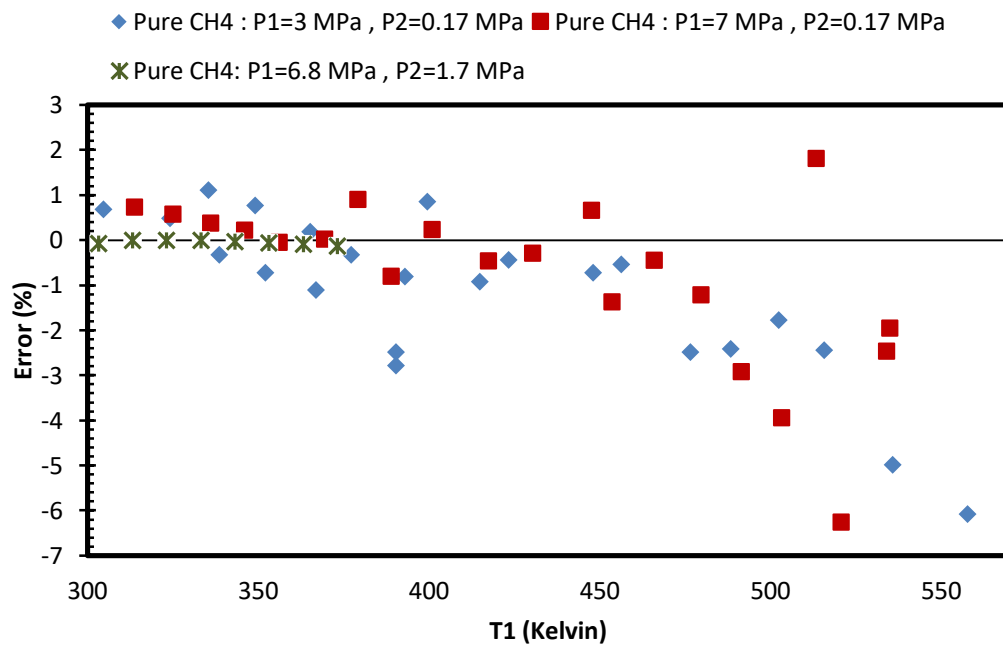
۴-۱۱-۳- افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت شیر اختناق برای متان خالص

در این قسمت افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت فشارشکنی برای متان خالص با استفاده از معادله حالت GERG-2008، محاسبه‌شده است. محاسبات برای سه فرآیند فشارشکنی با فشار ورودی ۳ و ۷ و ۶/۸ مگاپاسکال تا فشار خروجی به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۱۷ و ۱/۷ مگاپاسکال انجام‌شده است. درنهایت، درصد خطای نتایج بدست آمده نسبت به داده‌های آزمایشگاهی محاسبه‌شده است. محدوده دمای ورودی T_1 بین ۳۰۰ تا ۵۷۰ کلوین و محدوده افت دما ΔT بین ۵ تا ۲۸ کلوین برای دو حالت اول می‌باشد و برای حالت سوم محدوده دمایی ۲۸۳ تا ۳۷۳ کلوین و محدوده افت دمای بین ۱۳ تا ۲۶ کلوین می‌باشد. شکل (۴-۴۱)، افت دما در حین فرآیند آنتالپی ثابت فشارشکنی را برحسب دمای ورودی و برای متان خالص نشان می‌دهد. همچنین شکل (۴-۴۲)، درصد خطا برای محاسبات افت دما

در فرآیند آنتالپی ثابت فشارشکنی برای متان خالص را در این سه حالت برحسب دمای ورودی، نشان می‌دهد.



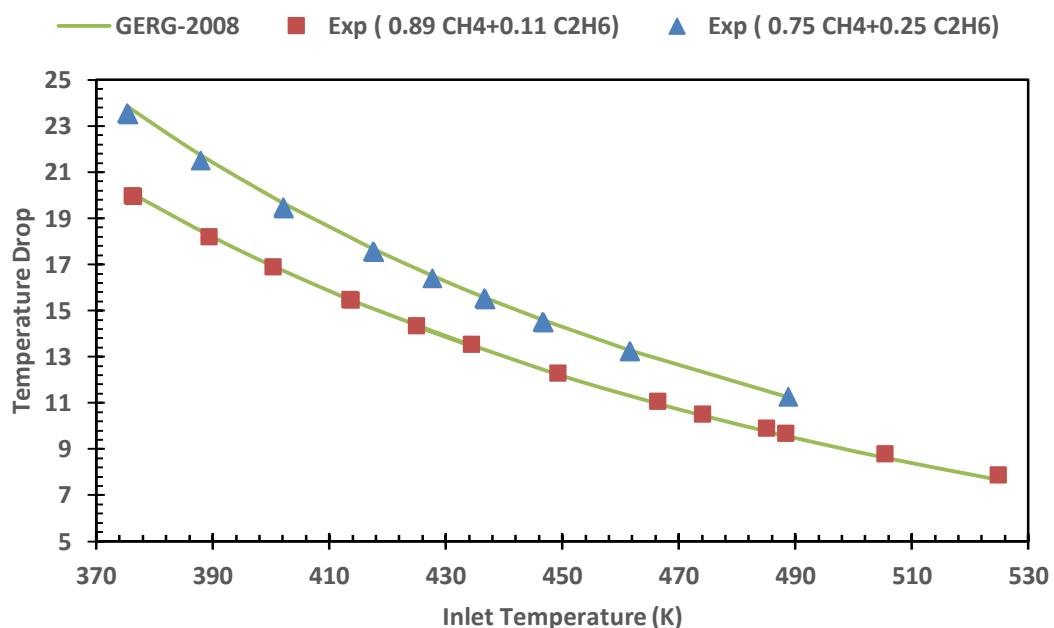
شکل ۴-۴ افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت برای متان خالص برحسب دمای ورودی (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۶])



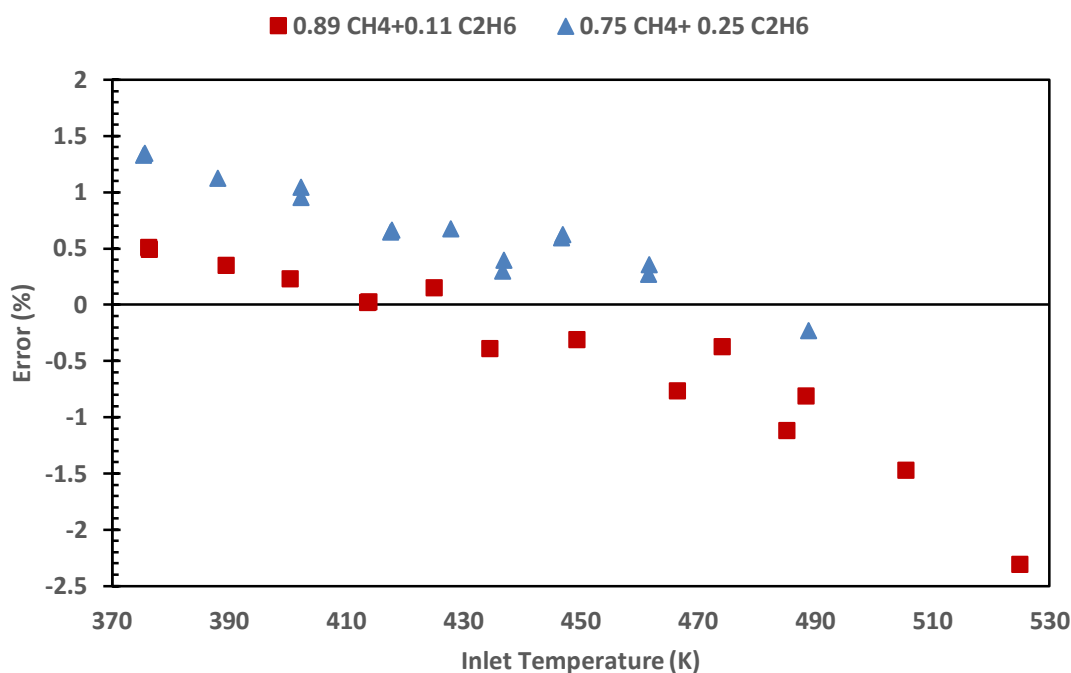
شکل ۴-۴ درصد خطای محاسبه‌شده برای افت دما برحسب دمای ورودی برای متان خالص (مرجع [۴۶])

۴-۱۱-۴- افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت فشارشکنی برای مخلوط دوتایی متان-اتان

در این قسمت افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت فشارشکنی برای دو مخلوط دوتایی متان - اتان، با استفاده از معادله حالت GERG-2008، محاسبه شده است. محاسبات برای فرآیند فشارشکنی با فشار ورودی ۷ مگاپاسکال تا فشار خروجی ۰/۱۷ مگاپاسکال انجام شده است. در نهایت درصد خطای محاسبات نسبت به داده‌های تجربی محاسبه شده است. محدوده دمای ورودی T_1 بین ۳۷۰ تا ۵۳۰ کلوین و محدوده افت دما ΔT بین ۷ تا ۲۴ کلوین می‌باشند. شکل (۴-۴۳)، افت دما را برحسب دمای ورودی در فرآیند آنتالپی ثابت فشارشکنی نشان می‌دهد. در این نمودار افت دما برای دو مخلوط دوتایی متان - اتان با درصد مولی متفاوت، محاسبه شده است. شکل (۴-۴۴)، درصد خطا برای افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت برای دو مخلوط شبیه گاز طبیعی را در حالت افت فشار از ۷ مگاپاسکال تا ۰/۱۷ مگاپاسکال برحسب دمای ورودی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴۳ افت دما در فرآیند آنتالپی ثابت برای ترکیب متان-اتان برحسب دمای ورودی (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۶])

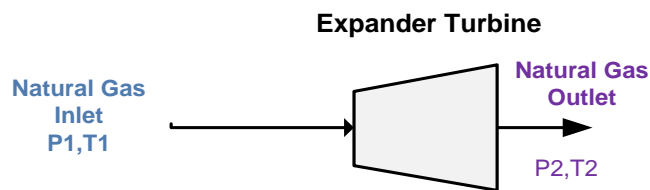


شکل ۴-۴ درصد خطای محاسبه شده برای افت دما برحسب دمای ورودی برای ترکیب متان-اتان (مرجع [۴۶]).

۴-۱۲- افت دما در توربواکسپندر

توربواکسپندر یا توربین انبساطی، یک توربین جریان محوری یا توربینی سانتریفیوژ است که در آن یک گاز پرفشار برای تولید کار منبسط می شود که این کار اغلب برای درایو کمپرسور یا درایو ژنراتور تولید برق بکار می رود.

از آنجاکه کار به وسیله انبساط گاز پرفشار حاصل می شود، انبساط به وسیله یک فرایند آیزنتروپیک به معنی فرایند آنتروپی ثابت تقریب زده می شود. در این قسمت به کمک معادله حالت GERG-2008 به بررسی افت دما در یک توربواکسپندر می پردازیم. بررسی موردنظر برای فشار ورودی ۶/۸ مگاپاسکال و فشار خروجی ۱/۷ مگاپاسکال و بازه دمایی بین ۶۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس صورت گرفته است. شکل زیر یک توربواکسپندر شبیه سازی شده به صورت خلاصه با شرایط ورودی و خروجی آن نشان می دهد:



شکل ۴-۴ توربو اکسپندر

$$P1=6.8 \text{ MPa}$$

$$P2=1.7 \text{ MPa}$$

$$T1=60 \text{ to } 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

۴-۱۲-۱- نحوه محاسبه دمای خروجی

مرحله اول: در این مرحله ابتدا با توجه به دما و فشار ورودی توربو اکسپندر و کسر مولی اجزا، مقدار آنترופی را با استفاده از روش اصلی معادله حالت GERG-2008 محاسبه می‌کنیم. سپس همان‌طور که در بالا به آن اشاره شد توربو اکسپندر یک فرایند آنترופی ثابت را طی می‌کند. پس بنابراین می‌توان آنترופی ورودی و خروجی این توربین را با یکدیگر یکسان در نظر گرفت.

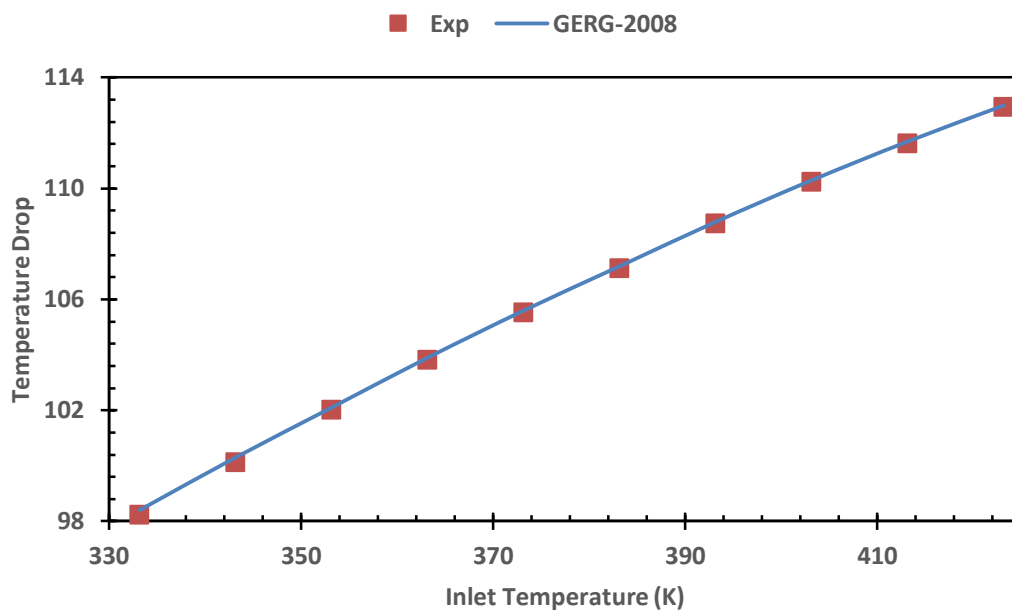
$$S1=\text{Entropy}(T1,P1,X(i))$$

$$S2=S1$$

مرحله دوم: برای محاسبه دمای خروجی توربو اکسپندر دو پارامتر فشار و آنترופی و کسر مولی اجزا را در اختیار داریم. پس با مشخص بودن این پارامترها و با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی بر اساس ورودی‌های فشار، آنترופی و ترکیب گاز، مقدار دمای خروجی توربو اکسپندر و در نتیجه افت دما به دست می‌آید.

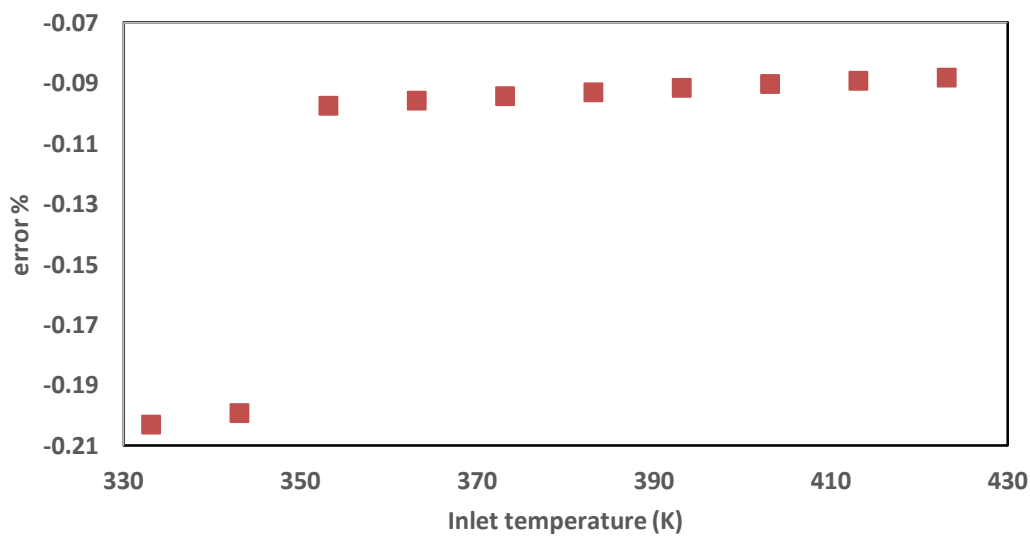
$$T2=\text{Temperature}(P2,S2,X(i))$$

شکل (۴-۴۶) نمودار مقدار افت دما را برحسب دمای ورودی نشان می‌دهد:



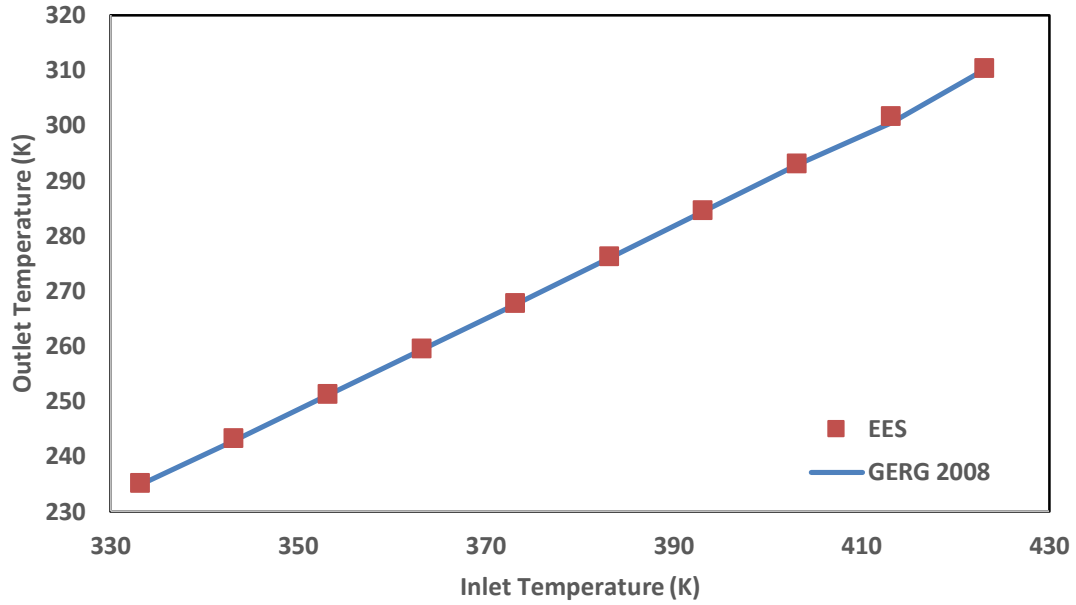
شکل ۴-۴۶ افت دما در فرآیند آنتروپی ثابت برای متان خالص برحسب دمای ورودی (داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۴۰])

شکل (۴-۴۷) نمودار درصد خطای محاسبه‌شده برای افت دما در توربوآکسپندر را نسبت به داده‌های تجربی نشان می‌دهد:



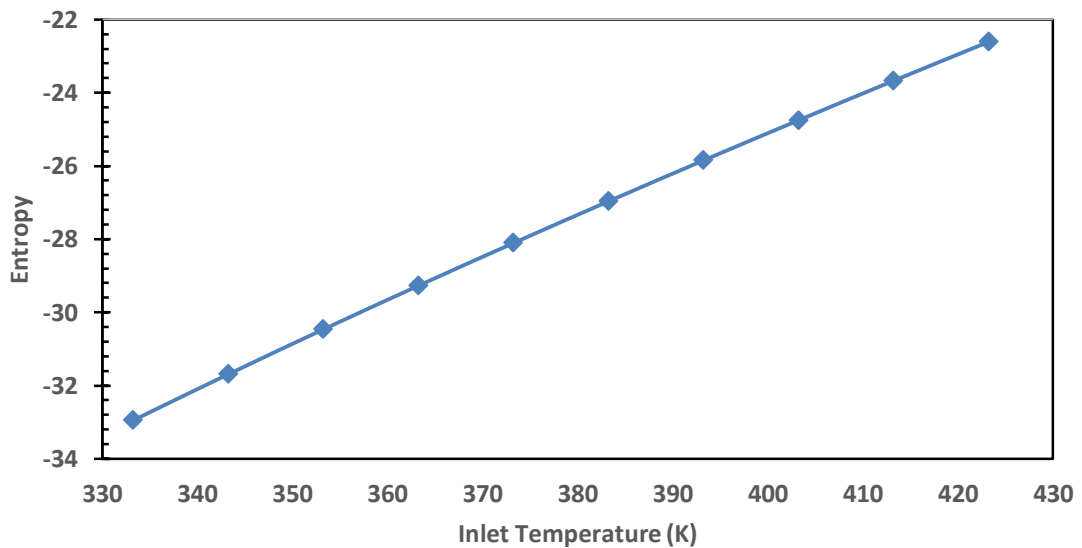
شکل ۴-۴۷ درصد خطای محاسبه‌شده برای افت دما برحسب دمای ورودی برای متان خالص (مرجع [۴۰]).

شکل (۴-۴۸) نمودار مقدار دمای خروجی را برحسب دمای ورودی برای توربوآکسپندر نشان می‌دهد:



شکل ۴-۴۸ نمودار مقدار دمای خروجی را برحسب دمای ورودی برای متان خالص (مرجع [۴۰]).

شکل (۴-۴۹) نمودار رفتار آنترופی برحسب دمای ورودی برای توربوآکسپندر را نشان می‌دهد:



شکل ۴-۴۹ نمودار رفتار آنترופی برحسب دمای ورودی برای متان خالص (مرجع [۴۰]).

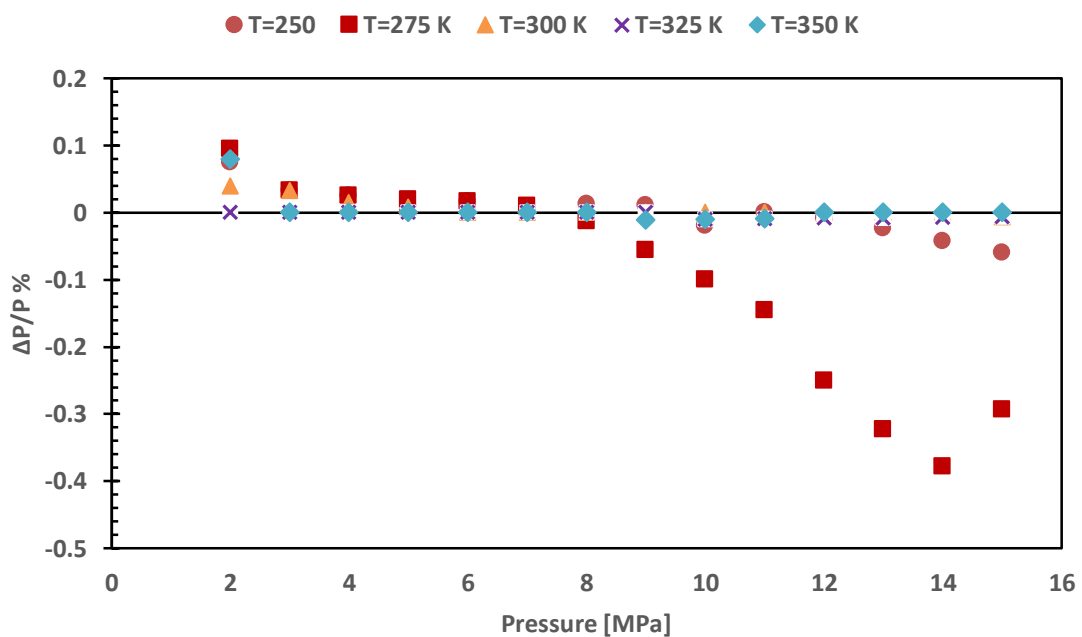
۴-۱۳- محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از ورودی‌های u و v

در این قسمت دو پارامتر انرژی داخلی و حجم مخصوص و کسر مولی اجزا را در اختیار داریم. پس با مشخص بودن این پارامترها و با استفاده از برنامه کامپیوتری تهیه شده جهت محاسبه خواص بر اساس ورودی‌های انرژی داخلی، حجم مخصوص و ترکیب گاز، خواص ترمودینامیکی قابل محاسبه می‌باشد. بدین منظور در برنامه کامپیوتری نوشته شده ابتدا u و v را به عنوان ورودی‌های مورد نظر وارد می‌کنیم. سپس طبق روش ارائه شده در این پژوهش، خواص ترمودینامیکی دیگر و همچنین دما و فشار مربوط به آن u و v را می‌توان محاسبه کرد. در این قسمت، برای بررسی میزان دقت روش ارائه شده، ابتدا توسط روش اصلی معادله حالت GERG-2008 خواص ترمودینامیکی از جمله u و v را با استفاده از ورودی‌های مستقل فشار و دما به دست می‌آوریم. سپس u (انرژی داخلی) و v (حجم مخصوص) محاسبه شده را به عنوان ورودی در برنامه مورد نظر وارد می‌کنیم و مقادیر P (فشار) و T (دما) به دست آمده از این روش را با فشار و دمای ورودی از روش اصلی مورد بررسی قرار داده و میزان خطا را محاسبه می‌کنیم.

۴-۱۳-۱- محاسبه فشار و دمای متان خالص با ورودی‌های u و v

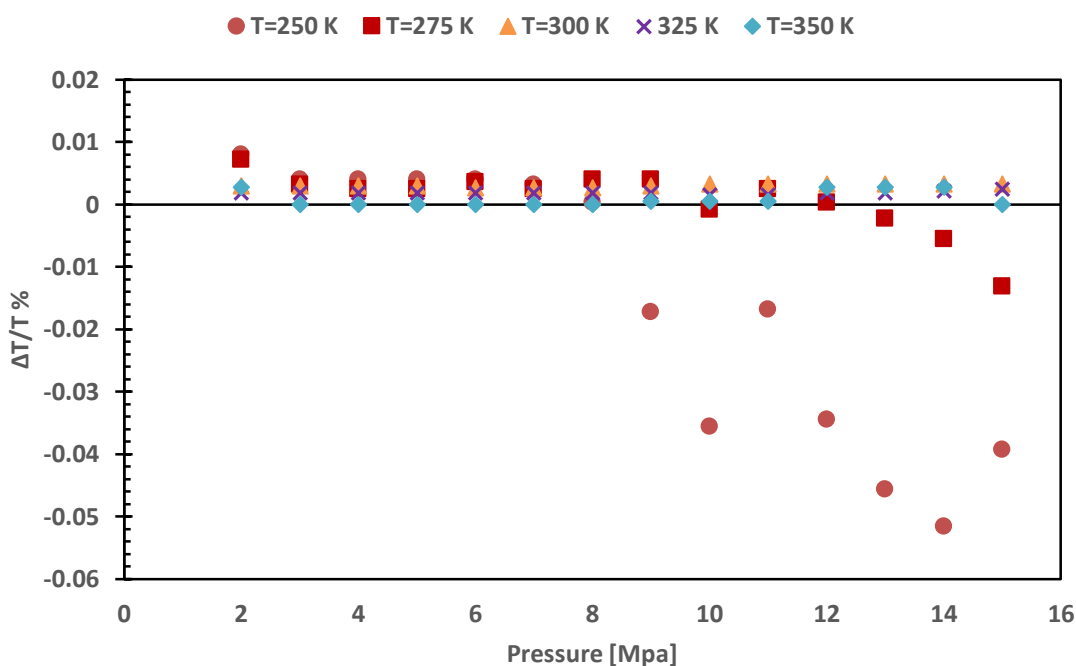
در این قسمت انرژی درونی و حجم مخصوص متان خالص برای فشارهای تا ۱۵ مگاپاسکال و حالت‌های دما ثابت ۲۵۰ کلوین، ۲۷۵ کلوین، ۳۰۰ کلوین، ۳۲۵ کلوین و ۳۵۰ کلوین با استفاده از روش اصلی معادله حالت GERG-2008 و ورودی‌های مستقل فشار و دما و ترکیب گاز محاسبه شده است. سپس از مقادیر به دست آمده برای u و v به عنوان ورودی‌های جدید در برنامه مورد نظر استفاده کرده و مقادیر فشار و دمای مربوط به این u و v را محاسبه کرده‌ایم. نمودار شکل (۴-۵۲) درصد خطای فشار به دست آمده از این روش را نسبت به فشار اولیه وارد شده از روش مستقیم را بر حسب فشار و حالت‌های دما ثابت نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار شکل (۴-۵۰)، بیشترین درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۳٪، برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۰/۲۳٪، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۰/۰۶۸٪، برای حالت دما ثابت ۳۲۵ کلوین برابر با ۰/۱۱٪ و برای حالت ۳۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۲۵٪ می‌باشند.



شکل ۴-۵۰ درصد خطای فشار به دست آمده نسبت به فشار اولیه وارد شده از روش مستقیم بر حسب فشار و حالت‌های دما ثابت

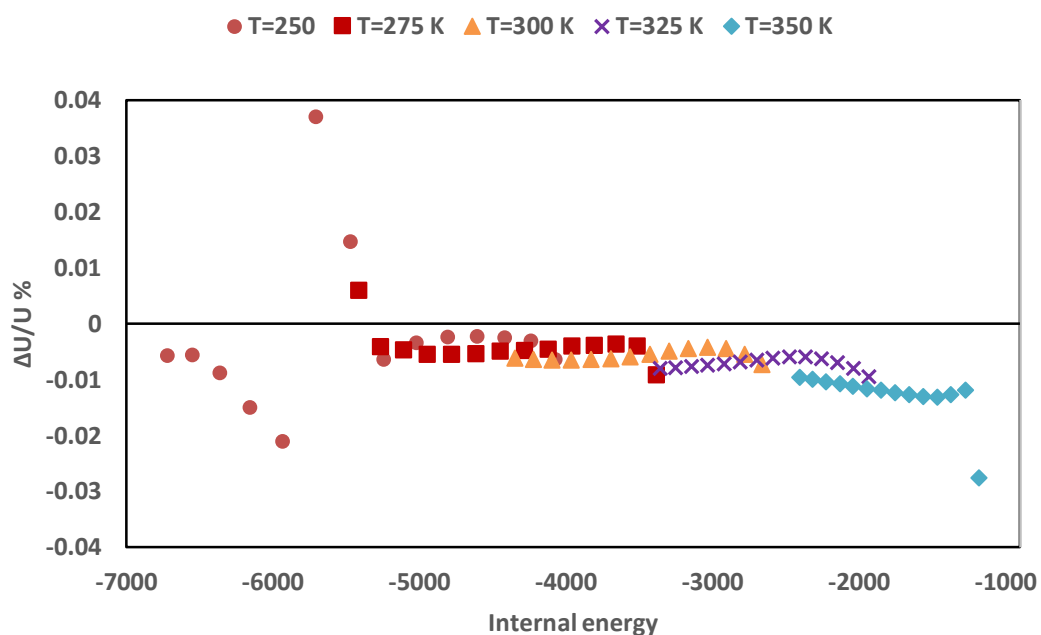
نمودار شکل (۴-۵۱) درصد خطای دمای به دست آمده نسبت به دمای اولیه وارد شده از روش مستقیم را بر حسب فشار و حالت‌های دما ثابت ذکر شده نشان می‌دهد. با توجه به نمودار (۴-۵۳)، بیشترین درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۳٪، برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۰/۰۲۳٪، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۰/۰۰۶۸٪، برای حالت دما ثابت ۳۲۵ کلوین برابر با ۰/۰۱۱٪ و برای حالت ۳۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۰۲۵٪ می‌باشند.



شکل ۴-۵۱ درصد خطای دمای به دست آمده نسبت به دمای اولیه وارد شده از روش مستقیم را بر حسب فشار و حالت های دما ثابت

نمودار شکل (۴-۵۲) درصد خطای انرژی داخلی به دست آمده از روش ارائه شده در این قسمت را نسبت به انرژی داخلی اولیه محاسبه شده از روش مستقیم با ورودی های مستقل دما و فشار، بر حسب انرژی داخلی اولیه و حالت های دما ثابت نشان می دهد.

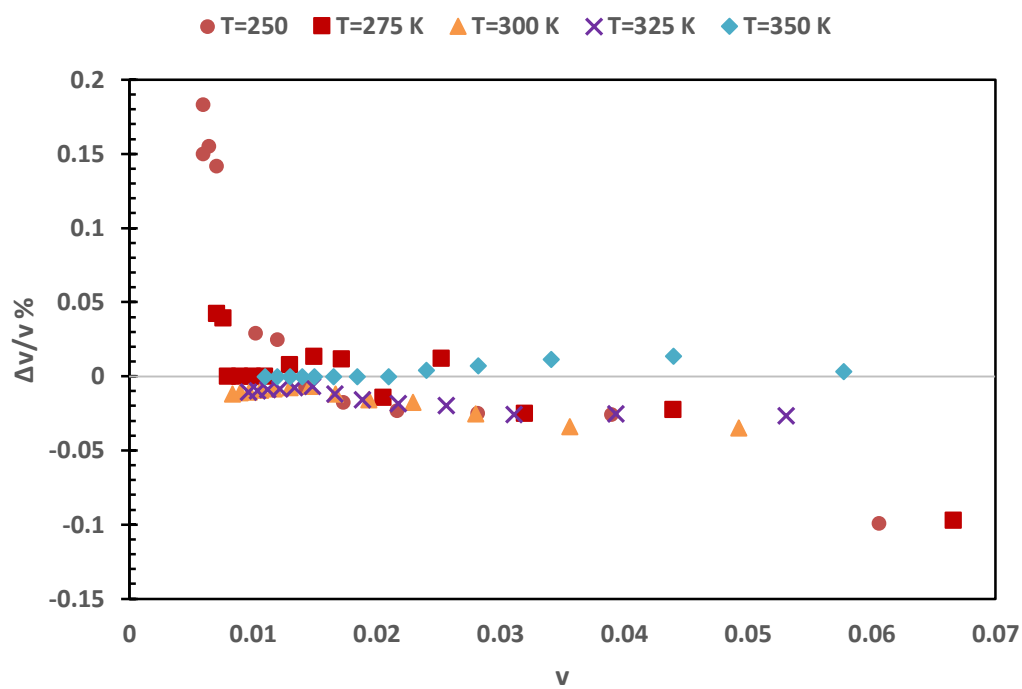
با توجه به نمودار شکل (۴-۵۲)، بیشترین درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۳٪، برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۰/۰۲۳٪، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۰/۰۰۶۸٪، برای حالت دما ثابت ۳۲۵ کلوین برابر با ۰/۰۱۱٪ و برای حالت ۳۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۰۲۵٪ می باشند.



شکل ۴-۵۲ درصد خطای انرژی داخلی به دست آمده بر حسب انرژی داخلی اولیه و حالت های دما ثابت

نمودار شکل (۴-۵۳) درصد خطای ۷ به دست آمده از روش صحیح و خطا ارائه شده در این قسمت را نسبت به ۷ (حجم مخصوص) اولیه محاسبه شده از روش مستقیم با ورودی های مستقل دما و فشار، بر حسب حجم مخصوص اولیه و حالت های دما ثابت نشان می دهد.

با توجه به نمودار (۴-۵۳)، بیشترین درصد خطا برای حالت دما ثابت ۲۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۳-، برای حالت دما ثابت ۲۷۵ کلوین برابر با ۰/۰۲۳-، برای حالت دما ثابت ۳۰۰ کلوین برابر با ۰/۰۰۶۸-، برای حالت دما ثابت ۳۲۵ کلوین برابر با ۰/۰۱۱- و برای حالت ۳۵۰ کلوین برابر با ۰/۰۲۵- می باشند.



شکل ۴-۵ درصد خطای V به دست آمده بر حسب حجم مخصوص اولیه و حالت های دما ثابت

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

پژوهش حاضر به طور کلی تحقیقی بود در راستای محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی بر اساس ورودی های مختلف که در فرایندهای متفاوتی نظیر شیرهای اختناق و توربین ها و کمپرسورها مورد استفاده قرار می گیرند. در این قسمت، با توجه به نتایج به دست آمده که به طور مفصل در فصل چهارم، مورد بررسی قرار گرفت، نتایجی را به عنوان نتیجه کار این پایان نامه ارائه خواهیم کرد.

۵-۲- نتیجه گیری

در این پایان نامه، خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با استفاده از یک معادله حالت معتبر در زمینه گاز طبیعی به نام معادله حالت GERG-2008، محاسبه شده است. معتبر سازی محاسبات نسبت به داده های آزمایشگاهی نشان دهنده دقت قابل قبول معادله حالت GERG-2008، برای محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی می باشند. علاوه بر این خواص ترمودینامیکی بر اساس ورودی های متفاوت (فشار، آنتالپی و ترکیب گاز)، (فشار، آنتروپی و ترکیب گاز) و (انرژی داخلی، حجم مخصوص و ترکیب گاز) نیز محاسبه شده است که در فرایندهایی مانند شیرهای فشارشکن و توربین ها که ورودی های ما فشار و آنتالپی یا فشار و آنتروپی می باشد، کاربرد دارد. همچنین نرم افزاری برای تعیین خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی، بر اساس ورودی های فوق نیز ارائه شده است که دقت بسیار بالایی در محاسبه خواص ترمودینامیکی دارد و مقدار افت دما در یک شیر فشارشکن و یک توربوآکسپندر شبیه سازی شده، توسط این برنامه کامپیوتری، مورد بررسی قرار گرفته است. در معتبر سازی محاسبات نسبت به داده های آزمایشگاهی موجود و محاسبه درصد خطا و درصد انحراف مطلق میانگین (AAD)، نتایج جالب توجهی به دست آمده که به شرح زیر می باشند:

۱- درصد انحراف مطلق میانگین (AAD) برای محاسبه چگالی و ضریب تراکم پذیری نسبت به داده های آزمایشگاهی کمتر از ۰/۵٪ می باشد؛ بنابراین معادله حالت GERG-2008 دقت بالایی برای محاسبه این دو خاصیت مهم، دارد.

۲- در محاسبه خواص ترمودینامیکی مانند ظرفیت‌های گرمایی در فشار و حجم ثابت و سرعت صوت گاز طبیعی، روش ارائه‌شده بر مبنای معادله حالت GERG-2008، دقت ۲٪ را برای محاسبات نشان می‌دهند؛ بنابراین برای محاسبه این خواص معادله حالت GERG-2008، از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

۳- در محاسبه ضریب ژول - تامسون، دقت معادله حالت GERG-2008، نزدیک به ۲/۵٪ می‌باشد. این عدد برای فشارهای تا ۳۰ مگاپاسکال به‌دست‌آمده است. در فشارهای پایین‌تر و در محدوده کاربرد مهندسی دقت محاسبات ضریب ژول - تامسون، به کمتر از ۱٪ نیز خواهند رسید. البته لازم به تذکر است که در محاسبه ضریب ژول - تامسون با استفاده از معادلات حالت درجه سه خطا در بهترین حالت برابر با ۵٪ گزارش شده است. این عدد نشان‌دهنده دقت بالای دقت معادله حالت GERG-2008 در محاسبه ضریب ژول - تامسون، نسبت به معادلات حالت درجه سه، می‌باشد.

۴- در محاسبه خواص مهم ترمودینامیکی گاز طبیعی مانند آنتالپی، آنروپی و انرژی داخلی، دقت محاسبات کمتر از ۵/۰٪ می‌باشند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این سه خاصیت را می‌توان با دقت قابل‌قبول با استفاده از معادله حالت GERG-2008، محاسبه نمود.

۵- با شبیه‌سازی بعضی از فرآیندهای مربوط به گاز طبیعی، این نتیجه به‌دست‌آمده است که: خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی علاوه بر دما و فشار، بسیار وابسته به ترکیب گاز طبیعی می‌باشند و با تغییر در ترکیب گاز طبیعی، خواص ترمودینامیکی با تغییر قابل‌توجهی مواجه خواهد شد. در مطالعات گذشته معمولاً گاز طبیعی به‌صورت ایده‌آل یا در صورت گاز واقعی از متان به‌عنوان نماینده گاز طبیعی، در شبیه‌سازی فرآیندها استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار طراحی شده و معادله حالت GERG-2008، می‌توان گاز طبیعی با هر ترکیب دلخواه را مورد بررسی قرار داده و در فرآیندها رفتار واقعی گاز طبیعی را مورد بررسی قرار دهیم. همچنین می‌توان خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی را با ورودی‌های متفاوت نیز محاسبه کرد.

۶- معادله حالت GERG-2008 در محاسبه خواص ترمودینامیکی مانند چگالی و سرعت صوت در بیوگازها که درصد متان بسیار پایین تر از حد معمول (حدود ۴۹٪) دارند، دقت بسیار بالایی دارد و این در حالی است که معادله حالت AGA8 برای ترکیبات گاز طبیعی با درصد متان پایین تر نتایج قابل قبولی به دست نمی‌دهد.

۷- در این پروژه با استفاده از ورودی‌های فشار و آنتالپی، مقدار افت دما در یک شیر اختناق شبیه‌سازی شده، محاسبه شده است. نتایج حاصله دقت ۲٪ را برای محاسبات نشان می‌دهند. این نشان می‌دهد که محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از معادله حالت GERG-2008 و با ورودی‌های فشار و آنتالپی دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد.

۸- در این پروژه با استفاده از ورودی‌های فشار و آنتروپی، مقدار افت دما در یک توربوآکسپندر شبیه‌سازی شده، محاسبه شده است. نتایج حاصله دقت ۱/۰٪ را برای محاسبات نشان می‌دهند. این نشان می‌دهد که محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از معادله حالت GERG-2008 و با ورودی‌های فشار و آنتروپی دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد.

۹- در پروژه حاضر، همچنین، خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی با استفاده از ورودی‌های انرژی داخلی و حجم مخصوص نیز محاسبه شده است. نتایج به دست آمده دقتی به اندازه ۵/۰٪ دارد که دقت بسیار بالایی برای محاسبه خواص ترمودینامیکی با استفاده از این روش می‌باشد.

۵-۳- پیشنهادات

با توجه به اینکه در یک مدت زمان محدود نمی‌توان هیچ مسئله‌ای را به طور کامل، تجزیه و تحلیل نمود، بنابراین پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده در این قسمت ارائه شده تا در صورت لزوم محققان بعدی با استفاده از آن بتوانند موضوع مورد بحث را از زوایای دیگری مورد بحث و بررسی قرار بدهند.

لذا پیشنهاداتی جهت ادامه روند این مطالعات به صورت زیر ارائه می شود:

۱- مقایسه کاملی بین معادله حالت AGA8 و معادله حالت GERG-2008 صورت پذیرد. بدین منظور که کدام معادله حالت دقت بالاتری در محاسبه خواص ترمودینامیکی داشته و می توان به عنوان یک معادله حالت معتبر از آن استفاده نمود.

۲- بررسی اینکه معادله حالت GERG-2008 در فاز مایع نیز دقت لازم را دارا می باشد یا خیر؟ با توجه به اهمیت گاز طبیعی مایع در مبنای فروش گاز و همچنین محاسبه خواص گاز طبیعی در حالت مایع، می توان از دقت بالای این معادله حالت در حالت مایع و فرآیندهای مایع سازی گاز طبیعی استفاده نمود.

۳- بررسی شرایط تعادلی دما و فشار و بررسی دقت معادله حالت GERG-2008 در شرایط تعادلی دما و فشار.

۴- استفاده از روش بسط داده شده در این پایان نامه برای شبیه سازی فرایندهای گاز طبیعی مانند پر و خالی شدن مخازن و همچنین شبیه سازی توربین ها و کمپرسورها

٦- منابع

- [1] J. G. Speight, F. A. Banks, and R. C. Bansal, "Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy," 2008.
- [2] "The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "IPCC Report 2017", Website available at: <https://www.ipcc.ch/>."
- [3] "National Iran Gas Company website available at: <http://www.NIGC.ir/>."
- [4] "BP Energy Outlook 2035 february 2016, available at: <https://www.biomasspower.gov.in/>."
- [5] "U.S Energy Information Administration, Monthly Energy Review, October 2018.."
- [6] "Biomasspower Statistical Review of World Energy June 2015.."
- [7] "executive, B.D.G.c., Energy Report, (2018), Website available at: <https://www.bp.com/>."
- [8] J. V. Sengers, R. Kayser, C. Peters, and H. White, Equations of state for fluids and fluid mixtures. Elsevier, 2000.
- [9] Peng, Ding-Yu, and Donald B. Robinson. "A new two-constant equation of state." *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals* 15.1 (1976): 59-64.
- [10] Redlich, Otto, and Joseph NS Kwong. "On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions." *Chemical reviews* 44.1 (1949): 233-244.
- [11] Soave, Giorgio. "Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state." *Chemical engineering science* 27.6 (1972): 1197-1203.
- [12] Valderrama, José O. "A generalized Patel-Teja equation of state for polar and nonpolar fluids and their mixtures." *Journal of chemical engineering of Japan* 23.1 (1990): 87-91.
- [13] Martinez, Santiago Aparicio, and Kenneth R. Hall. "Thermodynamic Properties of Light Synthetic Natural Gas Mixtures Using the RK– PR Cubic Equation of State." *Industrial & engineering chemistry research* 45.10 (2006): 3684-3692.
- [14] Justo-García, Daimler N., et al. "Modeling of three-phase vapor–liquid–liquid equilibria for a natural-gas system rich in nitrogen with the SRK and PC-SAFT EoS." *Fluid Phase Equilibria* 298.1 (2010): 92-96.
- [15] Burgess, Ward A., et al. "Prediction of fluid density at extreme conditions using the perturbed-chain SAFT equation correlated to high temperature, high pressure density data." *Fluid Phase Equilibria* 319 (2012): 55-66.

- [16] McCarty, R. D. "Extended corresponding states as a tool for the prediction of the thermodynamic properties of mixtures." *International Journal of Thermophysics* 7.4 (1986): 901-910.
- [17] Estela-Urbe, J. F., and J. P. M. Trusler. "Extended corresponding states equation of state for natural gas systems." *Fluid phase equilibria* 183 (2001): 21-29.
- [18] Estela-Urbe, J. F., A. De Mendoza, and J. P. M. Trusler. "Extended corresponding states model for fluids and fluid mixtures: II. Application to mixtures and natural gas systems." *Fluid phase equilibria* 216.1 (2004): 59-84.
- [19] Senol, Ilke. "Perturbed-Chain Statistical Association Fluid Theory (PC-SAFT) Parameters for Propane, Ethylene, and Hydrogen under Supercritical Conditions." *disp* 2 (2011): 1.
- [20] Wendland, Martin, Bahaa Saleh, and Johann Fischer. "Accurate thermodynamic properties from the BACKONE equation for the processing of natural gas." *Energy & fuels* 18.4 (2004): 938-951.
- [21] Nasrifar, Kh, and O. Bolland. "Prediction of thermodynamic properties of natural gas mixtures using 10 equations of state including a new cubic two-constant equation of state." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 51.3-4 (2006): 253-266.
- [22] Farzaneh-Gord, Mahmood, et al. "Computing thermal properties of natural gas by utilizing AGA8 equation of state." *International Journal of Chemical Engineering and Applications* 1.1 (2010): 20.
- [23] AGA8-DC92, E. "Compressibility and super compressibility for natural gas and other hydrocarbon gases." *Transmission Measurement Committee Report* 8.
- [24] Jaeschke, Manfred, et al. *High accuracy compressibility factor calculation for natural gases and similar mixtures by use of a truncated virial equation.* Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
- [25] Kunz, Oliver, and Wolfgang Wagner. "The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: an expansion of GERG-2004." *Journal of chemical & engineering data* 57.11 (2012): 3032-3091.
- [26] Hernández-Gómez, Roberto, et al. "Integration of biogas in the natural gas grid: Thermodynamic characterization of a biogas-like mixture." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 84 (2015): 60-66.
- [27] Hughes, Thomas J., et al. "High pressure multi-component vapor-liquid equilibrium data and model predictions for the LNG industry." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 113 (2017): 81-90.
- [28] Varzandeh, Farhad, Erling H. Stenby, and Wei Yan. "Comparison of GERG-2008 and simpler EoS models in calculation of phase equilibrium and physical properties of natural gas related systems." *Fluid Phase Equilibria* 434 (2017): 21-43.
- [29] Guerrero-Zárate, David, Alejandro Estrada-Baltazar, and Gustavo A. Iglesias-Silva. "Calculation of critical points for natural gas mixtures with the GERG-2008 equation of state." *Fluid Phase Equilibria* 437 (2017): 69-82.
- [30] A. Laughton and D. GL, "Use of the GERG-2008 Equation of State for Hydrocarbon Dew Point Calculation," in *Conference Program*, p. 31.

- [31] Hernández-Gómez, R., et al. "Characterization of a biomethane-like synthetic gas mixture through accurate density measurements from (240 to 350) K and pressures up to 14 MPa." *Fuel* 206 (2017): 420-428.
- [32] Pérez-Sanz, Fernando J., et al. "Speeds of sound in (0.95 N₂+ 0.05 CO and 0.9 N₂+ 0.1 CO) gas mixtures at T=(273 and 325) K and pressure up to 10 MPa." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 79 (2014): 224-229.
- [33] Lozano Martín, Daniel. "Speeds of sound in biogas mixture CH₄+ N₂+ CO₂+ CO from T=(273,325) and P=(1, 12) MPa measured with a spherical resonator." (2015).
- [34] Hernandez-Gomez, Roberto, et al. "Accurate experimental (p, ρ, T) data of natural gas mixtures for the assessment of reference equations of state when dealing with hydrogen-enriched natural gas." *International Journal of Hydrogen Energy* 43.49 (2018): 21983-21998.
- [35] Yuan, Zongming, et al. "Evaluation of prediction models for the physical parameters in natural gas liquefaction processes." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 27 (2015): 876-886.
- [36] Čapla, L., et al. "Isothermal pVT measurements on gas hydrocarbon mixtures using a vibrating-tube apparatus." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 34.5 (2002): 657-667.
- [37] Patil, Prashant, et al. "Accurate density measurements for a 91% methane natural gas-like mixture." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 39.8 (2007): 1157-1163.
- [38] McElroy, P. J., Rubin Battino, and M. K. Dowd. "Compression-factor measurements on methane, carbon dioxide, and (methane+ carbon dioxide) using a weighing method." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 21.12 (1989): 1287-1300.
- [39] Staby, Arne, and Joergen M. Mollerup. "Measurement of the volumetric properties of a nitrogen-methane-ethane mixture at 275, 310, and 345 K at pressures to 60 MPa." *Journal of Chemical and Engineering Data* 36.1 (1991): 89-91.
- [40] "National Institute of Standards and Technology (NIST).available at: <http://www.nist.gov>."
- [41] Mayrath, J. E., and J. W. Magee. "Measurements of molar heat capacity at constant volume: CV, m {xCH₄+(1- x) C₂H₆, T= 100 to 320 K, p≤ 35 MPa}." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 21.5 (1989): 499-513.
- [42] Ernst, G., et al. "Flow-calorimetric results for the massic heat capacity and the Joule–Thomson coefficient of CH₄, of (0.85 CH₄+ 0.15 C₂H₆), and of a mixture similar to natural gas." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 33.6 (2001): 601-613.
- [43] Barreau, A., P. Janneteau, and K. Gaillard. "Isobaric heat capacity of natural gases. Measurements and modelling." *Fluid phase equilibria* 119.1-2 (1996): 197-212.

- [44] Trusler, J. P. M., and M. P. Zarari. "Second and third acoustic virial coefficients of methane at temperatures between 125 K and 375 K." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 27.7 (1995): 771-778.
- [45] Ahmadi, Pezhman, Antonin Chapoy, and Bahman Tohidi. "Density, speed of sound and derived thermodynamic properties of a synthetic natural gas." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 40 (2017): 249-266.
- [46] Day, C., M. Stephan, and L. R. Oellrich. "A new flow calorimeter for the measurement of the isobaric enthalpy increment and the isenthalpic Joule–Thomson effect. Results for methane and (methane+ ethane)." *The Journal of Chemical Thermodynamics* 29.9 (1997): 949-971.

Abstract

Calculation of the thermodynamic properties of natural gas is very important in industry. Natural gas is a complex mixture of hydrocarbons and gaseous elements such as carbon dioxide and nitrogen. Therefore, the thermodynamic properties of natural gas depend on the thermodynamic properties of its constituent elements and change with the change in natural gas composition. Using thermodynamic equations of state is one of the least expensive and fastest methods in determining thermodynamic properties. Also, to determine many thermodynamic properties such as internal energy, enthalpy, and entropy that cannot be measured by laboratory methods, we have to use equations of state. One of the most commonly used equations of state is the GERG-2008 eos, which has been studied by many researchers. The GERG-2008 equation of state is highly accurate in determining the thermodynamic properties of natural gas and taking into account the properties of natural gas components in the combination, it provides an accurate model for the calculation of thermodynamic properties such as density, enthalpy, entropy, internal energy, speed of sound and other thermodynamic properties of natural gas. In the present study, based on the GERG-2008 equation of state, the thermodynamic properties of natural gas are calculated based on temperature and pressure inputs and natural gas composition. Then, for validation, the obtained results obtained have been compared with the laboratory data. Also, in other thermodynamic processes such as processes in turbines, compressors and choke valves, there are other thermodynamic properties such as entropy and enthalpy, and other thermodynamic properties must be calculated from these available properties. Therefore, in this study, after calculating the thermodynamic properties of natural gas based on inputs of temperature, pressure and gas composition thermodynamic properties are also calculated based on three input properties models: (enthalpy, pressure and gas composition), (entropy, pressure and gas composition) and (internal energy, The specific volume and gas composition) and then the temperature drop in a choke valve and a simulated turbine are investigated. Computational validation shows that the GERG-2008 equation of state has a accuracy of less than 2%, for calculating thermodynamic properties compared to experimental data, which is very good for engineering applications. Finally, after obtaining acceptable results, to calculate thermodynamic properties of natural gas, a software is presented based on GERG-2008 equation of state and four different inputs mentioned above.

Keywords:

Thermodynamic Properties – GERG-2008 equation of state – Thermodynamic relations
– Natural gas



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**determination the thermodynamic
properties of natural gas using each both
input properties and gas combination and
using GERG-2008 equation of state**

By:

Jalal Zanganeh

Supervisor(s):

Dr. Mahmoud Farzaneh Gord,

Dr. Ali Jabbari Moghaddam

July 2019