

تخمین خواص ترمودینامیکی گازهای سبک فرآیندی در صنعت نفت و گاز با استفاده از یک معادله حالت جدید و کاربردی

رسول محمدیخواه نجف آبادی^۱، علی جبرئیلی جلودار^{۲*}، حامد نادری^۱

۱. گروه پژوهش توسعه و کنترل فرایند، پژوهشکده توسعه فرایند و فناوری تجهیزات، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
۲. گروه پژوهش آزمایشگاه مرجع و نیمه صنعتی، پژوهشکده توسعه فرایند و فناوری تجهیزات، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
دریافت: ۹۲/۱۰/۱۱ پذیرش: ۹۳/۹/۱۲

چکیده

در این مطالعه معادلات حالت مختلف تجربی، تئوری و شبه تئوری برای سیالات انتخابی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند و صحت این معادلات جهت تخمین خواص ترمودینامیکی سیالات انتخابی در مقایسه با داده‌های تجربی مورد سنجش قرار گرفته‌است. همچنین یک معادله حالت جدید از معادله شبه تئوری محمدیخواه- ابوالقاسمی- محبی استخراج و معرفی شده است. این معادله حالت شبیه معادله حالت ویرال ۳ جمله ای بسیار ساده و کاربردی است و می‌توان روابط ترمودینامیکی مورد نظر را از آن به صورت تحلیلی استخراج نمود. نتایج نشان می‌دهند که می‌توان از معادله حالت جدید تا فشار ۳۰۰ بار با دقت بالا جهت استخراج خواص ترمودینامیکی گازهای سبک استفاده نمود. همچنین دقت معادله حالت جدید در نزدیکی نقطه بحرانی از دیگر مزیت‌های این معادله است. معادله پیشنهادی خواصی نظیر ضریب تراکم‌پذیری، آنتالپی، آنتروپی و ضریب فوگاسیته گازهای سبک را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌کند که از آن می‌توان در طراحی‌های عرصه نفت و گاز به راحتی استفاده کرد؛ زیرا یک رابطه تحلیلی ساده و چند جمله‌ای را برای بیان این خواص معرفی می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داده است که معادلات حالت مفروض دقت خوبی در پیش‌بینی آنتالپی و آنتروپی سیالات خالص در فشارهای اتمسفری و بالاتر دارند؛ بجز برای نرمال بوتان که مقدار خطا زیاد بوده است ولی این معادلات در نزدیکی نقطه بحرانی در فشارهای پایین و بالا دقت کافی را ندارند. همچنین نتایج این مطالعه توافق خوب داده‌های محاسباتی توسط این معادلات را جهت تخمین ضریب تراکم‌پذیری سیالات انتخابی با داده‌های تجربی نشان داده‌اند و استفاده از معادله حالت لی-کسلر را جهت تخمین ضریب تراکم‌پذیری سیالات خالص پیشنهاد می‌کند؛ ضمن این‌که ضرورت ارائه معادله حالت دقیق‌تر، جامع‌تر و ساده‌تری را بیان می‌کند که منجر به معرفی معادله جدید شده است. همچنین جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی آنتالپی و آنتروپی در فشارهای کم معادله حالت سوآ - ردلیچ - کوانگ پیشنهاد شده است؛ زیرا کم‌ترین خطا را از خود نشان داده است.

کلمات کلیدی: ضریب تراکم‌پذیری، معادلات حالت، آنتالپی، آنتروپی، صنعت نفت و گاز، خواص ترمودینامیکی

* jebreilia@ripi.ir

مقدمه

در گذشته تلاش‌های زیادی جهت تخمین خواص ترمودینامیکی گازهای سبک فرآیندی صورت گرفته است. این امر به علت ضرورت تخمین این خواص از دیدگاه مهندسی و ضرورت استفاده از آن‌ها در فرآیندهای صنعتی و به خصوص صنعت نفت و گاز می باشد. نتایج این تلاش‌ها در قالب معادلات حالت بیان شده‌اند. معادلات حالت به سه دسته معادله ویریال، معادلات حالت تئوری و معادلات حالت تجربی تقسیم بندی می‌شوند. معادله ویریال که از تئوری مولکولی به دست می آید، اگرچه پایه و اساس تئوری بسیار محکمی دارد اما رنج کاربردی محدودی دارد و این محدودیت به خاطر نامعین بودن ضرائب ویریال مرتبه دوم به بالا است. معادلات حالت تئوری [۱ و ۲] که معادلات درجه سوم یا چهارم از حجم مولی هستند، با مشخص بودن دما و فشار، حجم مولی را می دهند. این معادلات هم برای مایعات و هم گازها در محدوده خاصی از دما و فشار قابل استفاده هستند. معادلات حالت تجربی در رنج وسیع تری در مقایسه با معادلات تئوری قابل استفاده هستند اما کاربرد آن‌ها به علت وجود ثوابت زیاد و شکل ریاضی پیچیده‌تر، مشکل است و نیازمند محاسبات اضافی یا در دست داشتن اطلاعات اضافی می باشد. این معادلات اغلب شامل فرم‌های عمومی یا اصلاح شده معادلات حالت بندیکت-وب-رابین^۱ [۳ و ۴] یا مدل‌های واگنر^۲ [۴، ۵ و ۶] هستند. معادلات حالت غیرتئوری از فرم‌هایی نظیر مدل آشفستگی^۳ [۷] شامل چند جمله‌ای‌های با درجه بالاتر از دانسیته مولی به همراه روابط تئوری شیمیایی [۸] مشتق شده‌اند. این روابط اغلب برای مخلوط‌ها یا برای سیستم‌های تجمع یافته استفاده می شوند. از جمله دیگر معادلات حالت می‌توان به معادلات واندروالس^۴ [۹]، پنگ - رابینسون^۵ [۹]، سوآ-ردلیچ-کوانگ^۶ [۹]، محمدیخواه - محبی-ابوالقاسمی^۷ [۱۰ و ۱۱]، لی-کسلر^۸ [۹]، معادله دو جمله ای ویریال^۹ [۹] و کج-تریبل^{۱۰} [۱۲] اشاره کرد. مثلاً معادله محمدیخواه - محبی-ابوالقاسمی یک معادله پیچیده شبه تئوری است که برای سیالات خالص غیرقطبی و بر مبنای معادله ویریال پیشنهاد شده است. منشا این معادله تئوری همان معادله تئوری ویریال است که به نحو شایسته‌ای اصلاح شده است. در واقع بیان معادله ویریال برحسب فاکتور ام شکل معادله ویریال را ساده تر کرده است. تئوری فاکتور ام به صراحت می گوید که یک خاصیت ترمودینامیکی شدتی ام وجود دارد که اگر معادله حالت برحسب آن بیان شود، مستقل از نوع ماده و در واقع یک معادله تعمیم یافته خواهد شد [۱۷]. به‌علاوه تعریف این خاصیت شدتی شکل ریاضی و تحلیلی معادله حالت را بسیار ساده تر و انتگرال پذیرتر می‌کند. برای اشتقاق این معادله یک فرض عقلانی به کار گرفته شده است به این نحو که چون ضرایب ویریال

¹BWR

²Wagner models

³Perturbation models

⁴Van der waals

⁵Peng- Rabinson

⁶SRK

⁷MMA

⁸Lee- Kesler

⁹Two term Virial

¹⁰Kedge- Trebble

مرتبه سوم و بالاتر بسیار کوچک و ناشناخته هستند، پس می‌توان فقط ترم‌های حاوی ضریب دوم ویریا را در نظر گرفت و این ترم‌ها را از ضرایب مرتبه بالاتر استخراج کرده و به معادله دو جمله‌ای ویریا افزود. از آنجا که این معادله از معادله حالت ویریا الهام گرفته شده است، می‌توان همانند معادله ویریا در فشارهای کم تا متوسط از ترم درجه سوم به بعد آن صرف‌نظر نمود. لازم به ذکر است که مزیت معادله جدید ارائه شده در این مطالعه که از معادله محمدیخواه - محبی - ابوالقاسمی اشتقاق یافته است، این است که تمامی ضرایب آن مشخص و قابل محاسبه است. در صورتی که در معادله ویریا سه جمله‌ای این ضرایب نامشخص و به‌ندرت برای گازهای مختلف یافت می‌شوند؛ لذا معادله جدید با ضرایب عمومی و یکسان برای تمامی گازها و داشتن سادگی ریاضیاتی می‌تواند بسیار مهم و قابل استفاده در صنعت نفت و گاز باشد. به‌دست آوردن خواص ترمودینامیکی یک گاز واقعی همواره از چالش‌های موجود در صنعت نفت و گاز بوده است و حتی نرم افزارهای موجود در این زمینه نیز با این چالش‌ها روبه‌رو هستند. در اغلب طراحی‌ها برای یک فرآیند جدید، مهندسین طراح می‌بایست حتماً خواص ترمودینامیکی و به‌خصوص ضریب تراکم‌پذیری گازهای درگیر در فرآیند را به‌درستی تخمین بزنند. یک تخمین نادرست از این ضریب می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری مثل آتش‌سوزی، انفجار بر اثر فشار بالا و ... را به‌دنبال داشته باشد. پس ارائه یک رابطه ترمودینامیکی ساده، تحلیلی و کاربردی جهت محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گازها در صنعت نفت و گاز ضروری به‌نظر می‌رسد. لازم به ذکر است که کلیه خواص ترمودینامیکی مورد نیاز در طراحی‌ها را می‌توان با در دست داشتن رابطه ضریب تراکم‌پذیری به‌دست آورد. خواصی مانند حجم مخصوص، فوگاسیته، آنتالپی، آنتروپی گازها توسط رابطه ترمودینامیکی مستقیماً به ضریب تراکم‌پذیری مربوط می‌شوند.

در این مطالعه هدف اصلی ساده‌سازی یک معادله حالت پیچیده و بسیار دقیق با الگو گرفتن از ساده‌سازی معادله ویریا می‌باشد که در پایان منجر به یک معادله بسیار ساده، تحلیلی و نسبتاً دقیق و کاربردی در حیطه طراحی فرآیندهای نفت و گاز می‌شود. اکثر گازهای درگیر در فرآیندهای متداول نفت و گاز مانند متان، نرمال بوتان، اتان، اکسیژن، مونواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، هوا و بخار آب در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین سه نمونه از گازهای نجیب یا بی‌اثر نیز جهت سنجش دقت معادله جدید انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

تئوری

معادله حالت ویریا که پایه و اساس علمی بسیار قوی دارد، مهم‌ترین معادله حالت محسوب می‌شود. بسط حجم صریح آن به معادله ویریا لیدن - فراست [۱۳] موسوم است، به‌صورت یک سری توانی برحسب $1/v$ می‌باشد:

$$Z = 1 + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^3} + \dots \quad (1)$$

اگر این معادله را به‌شکل فرم فشار صریح تبدیل کنیم، معادله حالت برلین [۱۳] به‌دست می‌آید:

$$Z = \frac{Pv}{RT} = 1 + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots \quad (2)$$

که در معادلات بالا D, D', C, C', B, B' و ... ضرایب ویریال و برای یک ماده خاص فقط تابعی از دما هستند. معادله لیدن دقیق‌تر از معادله برلین است ولی استفاده از معادله برلین راحت‌تر است به‌عنوان مثال برای درجه حرارت‌های بالا و گاز لئونارد-جونز، متان و دی‌اکسیدکربن این مطلب به اثبات رسیده است [۱۴]. اگر معادله برلین تا ترم دوم قطع شود، معادله دو جمله‌ای ویریال فشار صریح به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$Z = 1 + B'P = 1 + \frac{BP}{RT} \quad (۳)$$

B ضریب دوم ویریال و بیانگر نیروی بین دو ملکولی است. روابط متعددی برای محاسبه B وجود دارد. پیتز و کورل رابطه زیر را پیشنهاد کردند [۱۵]:

$$\frac{BP_c}{RT_c} = f^0(T_r) + \omega f^1(T_r) \quad (۴)$$

که ω ضریب بی مرکزی و تابع f^0 ضریب دوم ویریال نقصانی را برای سیالات ساده ($\omega = 0$) می‌دهد و f^1 تابعی است که اگر در ω ضرب شود، اثر بی مرکزیت ملکولی را در ضریب دوم ویریال لحاظ می‌کند. پیتز، کورل و سونوپولوس [۱۶] توابع f^0 و f^1 را برای سیالات غیر قطبی با رگراسیون بر روی داده‌های تجربی به صورت زیر بدست آوردند:

$$f^0(T_r) = 0.1445 - \frac{0.330}{T_r} - \frac{0.1385}{T_r^2} - \frac{0.0121}{T_r^3} - \frac{0.000607}{T_r^8} \quad (۵)$$

$$f^1(T_r) = 0.0637 + \frac{0.331}{T_r^2} - \frac{0.423}{T_r^3} - \frac{0.008}{T_r^8} \quad (۶)$$

از معادله دو جمله‌ای ویریال تا فشارهای متوسط (حدود ۲۰ بار) می‌توان برای تخمین‌های خواص ترمودینامیکی سیالات استفاده کرد. به‌طور کلی اغلب معادلات حالت متداول را می‌توان در فرم فشار صریح همراه با دو پارامتر خاص نشان داد. این فرم، یک معادله درجه سوم برای حجم محسوب می‌شود و به‌صورت زیر است:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2+cbv+db^2} \quad (۷)$$

ضرایب a و b بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a = \frac{a_0 R^2 T_c^2}{P_c} \quad b = \frac{b_0 R T_c}{P_c} \quad (۸)$$

c و d بیانگر شکل تابعی معادله حالت بر طبق جدول زیر می‌باشند.

c	d	b_0	a_0	معادله حالت
0	0	0	0	گاز ایده آل
0	0	1/8	27/64	واندروالس
0	0	0.08664	$0.42748Tr^{0.5}$	ردلیچ-کوانگ
0	0	0.08664	$0.42748[1+m(1-Tr^{0.5})]^2$	سوآ-ردلیچ-کوانگ
2	-1	0.0778	$0.42724[1+m(1-Tr^{0.5})]^2$	پنگ-رابینسون

پارامتر m برای معادلات حالت سوآ-ردلیچ-کوانگ و پنگ-رابینسون به‌ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} m &= 0.48 + 1.57\omega - 0.176\omega^2 \\ m &= 0.37464 + 1.5422\omega - 0.269926\omega^2 \end{aligned} \quad (9)$$

همچنین معادله حالت لی-کسلر به صورت زیر می باشد.

$$Z = \frac{P_r v'_r}{T_r} = 1 + \frac{B}{v'_r} + \frac{C}{v_r'^2} + \frac{D}{v_r'^5} + \frac{C_4}{T_r^3 v_r'^2} \left(B + \frac{-\gamma}{v_r'^2} \right) \exp\left(\frac{-\gamma}{v_r'^2}\right) \quad (10)$$

ضرائب B, C و D بصورت زیر تعریف می شوند.

$$\left\{ \begin{aligned} B &= b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^3} \\ C &= c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3} \\ D &= d_1 + \frac{d_2}{T_r} \\ v' &= \frac{v}{v_c R T_c / P_c} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

این معادله دارای ۱۲ ثابت خاص است که برای هر سیال باید مقادیر این ثوابت مشخص باشد. شکل ریاضی پیچیده معادلات بالا و وجود ثوابت متعدد آنها، باعث کاربرد محدود آنها شده است. از جمله محدودیت‌های این معادلات عدم وجود رابطه تحلیلی ساده برای محاسبه دیگر خواص ترمودینامیکی نظیر آنتالپی، آنتروپی و فوگاسیته است. در واقع فرایند انتگرال‌گیری و مشتق‌گیری از این معادلات پیچیده و بعضاً غیرممکن است. معادله ساده‌ای که استفاده از آن راحت‌تر می باشد، معادله شبه تئوری محبی-محمدیخواه-ابوالقاسمی (MMA) است که بر پایه معادله ویریال به‌دست آمده است و به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Z = 1 + aM + bM^2 + cM^3 \quad (12)$$

که برای نقاط بحرانی پیشنهاد شده‌است که مقدار به‌دست آمده از رابطه فوق تقسیم بر ۲ گردد. ضرائب معادلات فوق نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\left\{ \begin{aligned} a &= 1.65 \\ b &= 0.9 T_r^{5.3} \\ c &= 0.8 \frac{T_r^7}{P_r} \\ M &= \left(\frac{BP_c}{RT_c} \right) \frac{P_r}{T_r} = \frac{BP}{RT} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

این معادله برای رنج بسیار وسیعی از دما برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری سیالات خالص پیشنهاد شده است و در ناحیه فوق بحرانی توافق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارد. فاکتور M که اولین دفعه توسط محمدیخواه و همکارانش معرفی شده است، یک خاصیت ترمودینامیکی شدتی مهم است که نقش بسیار ساده‌کننده‌ای را در معادلات تحلیلی ترمودینامیکی ایفا می‌کند و مهم‌تر از آن معنای فیزیکی مختص به

خود را نیز به همراه دارد [۱۷]. معادله ۱۲ بسیار ساده و انتگرال پذیر و مشتق پذیر می باشد و لذا می توان خواص ترمودینامیکی مهم را به صورت تحلیلی و ریاضیاتی از آن استخراج نمود.

روابط آنتالپی و آنترپی باقیمانده را می توان برای هر یک از معادلات حالت توسط روابط زیر محاسبه کرد [۱۸]:

$$H^R/RT_c = -T_r^2 \int_0^{P_r} \left(\frac{\partial Z}{\partial T_r} \right)_{P_r} \frac{dP_r}{P_r} \quad (14)$$

$$S^R/R = -T_r^2 \int_0^{P_r} \left(\frac{\partial Z}{\partial T_r} \right)_{P_r} \frac{dP_r}{P_r} - \int_0^{P_r} (Z-1) \frac{dP_r}{P_r} \quad (15)$$

از تعریف خواص باقیمانده داریم:

$$Q^R = Q - Q^{ig} \quad (16)$$

که Q یک خاصیت شدتی ترمودینامیکی و Q^{ig} همان خاصیت در شرایط ایده آل است. بنابراین با جمع دو خاصیت ترمودینامیکی باقیمانده با همان خاصیت در شرایط گاز ایده آل، مقدار واقعی آن خاصیت ترمودینامیکی به دست می آید [۱۸].

$$H = H^R - H^{ig} \quad (17)$$

$$S = S^R - S^{ig}$$

آنتالپی و آنترپی گاز ایده آل نیز توسط روابط زیر محاسبه می شوند:

$$H^{ig} - H_{ref}^{ig} = \Delta H^{ig} = \int_{T_{ref}}^T c_p^{ig} dT \quad (18)$$

$$S^{ig} - S_{ref}^{ig} = \Delta S^{ig} = \int_{T_{ref}}^T c_p^{ig} \frac{dT}{T} R \ln \frac{P}{P_{ref}} \quad (19)$$

واضح است که با فرض یک دما و فشار مرجع منطبق بر دما و فشار یکی از داده های تجربی، مقادیر S^{ig} و H^{ig} و در نتیجه آنتالپی و آنترپی واقعی قابل محاسبه می باشند. همان طور که از رابطه ۱۲ مشخص است، رابطه ضرایب تراکم پذیری ارائه شده بسیار ساده است و این سادگی امکان انجام عملیات ریاضی تحلیلی روی آن را امکان پذیر می نماید. بنابراین می توان روابطی تحلیلی را برای ضرایب فوگاسیته، آنتالپی و آنترپی باقیمانده از رابطه مذکور به دست آورد. این ویژگی مختص به معادلات ساده است و دیگر معادلات ارائه شده در این تحقیق (بجز معادله دوجمله ای ویرال) چنین مزیتی ندارند. همان طور که می دانیم رابطه ضریب فوگاسیته به صورت زیر تعریف شده است [۱۸]:

$$\ln \phi = \int_0^P \frac{(Z-1)}{P} dP \quad (20)$$

پس رابطه ضریب فوگاسیته از معادله ۱۲ و به کمک رابطه ۱۳ به صورت زیر در می آید:

$$P = \frac{MRT}{B} \rightarrow dP = \frac{RT}{P} dM \quad (21)$$

$$\ln \phi = \int_0^M \frac{(Z-1)}{M} dM \quad (22)$$

$$\ln \phi = \int_0^M \frac{(aM + bM^2 + cM^3)}{M} dM = aM + \frac{b}{2}M^2 + \frac{c}{3}M^3 \quad (23)$$

همان طور که مشاهده می شود فاکتور ام در روابط به سادگی با فشار جایگزین می شود بدون این که شکل کلی روابط تغییر کند. این رابطه ساده را می توان برای به دست آوردن ضریب فوگاسیته یک ماده خالص به راحتی به کار برد حال آن که انتگرال گیری از معادلات حالتی چون پنگ-رابینسون، لی کسلر، سوآ-ردلیچ-کوانگ و ... به صورت تحلیلی بسیار مشکل و در بعضی اوقات امکان پذیر نمی باشد. با پیدا کردن رابطه تحلیلی فوگاسیته می توان به راحتی حلالیت یک جزء گازی در محلول را به صورت تحلیلی محاسبه نمود [۱۹]. همچنین برای به دست آوردن رابطه تحلیلی برای آنتالپی باقیمانده از رابطه ۱۲، ۱۳ و ۱۴ استفاده می کنیم:

$$P_r = \frac{MRT}{P_c B} \rightarrow dP_r = \frac{RT}{P_c B} dM \quad (24)$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T_r}\right)_{P_r} = -\frac{aM}{T_r} + \left(4.77T_r^{4.3} - \frac{2b}{T_r}\right)M^2 + \left(\frac{5.6T_r^6}{P_r} + \frac{3c}{T_r}\right)M^3 \quad (25)$$

$$\frac{H^R}{RT_c} = -T_r^2 \int_0^M \left(\frac{\partial Z}{\partial T_r}\right)_{P_r} \frac{dM}{M} = -\frac{aM}{T_r} + \left(4.77T_r^{4.3} - \frac{2b}{T_r}\right)\frac{M^2}{2} + \left(\frac{5.6T_r^6}{P_r} - \frac{3c}{T_r}\right)\frac{M^3}{3} \quad (26)$$

برای به دست آوردن آنتروپی باقیمانده نیز مشابه موارد بالا و با استفاده از رابطه ۱۲، ۱۳ و ۱۵ داریم؛

$$\frac{S^R}{R} = -\left(\frac{1}{T_r} - 1\right)aM + \left(4.77T_r^{4.3} - b\left(\frac{2}{T_r} + 1\right)\right)\frac{M^2}{2} + \left(\frac{5.6T_r^6}{P_r} - c\left(\frac{3}{T_r} + 1\right)\right)\frac{M^3}{3} \quad (27)$$

از روابط ۲۳، ۲۶ و ۲۷ واضح است که به راحتی و به صورت تحلیلی می توان خواص ترمودینامیکی مختلف را از معادله ۱۲ به دست آورد. این مزیت بارزترین وجه تمایز معادله حالت ارائه شده با دیگر معادلات حالت است.

نتایج و بحث

هدف اصلی در این تحقیق محاسبه خواص ترمودینامیکی سیالات خالص با استفاده از روابط فوق الذکر می باشد. مثلاً ضریب تراکم پذیری از روابط ۳، ۷، ۱۰ و ۱۲ و آنتالپی از روابط ۳، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۷ و ۱۸ و آنتروپی از روابط ۳، ۷، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۷ و ۱۹ محاسبه شده اند. برای این منظور ابتدا یک معادله حالت در نظر گرفته شده است (مثلاً ویرال دو جمله ای) سپس ضریب تراکم پذیری برای سیالاتی نظیر آرگون، دی اکسید کربن، کریپتون، متان، نیتروژن، اکسیژن، گزنون و مونواکسید کربن در دماها و فشارهای مختلف توسط معادلات حالت محاسبه و با داده های تجربی [۱۷] مقایسه شده اند. برای معادلات سوآ-ردلیچ-کوانگ و پنگ-رابینسون از فرم فشار صریح آن ها برای ضریب تراکم پذیری استفاده شده است به طوری که توسط یک برنامه کامپیوتری و با روش حدس و خطا مقادیر حجم مولی پیدا شده و در ادامه ضریب تراکم پذیری بر طبق رابطه زیر محاسبه شده است.

$$Z = \frac{Pv}{RT} \quad (28)$$

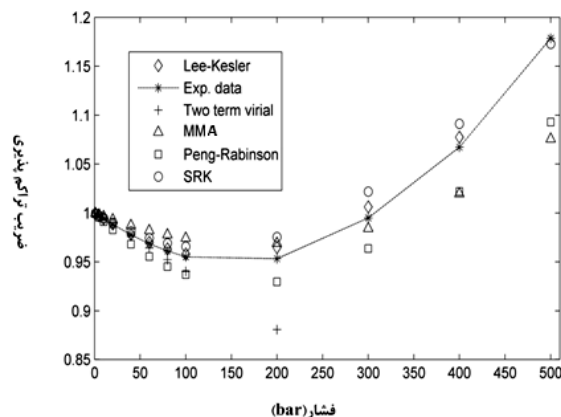
همچنین ضریب تراکم‌پذیری معادله جدید نیز بر اساس رابطه ۱۲ محاسبه شده است. این نتایج در شکل‌های ۱ تا ۸ نشان داده شده‌اند. توافق نسبتاً خوبی بین ضریب تراکم‌پذیری محاسبه‌ای و داده‌های تجربی در این شکل‌ها مشاهده می‌شود بجز برای معادله دو جمله‌ای ویرال که فقط تا فشار ۲۰ بار توافق خوبی نشان می‌دهد. درصد خطای نسبی مطلق متوسط^۱ (%AARD) برای هر سیال و هر معادله حالت توسط رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\%AARD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \left(\frac{Q_{exp} - Q_{calc}}{Q_{exp}} \right) \right| \times 100 \quad (29)$$

که در آن N تعداد داده‌های تجربی (۱۲ عدد) و Q_{exp} عبارتست از خاصیت ترمودینامیکی تجربی و Q_{calc} همان خاصیت ترمودینامیکی است که توسط معادلات حالت مختلف محاسبه شده است. در جدول ۱ مقادیر %AARD محاسبه‌ای برای سیالات مورد بررسی و معادلات حالت مختلف آورده شده است. این مقادیر خطا نشان می‌دهند که معادله حالت لی-کسلا نسبت به دیگر معادلات حالت جهت تخمین ضریب تراکم‌پذیری، دقیق‌تر است. همچنین نشان می‌دهد که برای تخمین ضریب تراکم‌پذیری گازهای قطبی نظیر دی‌اکسیدکربن و مونوکسیدکربن، معادله پنگ - رابینسون دقت بیشتری دارد.

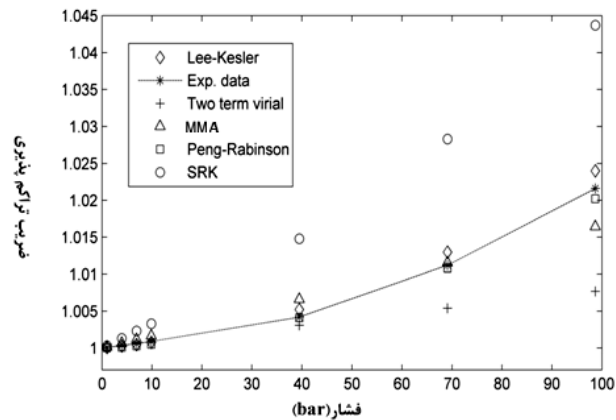
در ادامه مقادیر ضریب تراکم‌پذیری بحرانی برای سیالات فوق توسط معادلات حالت مذکور محاسبه و نتایج در جدول ۲ به‌همراه مقادیر درصد خطای نسبی آورده شده‌اند. درصد خطای نسبی مطلق (%ARD) از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\%ARD = \frac{|Z_{c,exp} - Z_{c,calc}|}{Z_{c,exp}} \times 100 \quad (30)$$

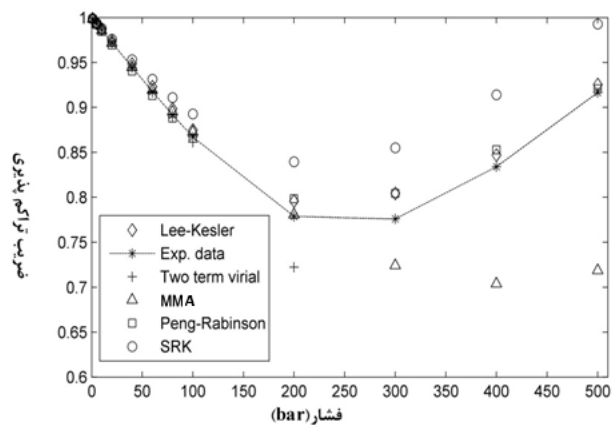


شکل ۱. ضریب تراکم‌پذیری آرگون در دمای ۳۰۰ K بر حسب فشار

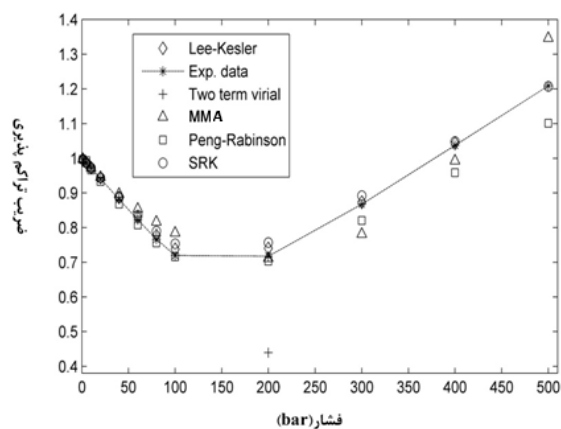
^۱Absolute average relative deviation



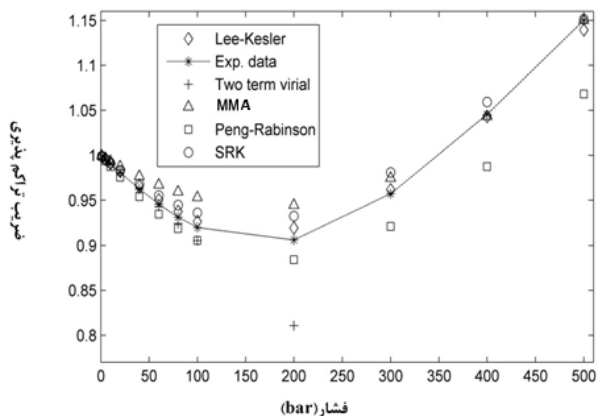
شکل ۲. ضریب تراکم پذیری مونو اکسید کربن در دمای ۳۶۰K بر حسب فشار



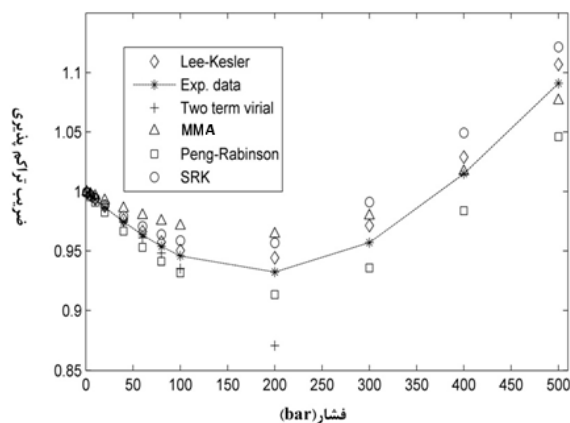
شکل ۳. ضریب تراکم پذیری دی اکسید کربن در دمای ۴۲۰K بر حسب فشار



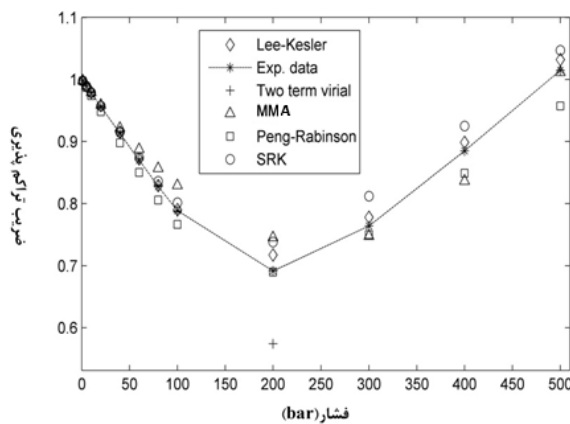
شکل ۴. ضریب تراکم پذیری متان در دمای ۲۶۰K بر حسب فشار



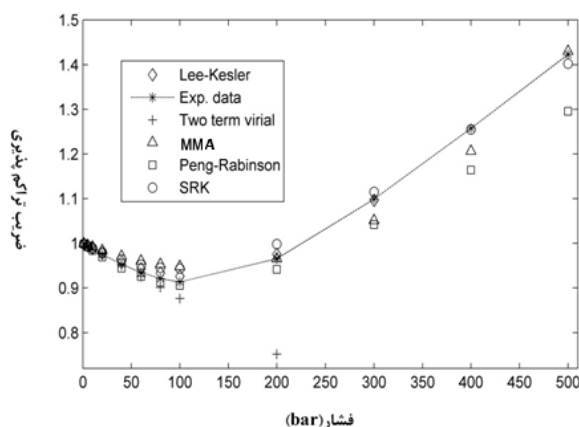
شکل ۵. ضریب تراکم پذیری اکسیژن در دمای ۲۷۵K بر حسب فشار



شکل ۶. ضریب تراکم پذیری کریپتون در دمای ۴۰۰K بر حسب فشار



شکل ۷. ضریب تراکم پذیری گزنون در دمای ۴۰۰K بر حسب فشار



شکل ۸. ضریب تراکم پذیری نیتروژن در دمای ۲۳۰K بر حسب فشار

جدول ۲ صحت این موضوع را که معادلات تجربی در نزدیکی نقطه بحرانی جواب خوبی را ارائه نمی‌دهند، تایید می‌کند. ضریب تراکم‌پذیری بحرانی محاسبه شده از معادله ارائه شده توافق بسیار خوبی با مقادیر تجربی دارد که دلیل آن شبه تئوری بودن این معادله است.

همان‌طوری که جدول ۱ نشان داده است به‌طور کلی خطای اغلب معادلات حالت با افزایش قطبیت گاز مورد نظر و کاهش دما افزایش می‌یابد که به‌دلیل دور شدن از شرایط گاز ایده‌آل است. برخلاف نظر عموم این جدول بیان می‌کند که خطای معادله لی-کسلا و سوا-ردلیچ-کوانگ از معادله پنگ-رابینسون کم‌تر است و استفاده از آن‌ها در صنعت نفت و گاز ارجح می‌باشد. شکل‌های ۱ تا ۸ نشان می‌دهند که از معادله حالت پیشنهادی تا فشار حداقل ۳۰۰ بار با خطای کم‌تری نسبت به دیگر معادلات حالت می‌توان استفاده نمود و خواص ترمودینامیکی را از آن استخراج نمود. در فشارهای بالاتر خطای معادلات تقریباً به یک اندازه است و می‌توان از تمامی آن‌ها بجز معادله دو جمله ای ویرال استفاده نمود اما به‌جهت ساده بودن باز هم استفاده از معادله پیشنهادی ارجح است. در واقع تئوری فاکتور ام‌بازه دقت معادله دو جمله ای ویرال را تا ۳۰۰ بار افزایش داده است. در نزدیکی نقاط بحرانی فقط استفاده از رابطه جدید پیشنهاد می‌شود زیرا خطای دیگر معادلات حالت قابل‌توجه است. نتایج نشان می‌دهند که تا فشار ۱۰۰ بار کلیه معادلات حالت قابل استفاده‌اند و مزیت خاصی بر یکدیگر ندارند.

در ادامه مقادیر آنتالپی و آنتروپی واقعی در فشار اتمسفری توسط معادلات حالت مختلف و روابط ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ برای گزنون، کریپتون، اتان، نرمال بوتان، متان، بخار آب، هوا، دی‌اکسیدکربن و آرگون در دماهای متفاوت محاسبه و نتایج با داده‌های تجربی [۲۰] مقایسه شده‌اند. برای این منظور ابتدا یک معادله حالت انتخاب شده‌است (مثلاً معادله لی-کسلا) سپس مقادیر آنتالپی و آنتروپی باقیمانده توسط انتگرال‌گیری از روابط ۱۴ و ۱۵ به‌دست آمده‌اند. از آنجایی که معادلات حالت مفروض دارای ترم‌های متعدد و پیچیده هستند، انتگرال‌گیری به‌روش تحلیلی فقط توسط محاسبات کامپیوتری ممکن است. برای انتگرال‌گیری از معادلات حالت مفروض یک برنامه کامپیوتری بسیار حجیم (حدود ۱۰۰۰ خط) در محیط

نرم افزار متلب^۱ تهیه شده است. همچنین آنتالپی و آنتروپی در شرایط گاز ایده آل نیز توسط روابط ۱۸ و ۱۹ با در نظر گرفتن یک دما و فشار مرجع (منطبق بر دما و فشار یکی از داده‌های تجربی) توسط برنامه کامپیوتری حجیم دیگری (حدود ۴۰۰ خط) محاسبه و طبق رابطه ۱۶ با مقادیر باقیمانده جمع شده و مقادیر آنتالپی و آنتروپی واقعی را به دست داده‌اند. این دو برنامه برای تمامی سیالات انتخابی اجرا شده‌اند که در نوع خود بسیار حجیم و منحصر به فرد می باشد. همچنین از روابط ۲۶ و ۲۷ برای بدست آوردن آنتالپی و آنتروپی سیالات مذکور بر اساس معادله حالت ارائه شده استفاده شده است. نتایج حاصله توافق بسیار خوب کلیه معادلات حالت با داده‌های تجربی را نشان می دهند. این نتایج در جدول ۳ و ۴ فهرست شده‌اند. جدول ۳ و ۴ نشان می دهند که مقادیر آنتالپی و آنتروپی واقعی در فشار اتمسفری مستقل از نوع معادله حالت است و کلیه این معادلات مقادیر نسبتاً دقیق را به دست می دهند. این موضوع به این علت است که در فشار اتمسفری (فشارهای کم) گازهای واقعی رفتاری شبیه گاز ایده آل از خود نشان می دهند و ثوابت معادلات حالت مختلف عملاً تاثیر ناچیز و قابل صرف نظر کردن روی نتایج محاسبه‌ای دارند. برای اثبات این ادعا مقادیر آنتالپی و آنتروپی واقعی برای سه سیال نرمال بوتان، دی اکسید کربن و اتان در فشارهای به ترتیب ۳۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ بار مشابه حالت اتمسفری توسط برنامه کامپیوتری دیگری (برای معادلات حالت غیر از معادله ارائه شده) محاسبه شده‌اند. همچنین درصد خطای مطلق متوسط (AARD%) برای هر سیال محاسبه شده و در جداول ۵ و ۶ آورده شده‌اند.

جدول ۱. مقایسه %AARD معادلات حالت مختلف جهت تخمین ضریب تراکم پذیری

%AARD معادلات حالت مورد مطالعه				دما (K)	سیال
سوآ- ردلیج- کوانگ	پنگ- رابینسون	لی- کسلر	محمد یخواه- ابوالقاسمی- محبی		
۱/۸۲۷	۲/۵۱	۱/۱۶۳	۳/۴۴۰	۲۱۵	آرگون
۰/۹۰۹۵	۲/۰۰۶	۰/۳۶۸	۱/۹۱۱	۳۰۰	
۱/۹۰۸	۲/۰۱۹	۰/۹۱۹	۲/۵۲۲	۲۹۵	کریپتون
۱/۳۶۸	۱/۴۱۳	۰/۵۸۸	۱/۳۴۳	۴۰۰	
۱/۶۹۴	۲/۶۱۷	۰/۹۵۱	۴/۰۱۶	۲۶۰	متان
۱/۰۹۹	۱/۹۰۸	۰/۴۷۹	۱/۳۴۹	۳۵۵	
۱/۳۵۵	۲/۳۹۹	۰/۵۸۸	۱/۸۷۹	۲۳۰	نیتروژن
۰/۵۶۹	۱/۶۷۱	۰/۱۲۴	۲/۳۵۰	۳۶۰	
۰/۸۴۹	۳/۷۸۶	۰/۶۱۶	۶/۳۷۱	۲۰۰	اکسیژن
۱/۰۰	۲/۰۷۴	۰/۴۶۲	۱/۴۸۱	۲۷۵	
۲/۰۲۳	۱/۸۹۵	۰/۸۲۵	۲/۳۱۲	۴۰۰	گزنون
۱/۶۲۵	۰/۹۱۹	۰/۷۸۳	۱/۴۴۷	۵۸۵	
۰/۹۷۷	۳/۴۴۸	۰/۶۱۰	۱/۸۷۰	۲۳۹	هوا
۰/۳۲۲	۲/۴۶۲	۰/۱۲۶	۲/۴۷۵	۳۷۰	
۰/۸۱۶	۰/۰۴۰۶	۰/۰۷۷۹	۰/۱۳۶	۳۶۰	مونواکسید کربن
۰/۶۸۸۲	۰/۰۸۲	۰/۰۷۷۲	۴/۴۰	۴۳۰	
۳/۶۷۵	۰/۹۰۶	۰/۹۳۳	۲/۷۸	۴۳۰	دی اکسید کربن
۳/۱۵	۰/۷۴۵	۱/۰۷۳	۲/۳۶۴	۵۰۶	

^۱ Matlab Software

جدول ۲. مقادیر خطای نسبی معادلات حالت مختلف جهت تخمین ضریب تراکم پذیری بحرانی

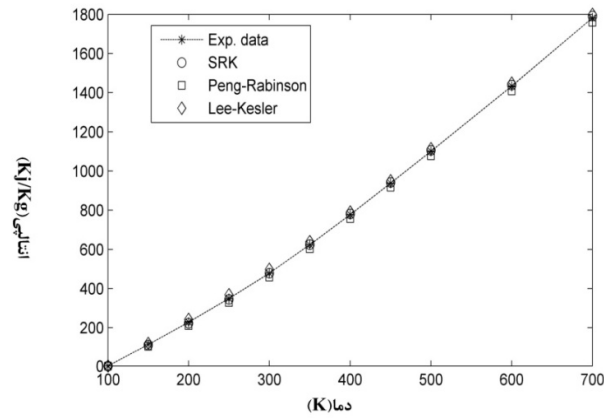
سیال	مقادیر تجربی (Z_{Exp})	لی - کسلر		پنگ - رابینسون		سوآ - ردلیچ - کوانگ		محمدیخواه - ابوالقاسمی - محبی	
		%ARD	Z_C	%ARD	Z_C	%ARD	Z_C	%ARD	Z_C
آرگون	۰.۲۹۱	۰.۳۰۹	۰/۲۹۰۱	۰/۳۱۱	۷/۱۹۲	۰/۳۳۶	۱۵/۵۹	۰/۲۹۰۸	۰/۰۷۸۸
کریپتون	۰.۲۸۸	۰/۷۲۹	۰/۲۹۰۱	۰/۲۸۷	۰/۲۷۷	۰/۳۱۳	۸/۹۸۳	۰/۲۹۰۸	۰/۹۶۲
متان	۰.۲۸۶	۳/۳۸۳	۰/۲۹۶	۰/۳۷۹	۳۲/۳۷۴	۰/۴۰۷	۴۲/۲۱	۰/۲۹۰۶	۱/۶۱
نیتروژن	۰/۲۸۹	۶/۴۹۲	۰/۳۰۷۷	۰/۲۷۷	۴/۲۲۵	۰/۳۰۲	۴/۵۲۳	۰/۲۹۰۳	۰/۴۳۵
دی اکسید کربن	۰/۲۷۴	۴۳/۸۷۴	۰/۳۹۴	۰/۳۲۹	۲۰/۲۴	۰/۳۵۶	۳۰/۰۴۷	۰/۲۸۸	۵/۰۳
اکسیژن	۰/۲۸۸	۴/۲۸	۰/۳۰۰	۰/۳۵۲	۲۲/۳۲۳	۰/۳۸۱	۳۲/۱۷	۰/۲۹۰۵	۰/۸۵۹
گزنون	۰/۲۸۶	۱/۴۳۳	۰/۲۹۰۱	۰/۲۶۷	۶/۵۲۸	۰/۲۹۲	۲/۱۲۶	۰/۲۹۰۸	۱/۶۶۸
هوا	۰/۲۸۹	۶/۰۰۹	۰/۳۰۶	۰/۲۸۸	۰/۲۹۷	۰/۳۱۲	۸/۰۵۲	۰/۲۹۰۳	۰/۴۴۹
مونواکسید کربن	۰/۲۹۹	۴/۴۸۵	۰/۳۱۲	۰/۲۶۹	۱۰/۱	۰/۲۹۴	۱/۷۴۹	۰/۲۹۰	۲/۹۶۸

جدول ۳. مقادیر %AARD معادلات حالت مختلف جهت تخمین آنتالپی سیالات نمونه در فشار اتمسفری

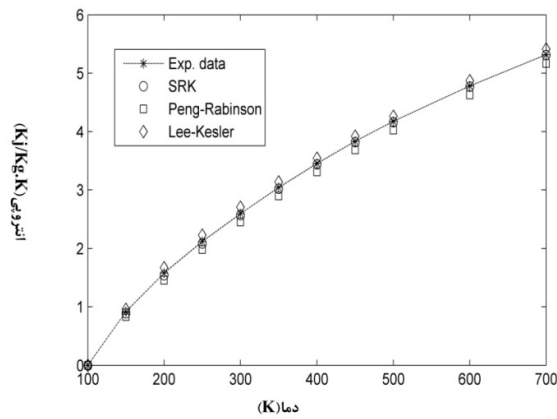
سیال	%AARD معادلات حالت مورد مطالعه			
	محمدیخواه - ابوالقاسمی - محبی	لی - کسلر	پنگ - رابینسون	سوآ - ردلیچ - کوانگ
گزنون	۱/۴۱۹	۱/۱۷۳	۰/۱۸۷	۰/۱۶۶
کریپتون	۰/۸۶۲	۰/۵۱۹	۰/۲۴۳	۰/۲۵۱
اتان	۲/۴۶۱	۲/۰۸۰	۰/۴۸۷	۰/۳۰۶
نرمال بوتان	۲/۲۰۱	۱/۷۸۲	۱/۸۸۸	۰/۴۳۷
متان	۳/۱۷۳	۳/۰۰۴	۰/۹۰۱	۰/۷۹۰
آب	۲/۰۶۱	۱/۵۸۵	۱/۵۶۹	۱/۵۶۹
هوا	۰/۶۰۳	۰/۷۱۳	۱/۸۲۶	۱/۸۵۹
دی اکسید کربن	۱/۳۲۱	۱/۳۵۹	۱/۰۶۹	۱/۰۶۹
آرگون	۱/۷۶۴	۲/۲۰۵	۰/۱۹۷	۰/۱۷۶

جدول ۴. مقادیر %AARD معادلات حالت مختلف جهت تخمین آنتروپی سیالات نمونه در فشار اتمسفری

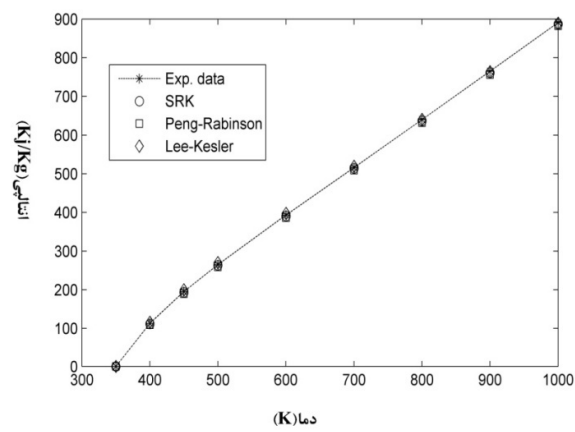
سیال	%AARD معادلات حالت مورد مطالعه			
	محمدیخواه - ابوالقاسمی - محبی	لی - کسلر	پنگ - رابینسون	سوآ - ردلیچ - کوانگ
گزنون	۱/۶۷	۱/۳۵۰	۰/۴۰۴	۰/۳۴۸
کریپتون	۰/۸۸۲	۰/۶۴۱	۰/۲۷۶	۰/۲۷۶
اتان	۲/۹۲۶	۲/۱۵۸	۰/۲۵۳	۰/۲۴۵
نرمال بوتان	۲/۲۶۱	۱/۴۰۸	۰/۳۵۷	۰/۳۳۴
متان	۳/۹۴۲	۳/۵۸۷	۰/۲۳۷	۰/۲۰۳
آب	۱/۶۹۷	۰/۹۶۷	۱/۱۱۶	۱/۱۴۰
هوا	۰/۷۰۴	۰/۵۷۲	۱/۹۶۱	۱/۹۳۹
دی اکسید کربن	۱/۴۹۲	۱/۴۵۱	۰/۶۲۸	۰/۶۴۲
آرگون	۱/۷۴۸	۲/۰۰۳	۰/۲۸۶	۰/۲۵۸



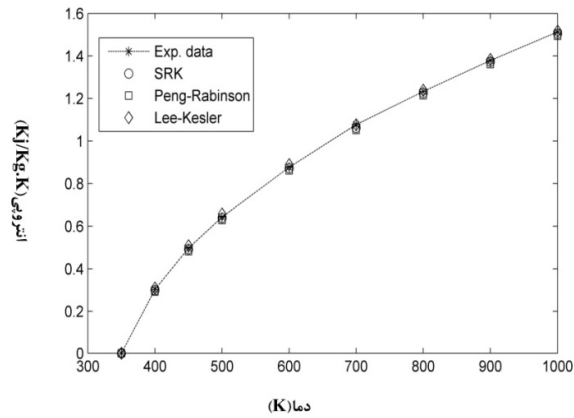
شکل ۹. آنتالپی اتان بر حسب دما در فشار ۳۰۰ بار



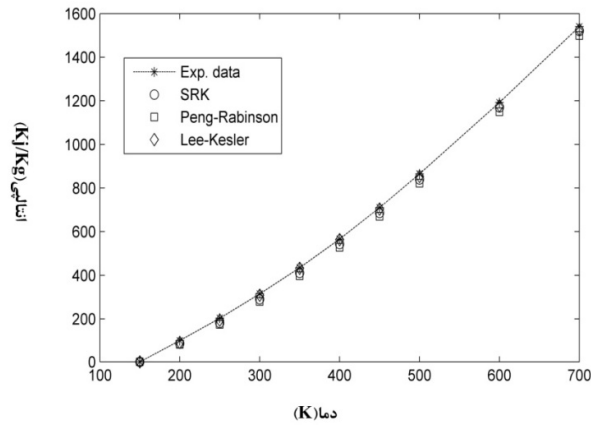
شکل ۱۰. آنتروپی اتان بر حسب دما در فشار ۳۰۰ بار



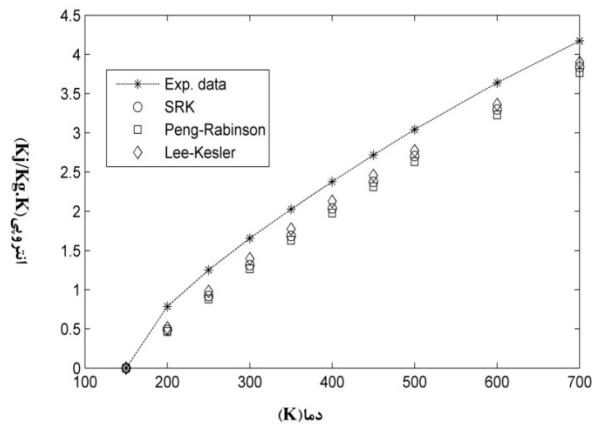
شکل ۱۱. آنتالپی دی اکسید کربن بر حسب دما در فشار ۲۰۰ بار



شکل ۱۲. آنتروپی دی اکسید کربن بر حسب دما در فشار ۲۰۰ بار



شکل ۱۳. آنتالپی نرمال بوتان بر حسب دما در فشار ۳۰۰ بار



شکل ۱۴. آنتروپی نرمال بوتان بر حسب دما در فشار ۳۰۰ بار

جداول ۳ و ۴ نشان می‌دهند که برای محاسبه آنتالپی و آنتروپی گازهای مذکور استفاده از رابطه جدید ارجح است؛ زیرا خطای کمی را نتیجه می‌دهد و نیازمند فرایند حدس و خطا و انتگرال‌گیری پیچیده نیست و به‌صورت تحلیلی خواص آنتالپی و آنتروپی را به‌دست می‌دهد.

جدول ۵. مقایسه %AARD معادلات حالت مختلف جهت تخمین آنتالپی سیالات نمونه در فشارهای زیاد

%AARD معادلات حالت مورد مطالعه			سیال
سوا- ردلیچ- کوانگ	پنگ- رابینسون	لی- کسلر	
۰/۸۸۸	۳/۹۳۳	۲/۸۷۷	اتان
۰/۷۰۵	۱/۷۶۶	۱/۰۱۴	دی اکسید کربن
۵/۶۸۸	۸/۳۸۲	۲/۳۸۵	نرمال بوتان

جدول ۶. مقایسه %AARD معادلات حالت مختلف جهت تخمین آنتروپی سیالات نمونه در فشارهای زیاد

%AARD معادلات حالت مورد مطالعه			سیال
سوا- ردلیچ- کوانگ	پنگ- رابینسون	لی- کسلر	
۰/۹۸۰	۵/۱۰۵	۳/۲۹۹	اتان
۰/۷۸۲	۱/۹۶۶	۱/۰۰۴	دی اکسید کربن
۱۹/۹۳۹	۱۷/۴۷۴	۱۴/۲۷۴	نرمال بوتان

جداول ۵ و ۶ نشان می‌دهند که معادله سوا- ردلیچ- کوانگ به‌منظور محاسبه آنتالپی و آنتروپی واقعی در فشارهای بالا دقیق‌تر از سایر معادلات است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که هیچ یک از معادلات حالت تجربی دقت کافی را در ناحیه فشارهای بالا جهت تخمین آنتروپی و آنتالپی نرمال بوتان را ندارند. اما این معادلات می‌توانند جهت تخمین ضریب تراکم‌پذیری در فشار بالا و دور از نقطه بحرانی به کار روند. به‌طور کلی با افزایش جرم مولی گازها خطای معادلات حالت افزایش می‌یابد و حتی از ۲۰ درصد هم فراتر می‌رود لذا باید حین طراحی افزایش حجم سیال را در نظر گرفت.

از جداول فوق واضح است که بر خلاف پیشنهادات متداول (مثلاً برای استفاده از نرم‌افزار هایسیس^۱ که معادله پنگ - رابینسون پیشنهاد می‌شود)، معادلات سوا- ردلیچ- کوانگ و لی - کسلر برای هیدروکربن‌هایی نظیر متان، اتان و نرمال بوتان جواب بهتری در مقایسه با معادله پنگ- رابینسون به‌دست می‌دهند و لذا به مهندسين طراح در زمینه نفت و گاز پیشنهاد می‌شود که این نکته را در طراحی‌های خود مورد نظر داشته باشند. همچنین شکل تابعی پیچیده و وجود ثوابت متعدد معادلات تجربی، ضرورت تلاش‌های مجدد برای معرفی معادله حالتی ساده، نسبتاً دقیق و جامع را ایجاد می‌کند. در نهایت برای استفاده از معادلات تجربی باید کاملاً محتاط بود و محدودیت‌های این معادلات را مد نظر داشت. بدیهی است که بی‌توجهی به این اصل، نتایج نادرست و بعضاً دور از واقعیت را به‌دست خواهد داد.

¹ HYSYS

معادلات تحلیلی ۲۳، ۲۴ و ۲۵ استفاده از معادله حالت جدید ارائه شده را برای مهندسیین طراح در زمینه نفت و گاز پیشنهاد می‌کند زیرا علاوه بر سادگی می‌توان برای کلیه خواص ترمودینامیکی رابطه‌ای تحلیلی و بصورت چند جمله‌ای پیدا کرد و از آنها برای محاسبه سریع خواص ترمودینامیکی استفاده نمود.

نتیجه گیری

معادلات حالت سوآ - ردلیچ - کوانگ، پنگ - رابینسون، محمدیخواه - ابوالقاسمی - محبی و لی - کسلر ضریب تراکم‌پذیری خوب و قابل قبولی را برای سیالات آرگون، دی‌اکسیدکربن، کریپتون، متان، نیتروژن، اکسیژن، گزنون و مونواکسیدکربن را در نقاط دور از نقطه بحرانی نشان داده‌اند. معادلات حالت مورد بررسی آنتروپی و آنتالپی واقعی خوبی را برای سیالات گزنون، کریپتون، اتان، نرمال بوتان، متان، بخار آب، هوا، دی‌اکسیدکربن و آرگون در فشارهای اتمسفری و فشارهای بالا نشان داده‌اند. آنتالپی و آنتروپی محاسبه‌ای در فشارهای پایین مستقل از معادله حالت انتخابی هستند. در نزدیکی نقطه بحرانی اکثر معادلات تجربی توافق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان نداده‌اند.

معادله شبه تئوری محمدیخواه - ابوالقاسمی - محبی در نزدیکی نقطه بحرانی جواب خوبی می‌دهد و به‌عنوان یک مزیت بزرگ روابط ترمودینامیکی را به‌صورت روابط تحلیلی ساده ارائه می‌کند. برای تخمین ضریب تراکم‌پذیری سیالات غیرقطبی معادله لی - کسلر دقیق‌تر از سایر معادلات است. برای تخمین ضریب تراکم‌پذیری سیالات قطبی معادله پنگ - رابینسون دقیق‌تر از سایر معادلات است. بر خلاف انتظار، معادلات سوآ - ردلیچ - کوانگ و لی - کسلر برای هیدروکربن‌هایی نظیر متان، اتان و نرمال بوتان جواب بهتری در مقایسه با معادله پنگ - رابینسون به‌دست داده‌اند. برای استفاده از معادلات تجربی باید کاملاً محتاط بود و محدودیت‌های این معادلات را مد نظر داشت. هیچ یک از معادلات حالت تجربی جامعیت کافی جهت تخمین خواص ترمودینامیکی همه سیالات را ندارند. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهند که ارائه معادله حالت جامع‌تر و ساده‌تر لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد و پیشنهاد می‌شود که از روابط تحلیلی ۱۲، ۲۳، ۲۶ و ۲۷ برای محاسبه سریع خواص ترمودینامیکی سیالات در طراحی‌های مربوط به نفت و گاز استفاده شود.

فهرست علائم

AARD%	میانگین درصد خطای نسبی مطلق
ARD%	درصد خطای نسبی مطلق
a	ضریب معادله ۱۱ و ثابت معادلات تجربی
B, B'	ضریب دوم معادله ویریال
b	ضریب معادله ۱۱ و ثابت معادلات تجربی
C, C'	ضریب سوم معادله ویریال
c	ضریب معادله ۱۱

ضریب چهارم معادله ویریال	D, D'
ثابت معادله لی-کسلر	d
آنتالپی	H
فشار	P
فشار بحرانی	Pc
فشار نقصانی	Pr
خاصیت ترمودینامیکی شدتی	Q
ثابت جهانی گازها	R
آنتروپی	S
دما	T
دمای بحرانی	Tc
دمای نقصانی	Tr
حجم مولی	v
ضریب تراکم‌پذیری	Z
ضریب تراکم‌پذیری بحرانی	Zc
ضریب بی‌مرکزی	ω

منابع

1. M. M. Abbott; Adv. In chem. Ser., 182, 47 (1979)
2. V. M. Shan, Y. L. Lin, H. D. Cochran; Fluid phase Equilib, 116, 87 (1996)
3. M. Benedict, G. B. Webb, L. C. Rubin; J. chem. phys, 8, 334 (1940)
4. M. Benedict, G. B. Webb, L. C. Rubin; J.chem.phys, 10, 747, (1942)
5. C. J. Kedge, M. A. Trebble; Fluid phase Equilib, 219, 158-60, (1999)
6. U. Setzman, W. Wagner; Int. J. Thermophys., 10, 1103, (1989)
7. U. Setzman, W. Wagner; J. phys. chem. Ref. Data, 20, 1061, (1991)
8. J. M. Prausnitz, R. N. Lichtenthaler, E. G. de Azevedo; 3th Ed., Molecular Thermodynamics Of Fluid Phase Equilibria, N. J, Prentice-Hall, (1999)
9. J. V. Sengers, R. F. Kayser, C. J. Peters, H. J. White; Equation of State for Fluid and Fluid Mixtures, First Ed, Elsevier Science B. V. AE Amsterdam, (2000)
10. A. Mohebbi, R. Mohammadikhah; TSI. J. Phys. Chem. Vol 2, Issue1, (2007)
11. R. Mohammadikhah, H. Abolghasemi, A. Mohebbi; IJCCE, Vol 29, Issue2, (2010).
12. C. J. Kedge, M. A. Trebble; Fluid phase Equilib, 217, 257-262, (2004)
13. E. A. Mason, T. H. Spurling; The virial Equation of State, Clarendon Press, Oxford, 2, (1969).
14. Philip T. Eubank, Harald Kruggel-Emden, Gabreil Santana-Rodrigues, Xiaonian Wang; Fluid phase Equilib; 207, 35-52, (2003).
15. K. S. Pitzer, R. F. Curl; Jr, J. Am. chem. Soc, 79, 2369, (1957).
16. C. Tsonopoulos, J. AIChE, 24, 1112, (1978)
17. R. Mohammadikhah, H. Abolghasemi, A. Mohebbi, M. Foroughi, K. Matin, A Qualitative Study on Compressibility Factor Using M-Factor Theory, 12th national Chemical Engineering Congress, Sahand University, Tabriz, Iran, 2008.



18. J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott; Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, sixth Ed, Mc Graw Hill, New York, (2001)
19. Sh. Jafari Nejad, R. Mohammadikhah, H. Abolghasemi, M. A. Moosavian and M. G. Maragheh, A Novel Equation of State (EOS) for Prediction of Solute Solubility in Supercritical Carbon Dioxide: Experimental Determination and Correlation, CJCE, Vol. 87, 2009.
20. Perry R. H., Green D. W; Perry's chemical engineering handbook, 7th Ed, Mc Graw-Hill Inc; New York, 1997.