ارائه یک رابطه تجربی برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری و مقایسه آن با سایر روابط موجود

نوید عزیزی، رضا مسیبی بهبهانی*، محمدعلی عیسی‌زاده

اهواز، دانشگاه صنعت نفت، دانشکده مهندسی گاز

پیام نگار: **behbahani@put.ac.ir**

چکیده

استفاده از ضریب تراکم‌پذیری[1] گازهای طبیعی در بیشتر محاسبات مهندسی نفت و گاز ضروری است. ضرورت محاسبه این ضریب، زمانی افزایش می‌یابد که هیچگونه دادهٔ آزمایشگاهی برای گاز، در دسترس نباشد. یکی از پرکاربردترین روش‌های محاسبه این ضریب، استفاده از فرمول تجربی است.

دراین مقاله ابتدا یک فرمول تجربی استنتاج شده بر اساس نمودارهای معروف (استندینگ-کتز)[2] برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری ارائه می‌گردد. مزیت این رابطه صریح بودن آن برحسب این ضریب است، بنابراین برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری نیاز به حدس و خطا نخواهد داشت و به دلیل صریح بودن، به راحتی در سیستم‌های کنترل منطقی قابل برنامه‌ریزی[3] قابل استفاده است. در ادامه برای حصول اطمینان از دقت این روش، نتایج به‌دست آمده از این معادله با نتایج سایر معادلات کاربردی موجود مقایسه می‌شوند و برتری این فرمول تجربی بر اساس محاسبات میزان خطا مشاهده می‌گردد.

کلمات کلیدی: ضریب تراکم‌پذیری گاز، فرمول تجربی صریح، نمودار (استندینگ-کتز)

۱- مقدمه

استفاده از ضریب تراکم‌پذیری گازهای طبیعی در بیشتر محاسبات مهندسی نفت و گاز ضروری است. برخی از این محاسبات، عبارتند از: اندازه‌گیری مقدار گاز، طراحی واحدهای فرایندی و طراحی خط لوله.

رایج‌ترین منابع ضریب تراکم‌پذیری، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، معادلات حالت و معادلات تجربی می‌باشند. ضرورت محاسبه این ضریب، زمانی افزایش می‌یابد که هیچگونه دادهٔ آزمایشگاهی برای گاز در دسترس نباشد. دراین مقاله یک فرمول تجربی برای محاسبهٔ ضریب تراکم‌پذیری ارائه می‌گردد.

حجم گاز حقیقی معمولاً از حجم گاز ایده‌آل، کمتر است بنابراین گاز حقیقی اصطلاحاً فوق تراکم‌پذیر نامیده می‌شود. نسبت حجم گاز حقیقی به حجم گاز ایده‌آل که بیانگر مقدار انحراف گاز حقیقی از حالت ایده‌آل می‌باشد، اصطلاحاً ضریب تراکم‌پذیری نامیده می‌شود. این ضریب، ضریب انحراف گاز نیز نامیده می‌شود که با نماد Z مشخص می‌گردد.

$$z = \frac{V_a}{V_i} = \frac{Actual\ volume\ of\ \ n\ moles\ of\ \ gas\ at\ T\ and\ P}{Ideal\ volume\ of\ \ n\ moles\ at\ same\ T\ and\ P}$$

1. Z-Factor
2. Standing-Katz (S-K)
3. PLC

بنابراین معادله حالت برای یک گاز حقیقی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$PV = nzRT$$

در اینجا P فشار، V حجم، T دمای مطلق، z ضریب تراکم‌پذیری، n تعداد مولهای گاز و R ثابت جهانی گازها می‌باشند. ضریب انحراف گاز، z، در فشار پایین و دمای بالا نزدیک به ۱ است که به این معناست که رفتار گاز در این شرایط، همانند رفتار گاز ایده آل می‌باشد.

اهمیت ضریب تراکم‌پذیری گازها در محاسبات شدت جریان میان سنگ مخزن، موازنه مواد، شبیه‌سازی مخازن، طراحی واحدهای فرایندی و طراحی خط لوله بسیار چشمگیر است.

۱-۱- روش‌های اندازه‌گیری ضریب تراکم‌پذیری

۱-۱-۱- روش استفاده از معادله حالت

معادلات حالت، معادلات ساده‌ای هستند که فشار، حجم و دما را به هم مربوط می‌کنند. آنها رفتار فازی و حجمی ترکیبات خالص و مخلوط را تنها با در دست داشتن خواص بحرانی و ضریب بی مرکزی هر یک از اجزاء به صورت صحیح توضیح می‌دهند. به عنوان مثال، رفتار چندگانه فازی همانند طغیان دی اکسید کربن در دمای پایین می‌تواند به کمک یک معادلهٔ حالت مورد بررسی قرار گیرد و حتی رفتار فازی (آب- هیدروکربن) می‌تواند با استفاده از معادلهٔ حالت، به‌صورت صحیح پیش بینی شود.

رفتار حجمی با حل کردن معادلهٔ حالت که معمولاً بر مبنای $z = \frac{PV}{nRT}$ نوشته می‌شود محاسبه می‌گردد:

$$z^3 + A_1 z^2 + A_2 z + A_3 = 0$$

که در اینجا A_1، A_2 و A_3 توابعی از فشار، دما و ترکیب فازی می‌باشند.

برای محاسبات معادلهٔ حالت، خواص بحرانی، ضریب بی مرکزی، جرم مولکولی و پارامترهای واکنش دوتایی اجزاء در ترکیب، مورد نیاز می‌باشند. یکی از مشکلات معادلات حالت این است که معمولاً با روش‌های جداسازی شیمیایی موجود نمی‌توانیم صدها اجزاء موجود در سیالات مخزن را شناسایی کنیم. یکی دیگر از مشکلات مربوط به معادلات حالت موجود و روابط موجود برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز معادلات حالت، این است که آنها قادر نیستند خواص اجزای سنگینتر از C_{20} را پیش‌بینی کنند.

۱-۱-۲- روش استفاده از روابط تجربی

روابط متعددی برای محاسبه این پارامتر مهم وجود دارند. که اساس و پایه همه آنها اصل حالات متناظر است[۱]. نظریهٔ حالات متناظر بیان می‌کند که تمامی گازها وقتی بر حسب فشار، دما و حجم نقصانی نمایش داده می‌شوند رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهند که از جملهٔ این رفتار یکسان، داشتن ضریب تراکم‌پذیری برابر می‌باشد. این اصل به صورت ریاضی به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$z = f(T_r, P_r)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad \& \quad P_r = \frac{P}{P_c}$$

که در اینجا P_r و T_r به ترتیب فشار و دمای نقصانی و P_c و T_c به ترتیب فشار ودمای بحرانی گاز می‌باشند. مقادیر فشار و دمای بحرانی، اگر ترکیب درصد گاز و خواص بحرانی هر یک از اجزاء مشخص باشند، با استفاده از قوانین امتزاج[1] مانند قانون کای[2]، قانون SBV[۲] و قانون SSBV[۳] قابل تخمین زدن می‌باشند و اگر ترکیب درصد گاز نامشخص باشد این خواص با استفاده از روابط موجود بر اساس جرم ویژه محاسبه می‌شوند [۴].

۲- تاریخچه معادلات موجود برای محاسبهٔ ضریب تراکم‌پذیری

پر کاربردترین رابطهٔ مورد قبول برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گازها، نمودار (استندینگ-کتز) است[۵]. این نمودار با استفاده از مخلوط دوتایی گاز متان با گازهای اتان، پروپان و بوتان و گازهای طبیعی با ترکیب درصدهای مختلف به‌دست آمده است. نمودار (استندینگ-کتز) در واقع صورت اصلاح شده‌ای از نمودار فراهم شده بوسیله (براون- هولکام)[3] است [۷،۶] که در فشارهای نقصانی

1. Mixing Rules
2. Kay
3. Brown-Holcomb (BH)

کوچکتر از ۴، با این نمودار، یکسان است. در فشارهای نقصانی بالاتر، مشاهده شد که نمودار (براون- هولکام) دقیق نیست. بنابراین، استندینگ و کتز با استفاده از داده‌های ۱۶ مخلوط گازی و ضریب تراکم‌پذیری متان به عنوان راهنما نمودار خود را تا دمای نقصانی، ۱۵ گسترش دادند. با استفاده از این نمودار، ضریب تراکم‌پذیری گازها تنها با در دست داشتن دما و فشار نقصانی، قابل محاسبه می‌باشد. از آنجایی که این نمودار در سال ۱۹۴۱ به چاپ رسیده است، تاکنون روابط متعددی برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری بر اساس این نمودار معروف به دست آمده است.

۲-۱ کاربردی‌ترین روابط تجربی برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری

چندین سال است که مهندسین برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری، به‌جای استفاده از نمودارها و جدول‌های موجود، از روابط تجربی استفاده می‌کنند. استفاده مؤثر از این روابط، مستلزم درک روش‌های به‌دست آوردن آنها و آگاهی دربارهٔ محدودیت‌های هر یک از آنها می‌باشد. این بخش، شامل مروری بر کاربردی‌ترین روابط موجود برای محاسبهٔ ضریب انحراف گازهاست. این فرمول‌های تجربی به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۱- روابط مستقیم که این روابط برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری نیاز به حدس وخطا ندارند.

۲- روابط تکرار پذیر که بر خلاف روابط مستقیم برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری نیاز به حدس وخطا دارند.

۲-۱-۱ روابط مستقیم

۲-۱-۱-۱ رابطه پاپ[1]

در سال ۱۹۷۹، پاپ [۸] رابطه زیر را برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری ارائه داد:

$$z = 1 + R_1 P_r + R_2 P_r^2 - \frac{W R_3 P_r}{P_r^2 + R_6 P_r + R_7}$$

که در اینجا R_iها تنها توابعی از دمای شبه نقصانی می‌باشند. بنابراین برای هر دمای شبه نقصانی، کافیست که تنها یکبار محاسبه شوند و W تابعی از دما و فشار شبه نقصانی است. مقادیر R_i و W عبارتند از:

$$R_1 = -3.23716\times10^{-3} T_r^5 + 4.0734\times10^{-2} T_r^4 - 0.202996 T_r^3 + 0.494968 T_r^2 - 0.573187 T_r + 0.244275$$

$$R_2 = (17.5648 T_r^3 + 185.316 T_r^2 - 337.652 T_r + 420.016)^{-1}$$

$$R_3 = T_r^3 / (86.1372 - 235.563 T_r + 256.036 T_r^2 - 135.986 T_r^3 + 34.2576 T_r^4 - 2.7089 T_r^5)$$

$$R_4 = 9.6283 T_r^2 - 19.7803 T_r + 11.9919$$

$$R_5 = (6.83622 - 22.0656 T_r + 14.3817 T_r^2 + 2.081973 T_r^3) / T_r^3$$

$$R_6 = R_3 R_4 - 2R_5$$

$$R_7 = R_5^2$$

در صورتی که $P_r \le R_5$ باشد W=۱ و هنگامی که $P_r \le R_5$ باشد:

$$W = 1 - R_{10}(P_r - R_5)^2 (P_r - R_8)(P_r - R_9)^2$$

$$R_8 = R_5 + [3.7\times10^{-10}(15.1 - R_5)] / (T_r - 1.1)^9$$

$$R_9 = 15.1 + [2(15.1 - R_5)(15.1 - R_8)] / (45.3 - 2R_8 - R_5)$$

$$R_{10} = [(15.1 - R_5)^2 (15.1 - R_8)(15.1 - R_9)^2]^{-1}$$

پاپ سعی کرد معادله خود را چنان تنظیم کند که به ازای P_r=۰ ، مقدار Z مساوی با یک شود. محدودیتی که وی برای معادلهٔ خویش در نظر گرفت به قرار زیر است:

$$۳ \le T_{pr} \le ۱/۲ \;\&\; ۱۵ \le P_{pr} < ۰/۲$$

۲-۱-۱-۲ رابطه شرکت نفتی شل[2]

شرکت نفتی شل [۹] یک معادله بر مبنای نمودار (استندینگ-کتز)، برای محاسبه Z پیشنهاد کرد که به صورت زیر است:

$$z = ZA + ZB \times P_{pr} + (1 - ZA)\exp(-ZG) - ZF \times \left(\frac{P_{pr}}{10}\right)^4$$

1. Papp

2. Shell Oil

که در اینجا

$$ZA = -0.101 - 0.36T_{pr} + 1.3868\sqrt{(T_{pr} - 0.919)}$$

$$ZB = 0.021 + \frac{0.04275}{(T_{pr} - 0.65)}$$

$$ZC = 0.6222 - 0.224T_{pr}$$

$$ZD = \frac{0.0657}{(T_{pr} - 0.86)} - 0.037$$

$$ZE = 0.32exp(-19.53 \times (T_{pr} - 1))$$

$$ZF = 0.122exp(-11.3 \times (T_{pr} - 1))$$

$$ZG = P_{pr}(ZC + ZD \times P_{pr} + ZE \times P_{pr}^4)$$

۲-۱-۱-۳ رابطه بگز و بریل[1]

در سال ۱۹۷۴، بگز و بریل [۱۰] معادله‌ای جدید برای محاسبه Z به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$z = A + \frac{(1-A)}{e^B} + CP_{pr}^D$$

که در اینجا

$$A = 1.39\sqrt{(T_{pr} - 0.92)} - 0.36T_{pr} - 0.101$$

$$B = (0.062 - 0.23T_{pr})P_{pr} + \left[\frac{0.066}{(T_{pr} - 0.86)} - 0.037\right] P_{pr}^2 + \frac{0.32}{10^{9(T_{pr}-1)}} P_{pr}^6$$

$$C = (0.132 - 0.32log(T_{pr}))$$

$$D = 10^{(0.3016 - 0.49T_{pr} + 0.1824T_{pr}^2)}$$

شایان ذکر است که از این معادله برای مقادیر T_{pr} < ۰/۹۲ استفاده نمی‌شود.

۲-۱-۲ روابط تکرارپذیر

۲-۱-۲-۱ رابطه هال و یاربوروگ[2]

در سال ۱۹۷۳، هال و یاربوروگ [۱۱] یک معادله برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری ارائه دادند که بخوبی داده‌های نمودار (استندینگ-کتز) را پوشش می‌دهد. این معادله بر اساس معادلهٔ حالت (استارلینگ-کارنهان)[3] به‌دست آمده است. این معادله به صورت زیر است:

$$z = \left[\frac{0.06125P_{pr}t}{Y}\right] exp[-1.2(1-t)^2]$$

که در اینجا

$$t = \frac{T_{pc}}{T}$$

$$F(Y) = -0.06125P_{pr}T[-1.2(1-t)^2] + \frac{Y + Y^2 + Y^3 - Y^4}{(1-Y)^3} - (14.76t - 9.76t^2 + 4.58t^3)Y^2 + (90.7t - 242.2t^2 + 42.4t^3)Y^{(2.18+2.82t)} = 0$$

هال و یاربوروگ اشاره کردند که این روش برای مقادیر T_{pr} < ۱ پیشنهاد نمی‌شود.

۲-۱-۲-۲ رابطه درانچوک و ابوکاظم[4]

در سال ۱۹۷۵، درانچوک و ابوکاظم [۱۲] یک معادله با ۱۱ مقدار ثابت برای محاسبهٔ ضریب انحراف گازها به صورت زیر ارائه دادند:

$$z = \left[A_1 + \frac{A_2}{T_{pr}} + \frac{A_3}{T_{pr}^3} + \frac{A_4}{T_{pr}^4} + \frac{A_5}{T_{pr}^5}\right]\rho_r + \left[A_6 + \frac{A_7}{T_{pr}} + \frac{A_8}{T_{pr}^2}\right]\rho_r^2 - A_9\left[\frac{A_7}{T_{pr}} + \frac{A_8}{T_{pr}^2}\right]\rho_r^5 + A_{10}(1 + A_{11}\rho_r^2) \times \frac{\rho_r^2}{T_{pr}^3} exp[-A_{11}\rho_r^2] + 1$$

که در اینجا ρ_r چگالی نقصانی گاز است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_r = \frac{0.27P_{pr}}{zT_{pr}}$$

ثابت‌های A_1 تا A_{11} به‌وسیله رگرسیون ناخطی بر روی ۱۵۰۰ نقطه از نمودار (استندینگ-کتز) به‌دست آمده‌اند. مقادیر این ثابت‌ها به قرار زیر می‌باشند:

1. Beggs & Brill
2. Hall & Yarborough
3. Starling-Carnahan
4. Dranchuk and Abou Kassem

A_1=۰/۳۲۶۲ A_2=-۱/۰۷۰۰ A_3 = -۰/۵۳۳۹ A_4=۰/۰۱۵۶۹
A_5=-۰/۰۵۱۶۵ A_6 = ۰/۵۴۷۵ A_7 = -۰/۷۳۶۱
A_8 = ۰/۱۸۸۴ A_9 = ۰/۱۰۵۶ A_{10} = ۰/۶۱۳۴ A_{11} = ۰/۷۲۱۰

این فرمول در محدودهٔ ۰/۲≤Ppr<۳۰ & ۱<Tpr≤۳ جوابهای دقیقی می‌دهد.

۳- ارائه مدلی جدید برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گازها

این معادله که بر مبنای ۳۰۳۸ نقطه از نمودار (استندینگ-کتز) به‌دست آمده است به‌صورت زیر می‌باشد:

$$z = A + \frac{B+C}{D+E} \quad (۱)$$

که در اینجا

$$A = aT_r^{2.16} + bP_r^{1.028} + cP_r^{1.58}T_r^{-2.1} + dln(T_r)^{-0.5} \quad (۲)$$

$$B = e + fT_r^{2.4} + gP_r^{1.56} + hP_r^{0.124}T_r^{3.033} \quad (۳)$$

$$C = iln(T_r)^{-1.28} + jln(T_r)^{1.37} + kln(P_r) + l\ ln(P_r)^2 + mln(P_r)ln(T_r) \quad (۴)$$

$$D = 1 + nT_r^{5.55} + oP_r^{0.68}T_r^{0.33} \quad (۵)$$

$$E = pln(T_r)^{1.18} + qln(T_r)^{2.1} + rln(P_r) + sln(P_r)^2 + tln(P_r)ln(T_r) \quad (۶)$$

ضرایب موجود در معادلات (۱) تا (۶) در جدول (۱) آورده شده است. به‌منظور به‌دست آوردن این ضرایب، رگرسیون ناخطی انجام شده است.

معادله فوق (۱)، در محدودهٔ $۱/۱ \le T_r \le ۲$ و $۰/۲ \le P_r \le ۱۱$ جواب‌های دقیقی می‌دهد.

معادله جدیدی که در اینجا ارائه شد خطای کمتری در مقایسه با سایر معادلات دارد و ضریب تعیین آن نیز کمتر است. محاسبات خطا برای معادلات ذکر شده در این مطالعه و بررسی در جدول (۲) آورده شده است.

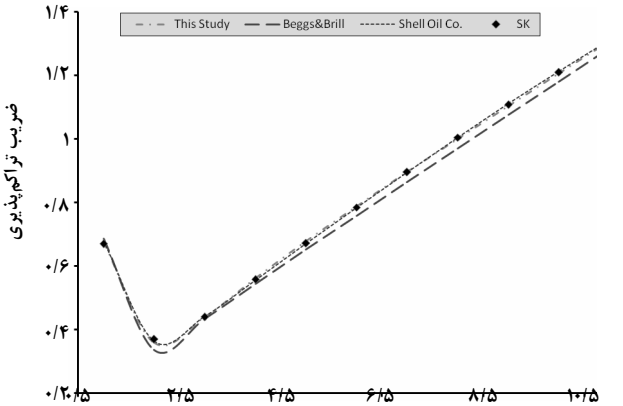
جدول ۱- ضرایب موجود در معادلات (۲) تا (۶)

ضرایب	مقادیر ضرایب	ضرایب	مقادیر ضرایب
k	-۲۴۴۴۹۱۱۴۷۹۱/۱۵۳۱	a	۰/۰۳۷۳۱۴۲۴۸۵۳۸۵۵۹۲
l	۱۹۳۵۷۹۵۵۷۴۹/۳۲۷۴	b	-۰/۰۱۴۰۸۰۷۱۵۱۴۸۵۳۶۹
m	-۱۲۶۳۵۴۷۱۷۹۱۶/۶۰۷	c	۰/۰۱۶۳۲۶۳۲۴۵۳۸۷۱۸۶
n	۶۲۳۷۰۵۶۷۸/۳۸۵۷۸۴	d	-۰/۰۳۰۷۷۷۶۴۷۸۸۱۹۸۱۳
o	۱۷۹۹۷۶۵۱۱۰۴/۳۳۳۰	e	۱۳۸۴۳۵۷۵۴۸۰/۹۴۳۸۰۰
p	۱۵۱۲۱۱۳۹۳۴۴۵/۰۶۴	f	-۱۶۷۹۹۱۳۸۵۴۰/۷۶۳۷۰۰
q	۱۳۹۴۷۴۴۳۷۹۹۷/۱۷۲	g	۱۶۲۴۱۷۸۹۴۲/۶۴۹۷۶۰۰
r	-۲۴۲۳۳۰۱۲۹۸۴/۰۹۵۰	h	۱۳۷۰۲۲۷۰۲۸۱/۰۸۶۹۰۰
s	۱۸۹۳۸۰۴۷۳۲۷/۵۲۰۵	i	-۴۱۶۴۵۵۰۹/۸۹۶۴۷۴۶۰۰
t	-۱۴۱۴۰۱۶۲۰۷۲۲/۶۸۹	j	۲۳۷۲۴۹۹۶۷۶۲۵/۰۱۳۰۰

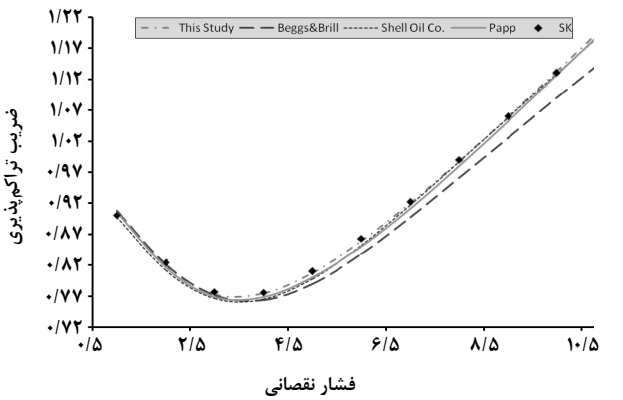
جدول ۲- محاسبات مربوط به دقت معادلات فوق (بر مبنای ۳۰۳۸ داده نمودار استندینگ-کتز)

	ضریب تعیین[1]	ریشه میانگین مربعات خطا[2]	میانگین خطای مطلق[3]	میانگین خطای نسبی[4]
رابطه به‌دست آمده	۰/۹۹۹۶۵	۰/۰۰۴۹۷	۰/۰۰۳۲۳	$۳/۵\times۱۰^{-۵}$
رابطه (درنچوک- ابوکاظم)	۰/۹۹۹۴۳	۰/۰۰۷۶۱	۰/۰۰۳۷۸	۰/۰۰۲۸۸
رابطه (هال- یاربروگ)	۰/۹۹۹۴۲	۰/۰۰۸۵۳	۰/۰۰۳۶۵	۰/۰۰۱۴۷
رابطه شرکت نفتی شل	۰/۹۹۷۸۵	۰/۰۱۱۹۶	۰/۰۰۷۱۲	-۰/۰۰۰۴۴
رابطه (بگز- بریل)	۰/۹۸۱۸۷	۰/۰۲۵۳۱	۰/۰۲۱۱۸	-۰/۰۱۷۳۴
رابطه پاپ	۰/۹۸۰۳۶	۰/۰۴۱۲۴	۰/۰۱۵۴۷	۰/۰۰۷۵۸

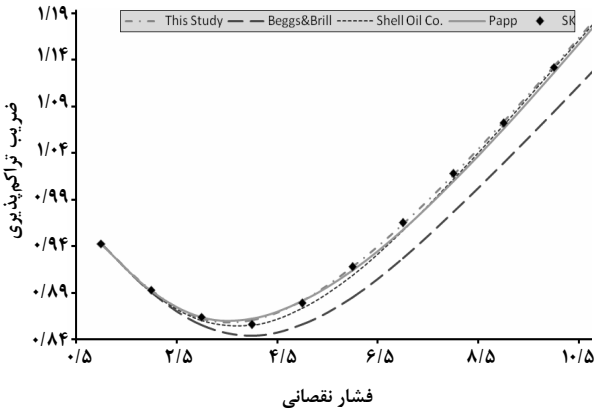
به‌منظور بهتر نشان دادن دقت معادله ارائه شده، جواب‌های حاصل از معادله فوق و روابط (بگز- بریل)، شرکت نفتی شل و پاپ به‌صورت نمودار رسم شده‌اند (شکل‌های (۱) تا (۴)).



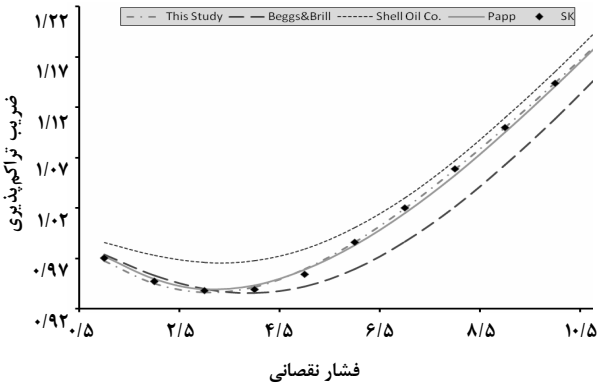
شکل ۱- ضریب تراکم‌پذیری در مقابل فشار نقصانی برای T_r=۱/۱



شکل ۲- ضریب تراکم‌پذیری در مقابل فشار نقصانی برای T_r=۱/۵



شکل ۳- ضریب تراکم‌پذیری در مقابل فشار نقصانی برای T_r=۱/۷



شکل ۴- ضریب تراکم‌پذیری در مقابل فشار نقصانی برای T_r=۲

لازم به ذکر است که علاوه بر روابط فوق، امروزه در صنعت گاز از روش‌هایی همچون AGA NX-19[۱۳] و MGERG-88 [۱۴] نیز

1. Coefficient of Determination
2. Root Mean Square Error
3. Average Value of Absolute Error
4. Average Value of Relative Error

برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گازها استفاده می‌شود که به دلیل کمتر بودن دقت آنها مخصوصاً برای گازهای ترش در مقایسه با نمودار (استندینگ-کتز) و متفاوت بودن شیوهٔ محاسبهٔ ضریب تراکم‌پذیری در آنها، جزء طبقه‌بندی موجود در این مقاله قرار نمی‌گیرند. دقت روش‌های فوق با ارائه مثال زیر، قابل ارزیابی است.

یک مخلوط گازی با مشخصات زیر موجود است. دمای این گاز $73^{\circ}F$ است، در حالی‌که فشار آن در حال زیاد شدن می‌باشد. در این مطالعه، ضریب تراکم‌پذیری گاز فوق در فشارهای مختلف، با استفاده از تمامی روش‌های ذکر شده محاسبه شده و نتایج به‌دست آمده بر روی شکل (۵) نشان داده می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

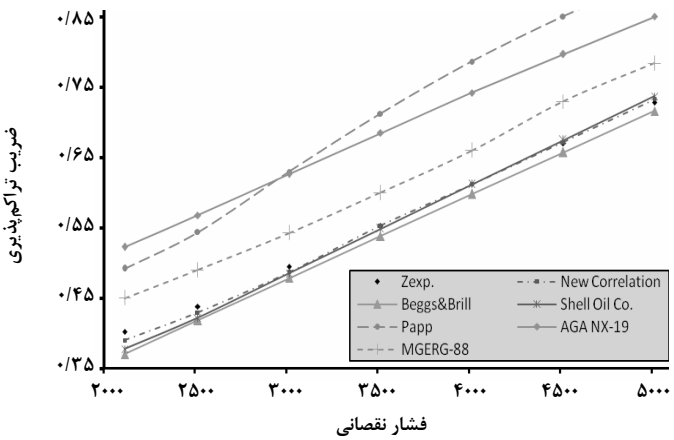
در این مقاله یک رابطه تجربی جدید برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری گازهای شیرین ارائه شد. معادله فوق بر مبنای ۳۰۳۸ نقطه از نمودار (استندینگ-کتز) به‌دست آمده است. مزیت این معادله، در مقایسه با معادلات معروف موجود مانند (درانچوک-ابوکاظم)، این است که صریح می‌باشد، بنابراین برای محاسبه ضریب تراکم‌پذیری نیاز به حدس و خطا ندارد. دقت معادله فوق با سایر معادلات مقایسه شده است که نتیجه این مقایسه، برتری این رابطه را در مقایسه با روابط دیگر نشان می‌دهد.

جدول ۳- خواص فیزیکی گاز نمونه

اجزای تشکیل‌دهنده	درصد مولی	جرم مولکولی	دمای بحرانی (رانکین)	فشار بحرانی (پوند بر اینچ مربع)
CO_2	۳/۱۹	۴۴/۰۱	۵۴۷/۴۵	۱۰۷۱
H_2S	۵۱/۳۷	۳۴/۰۷۶	۶۷۲/۴۵	۱۳۰۰
N_2	۲/۵۸	۲۸/۰۱۶	۲۲۷/۲۷	۴۹۳
C_1	۴۲/۴۱	۱۶/۰۴۳	۳۴۳/۰۴	۶۶۷/۸
C_2	۰/۲۴	۳۰/۰۷	۵۴۹/۷۶	۷۰۷/۸
C_3	۰/۰۷	۴۴/۰۹۷	۶۶۵/۶۸	۶۱۶/۳
iC_4	۰/۰۲	۵۸/۱۲۴	۷۳۴/۶۵	۵۲۹/۱
nC_4	۰/۰۳	۵۸/۱۲۴	۷۶۵/۳۲	۵۵۰/۷
iC_5	۰/۰۲	۷۲/۱۵۱	۸۲۸/۷۷	۴۹۰/۴
nC_5	۰/۰۱	۷۲/۱۵۱	۸۴۵/۳۷	۴۸۸/۶
nC_6	۰/۰۲	۸۶/۱۷۸	۹۱۳/۳۷	۴۳۶/۹
C_7+	۰/۰۴	۱۲۰	---------	--------

جدول ۴- داده‌های آزمایشگاهی گاز نمونه

دما (°F)	۷۳						
فشار (psi)	۵۰۱۴	۴۵۱۴	۴۰۱۴	۳۵۱۴	۳۰۱۴	۲۵۱۴	۲۱۱۴
ضریب انحراف آزمایشگاهی	۰/۷۲۸	۰/۶۷	۰/۶۱۲	۰/۵۵۳	۰/۴۹۵	۰/۴۳۸	۰/۴۰۲



شکل ۵- مقایسه ضرایب تراکم‌پذیری به‌دست آمده از روش‌های مختلف با داده‌های آزمایشگاهی برای گاز نمونه

۵- تشکر و قدردانی

در پایان، از شرکت ملی گاز ایران به خاطر حمایت مالی و همکاری‌های لازم در انجام این پروژه کمال تشکر را دارم.

۶- ضمیمه

تعریف پارامترهای خطای به‌کار رفته در این مقاله به شرح زیر هستند:

۱- خطای نسبی (E_i):

$$E_i = \left(\frac{z_{est.} - z_{exp.}}{z_{exp.}} \right) \times 100, \qquad i = 1,2,\cdots,n$$

$Z_{exp.}$: ضرایب تراکم‌پذیری تجربی.

$Z_{est.}$: ضرایب تراکم‌پذیری تخمینی توسط فرمول‌های تجربی.

۲- میانگین خطای نسبی (E_r):

$$E_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} E_i$$

۲- میانگین خطای مطلق (E_a):

$$E_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |E_i|$$

۴- ریشه میانگین مربعات خطا (E_{RMS}):

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (E_i)^2}$$

۵- ضریب تعیین (R^2):

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{(z_{exp.} - z_{ext.})_i^2}{\sum_{i=1}^{n} (z\,exp. - \bar{z})_i^2}$$

که در اینجا

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (z_{exp.})i$$

مراجع

[1] Xiang, H. W., "The Corresponding-States Principle and its Practice", Elsevier Science Book, 9-45, (2005).

[2] Elsharkawy, A. M., "Efficient Methods for Calculations of Compressibility, Density and Viscosity of Natural gases", Elsevier Paper, Fluid Phase Equilibria 218, 2, (2004).

[3] Elsharkawy, A. M. and Elkamel A., "Compressibility Factor for Sour Gas Reservoirs", Paper SPE 64284, 3, (2000).

[4] Mokhatab, S. and Poe, W. A. and Speight, J. G., "Handbook of Natural Gas Transmission and Processing", Elsevier Science Book, 13-14, (2006).

[5] Bahadori A., Mokhatab S., Towler B. F., "Rapidly Estimating Natural Gas Compressibility Factor", Journal of Natural Gas Chemistry 16, 349–353, (2007).

[6] Brown, G. G., "The Compressibility of Gases, Part I – Pure Gases", Pet. Eng., 21-24, Jan. (1940).

[7] Brown, G. G. and Holcomb, D.E., "The Compressibility of Gases, Part II – Gaseous Mixtures", Pet. Eng., 23-26, Feb. (1940).

[8] Najim, A. M., "Evaluation of Correlations for Natural Gas Compressibility Factors", A Thesis in Petroleum Eng., 9-10, Mar. (1995).

[9] Neeraj Kumar, B.Tech. "Compressibility Factors for Natural and Sour Reservoir Gases by Correlations and Cubic Equations of State", A Thesis in Petroleum Eng., 14, 15, 23, (2004).

[10] Guo, B. and Ghalambor, A., "Natural Gas Engineering Handbook", Pet. Eng. Handbook, 22-23, (2005).

[11] Guo, B. and Ghalambor, A., "Natural Gas Engineering Handbook", Pet. Eng. Handbook, 24-25, (2005).

[12] Elsharkawy, A. M., "Efficient Methods for Calculations of Compressibility, Density and Viscosity of Natural gases", Elsevier Paper, Fluid Phase Equilibria 218, 5, (2004).

[13] Zimmerman, Richard H., "Manual for Determination of Supercompressibility Factors", AGA E-book, 397, Dec. (1970).

[14] Jaeschke, M., Audibert, S., Van Caneghem, P., Humphreys, A. E., Janssen Van Rosmalen, R., Pellei, Q., Michels, J. P. J., Schouten, J. A., Ten Seldam, C. A., "High Accuracy Compressibility Factor Calculation for Natural Gases and Similar Mixtures by Use of a Truncated Virial Equation", GERG Technical Monograph TM2, 231, (1989).