

# ارائه یک معادله تجربی جدید برای پیش‌بینی گرانروی گاز

سید حمیدرضا یوسفی<sup>\*</sup>، علیرضا صناعی<sup>۱</sup> و علی ناصری<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- پژوهشگاه صنعت نفت

تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۸

## چکیده

گرانروی گاز یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهندسی نفت می‌باشد، به طوری که گرانروی، جریان گاز در محیط متخلخل، چاه و خطوط لوله را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا تعیین مقدار دقیق آن در فشار و دمای عملیاتی (به ویژه در شرایط مخزن) هیدروکربوری بسیار حائز اهمیت است. گرانروی گاز در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری است؛ ولی آزمایشات مربوط به آن پرهزینه و زمان‌بر می‌باشند. در ایران نیز تاکنون دستگاه آزمایشگاهی اندازه‌گیری گرانروی گاز وجود نداشته است. با توجه به این شرایط معمولاً برای محاسبه گرانروی گاز از روابط و معادلات تجربی استفاده می‌شود. در این مقاله یک رابطه تجربی جدید برای پیش‌بینی گرانروی گازها ارائه شده است. این رابطه تجربی جدید با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، تکنیک‌های آماری و بهینه‌سازی خطی به دست آمده است. اعتبارسنجی این معادله تجربی با رسم مقادیر پیش‌بینی شده گرانروی گاز بر حسب فشار در دماهای مختلف صورت گرفته است. نتایج مقایسه این معادله با معادلات تجربی ارائه شده قبلی برای داده‌های واقعی نشان می‌دهد که این رابطه از دقت و صحت بالاتری نسبت به روابط گذشته برخوردار است.

**کلمات کلیدی:** گرانروی گاز، شبکه عصبی مصنوعی، معادله تجربی، رگرسیون چندمتغیره، بهینه‌سازی خطی

## مقدمه

می‌باشد. محاسبه دقیق گرانروی گاز از اهمیت بسیار بالایی در محاسبات مهندسی نفت برخوردار است، به طوری که یک خطای اندک در محاسبه گرانروی تاثیر زیادی بر معادلات جریان می‌گذارد. روش‌های آزمایشگاهی (مانند استفاده از انواع ویسکومترها) جهت به دست آوردن گرانروی گاز پرهزینه، مشکل و همراه با محدودیت‌های بسیار است [۱]. در کشور ما، هنوز ابزار آزمایشگاهی دقیقی برای اندازه‌گیری گرانروی گاز وجود ندارد.

گرانروی سیال، مقاومت یک سیال در برابر اعمال تنش برشی می‌باشد. هر فازی در مقابل حرکات توده‌های خود دارای مقاومت است. این مقاومت برای فاز گاز ناچیز و برای مایعات بیشتر است. علی‌رغم مقدار پایین گرانروی برای گازها، گرانروی ترکیبات گاز پارامتری مهم جهت بررسی جریان سیال در محیط متخلخل، چاه و خطوط لوله

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی

s.hamidreza.yousefi@gmail.com

از دما، فشار و جرم مولکولی گاز می باشد. محدوده دمایی این رابطه تجربی به ترتیب بین ۳۲ تا ۴۰۰ °F می باشد و برای فشارکاهشی کمتر از ۲۰ معتبر است (معمولا تا فشار ۱۲۰۰۰ پام). در این رابطه تاثیر اجزای غیر هیدروکربنی تا غلظت مولی ۱۵٪ لحاظ شده است. محاسبه گر انرژی در این روش شامل سه مرحله است. در مرحله اول در فشار اتمسفریک با استفاده از دما و وزن مخصوص گاز، گر انرژی محاسبه می شود (شکل ۱). سپس تصحیحات وجود اجزای غیر هیدروکربنی مانند  $H_2S$ ،  $CO_2$  و  $N_2$  لحاظ می شود و در مرحله پایانی با استفاده از شکل ۲ نسبت گر انرژی ( $\mu/\mu_1$ ) در فشار عملیاتی محاسبه شده و در نتیجه گر انرژی پیش بینی می شود [۳].

#### رابطه LGE<sup>۲</sup>

این روش معروف ترین و پرکاربردترین رابطه تجربی برای پیش بینی گر انرژی گاز است که لی، گنزالس و ایکن در سال ۱۹۶۶ آن را پیشنهاد داده اند.

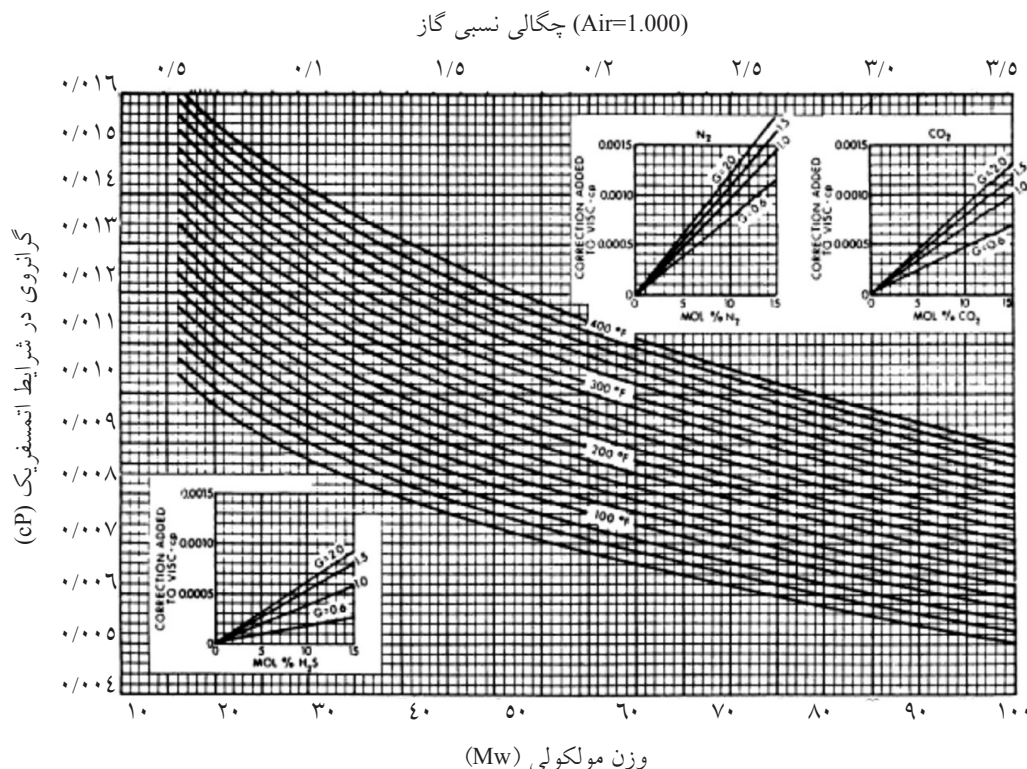
با توجه به دلایل ذکر شده، معمولا مهندسان نفت به روابط تجربی بسنده می کنند. گر انرژی گاز به دما، فشار و ترکیب گاز وابسته است. این معادلات تجربی، گر انرژی گاز را به صورت تک مرحله ای (مستقیم) یا دو مرحله ای محاسبه می کنند. در روابط تک مرحله ای، گر انرژی گاز با تنها یک رابطه و به طور مستقیم محاسبه می شود؛ اما در روابط دو مرحله ای ابتدا گر انرژی در دماهای دلخواه و فشار پایین (مع مولا فشار اتمسفریک) تخمین زده شده و سپس به کمک یک رابطه دیگر، در فشارهای بالاتر محاسبه می شود [۲].

#### مروری بر کارهای گذشته

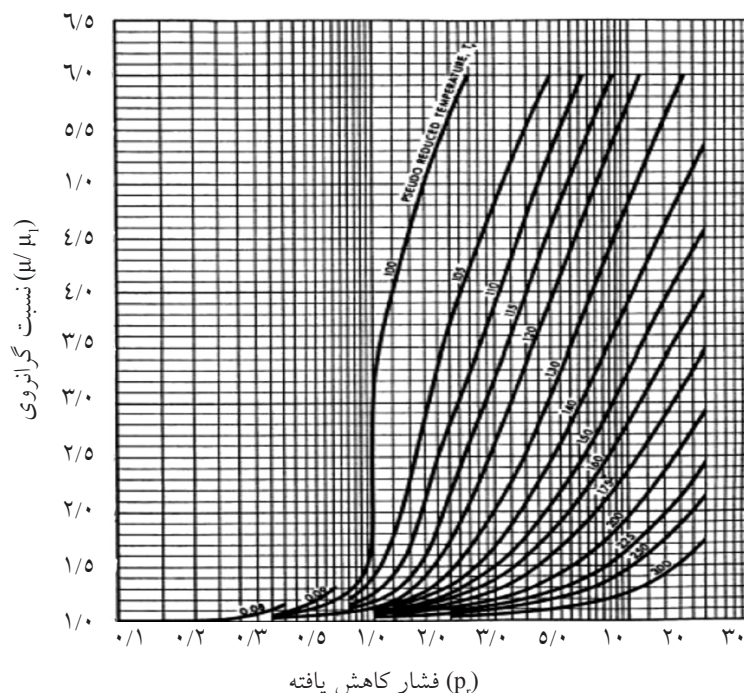
به طور کلی، تلاش های زیادی جهت پیش بینی گر انرژی گاز در شرایط دما و فشاری مختلف در سال های اخیر انجام شده است. در زیر تعدادی از مهم ترین آن ها به طور خلاصه آورده شده است.

#### نمودار تجربی کر و همکاران

این روش، به صورت گرافیکی و دو مرحله ای می باشد. بر اساس این روش که در سال ۱۹۵۴ ارائه شد، گر انرژی تابعی



شکل ۱- گر انرژی گاز در فشار ۱ atm بر حسب وزن مولکولی گاز به همراه ترکیبات وجود اجزای غیر هیدروکربوری  $H_2S$ ،  $N_2$  و  $CO_2$  (مرحله اول و دوم محاسبه گر انرژی گاز از روش گرافیکی کر و همکاران) [۳]



شکل ۲- نسبت گرانیوی به گرانیوی به دست آمده در شکل ۱ برحسب شبه فشار کاهش یافته (مرحله سوم محاسبه گرانیوی گاز از روش کر و همکاران) [۳]

ترکیبات غیر هیدروکربوری را بر گرانیوی گاز در نظر گرفته و در معادلات دخالت داد. این معادله برای گازهایی با محدوده گرانیوی گاز بین ۰/۵۵ و ۱/۵۵ cp و دمای بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ °F اعتبار دارد. او همچنین با استفاده از همان رابطه  $\mu/\mu_1$  در معادله دمپسی گرانیوی در فشارهای بالاتر را تخمین زد [۶]. رابطه دمپسی، و استندینگ در معادلات ۵ تا ۱۰ آمده است. در این معادلات  $b_1$  تا  $b_{16}$  ضرایب عددی ثابت هستند.

$$\mu_1(\text{uncorrected}) = \left[ 1.709(10^{-5}) - 2.062(10^{-6})\gamma_g \right] T + 8.188(10^{-3}) - 6.15(10^{-3}) \log \gamma_g \quad (5)$$

$$N_2 \text{ correction} = y_{N_2} \left[ 8.43(10^{-3}) \log \gamma_g + 9.59(10^{-3}) \right] \quad (6)$$

$$CO_2 \text{ correction} = y_{CO_2} \left[ 9.08(10^{-3}) \log \gamma_g + 6.24(10^{-3}) \right] \quad (7)$$

$$H_2S \text{ correction} = y_{H_2S} \times \left[ 8.49(10^{-3}) \log \gamma_g + 3.73(10^{-3}) \right] \quad (8)$$

$$\mu_1 = (\mu_1 \text{uncorrected}) + (N_2 \text{ correction}) + (H_2S \text{ correction}) + (CO_2 \text{ Correction}) \quad (9)$$

آنها از ۳۰۰۰ مخلوط مختلف هیدروکربوری استفاده کردند. بازه دمایی و فشاری این رابطه به ترتیب بین ۱۰۰ تا ۳۴۰ °F و ۱۰۰ تا ۸۰۰۰ پام می باشد. میزان درصد مولی  $CO_2$  در ترکیبات این معادله تجربی در محدوده ۰/۹ تا ۳/۲٪ قرار دارد و دیگر ترکیبات اسیدی در مخلوط آنها وجود ندارد. این روابط در معادلات ۱ تا ۴ آمده است. داده های ورودی برای این رابطه تجربی، چگالی دما و جرم مولکولی گاز می باشند [۴].

$$\mu = 10^{-4} K \exp(Xp^Y) \quad (1)$$

که ۳ پارامتر  $K$ ،  $X$  و  $Y$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$K = \frac{(9.4 + 0.02M_w)T^{1.5}}{209 + 19M_w + T} \quad (2)$$

$$X = 3.5 + \left( \frac{986}{T} \right) + 0.01M_w \quad (3)$$

$$Y = 2/4 - 0/2 X \quad (4)$$

#### رابطه دمپسی<sup>۱</sup> و استندینگ<sup>۲</sup>

دمپسی در سال ۱۹۶۵ رابطه پیشنهادی خود را بر اساس تعریفی از  $\mu_1$  (گرانیوی در فشار اتمسفریک) و  $\mu/\mu_1$  برای محاسبه گرانیوی در فشارهای بالاتر ارائه داد [۵]. استندینگ در سال ۱۹۷۷ معادلات خود را بر اساس نمودارهای کر و همکاران، جهت محاسبه گرانیوی در فشار اتمسفریک و دمای مخزن ارائه کرد. او همچنین اثر

1. Dempsey  
2. Standing

قالب معادلات ۲۱ تا ۲۵ ارائه کرد. او با تغییراتی در معادله LGE یک رابطه جدید ارائه کرد و نشان داد که رابطه او از معادلات قبلی کارآمدتر است [۸].

$$\mu_g \xi = 10^{-4} \left[ 0.807 T_{pr}^{0.618} - 0.357 \exp(-0.449 T_{pr}) + 0.340 \exp(-4.058 T_{pr}) + 0.018 \right] \quad (21)$$

$$\mu = \mu_g \exp(X \rho^Y) \quad (22)$$

$$\xi = 0.949 \left( \frac{T_{pc}}{M_w^3 P_{pc}^4} \right)^{1/6} \quad (23)$$

$$X = 3.47 + \left[ \frac{1.588}{T} \right] + 0.0009 M_w \quad (24)$$

$$Y = 1/66378 - 0/04679X \quad (25)$$

در این مطالعه، یک معادله تجربی جدید برای تخمین گرانیوی ترکیبات گازی هیدروکربنی و غیر هیدروکربنی با استفاده از روش تک مرحله ای ارائه شده است.

در ابتدا با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پارامترهای عملیاتی که تاثیر بیشتری بر گرانیوی گاز دارند، انتخاب شده و سپس با استفاده از رگرسیون گیری چندمتغیره خطی، شکل نهایی معادلات به دست آمده و در نهایت با استفاده از نرم افزار لینگو<sup>۲</sup> ضرایب بهینه مدل محاسبه شده است.

### شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی یک مدل محاسباتی است که از ساختار شبکه های عصبی در زیست شناسی اقتباس شده است. این شبکه‌ها شامل گروهی از نرون‌های مصنوعی متصل به هم است که اطلاعات را با فرآیندی خاص مورد پردازش قرار می‌دهند. این فرآیند در بسیاری از موارد با توجه به داده‌های ورودی و خروجی، یک سیستم منطبق برای شبکه خودش ایجاد می‌کند. شبکه عصبی شامل اجزای سازنده لایه‌ها و وزن‌ها می‌باشد. رفتار شبکه نیز وابسته به ارتباط بین اعضا می‌باشد. در حالت کلی در شبکه‌های عصبی سه نوع لایه نرونی وجود دارد که عبارتند از:  
- لایه ورودی: دریافت اطلاعات خامی که به شبکه تغذیه شده است.

$$\ln \left[ \left( \frac{\mu}{\mu_1} \right) T_r \right] = b_1 + b_2 P_r + b_3 P_r^2 + b_4 P_r^3 + T_r (b_5 + b_6 P_r + b_7 P_r^2 + b_8 P_r^3) + T_r^2 (b_9 + b_{10} P_r + b_{11} P_r^2 + b_{12} P_r^3) + T_r^3 (b_{13} + b_{14} P_r + b_{15} P_r^2 + b_{16} P_r^3) \quad (10)$$

### معادله لوکاس<sup>۱</sup>

لوکاس در سال ۱۹۸۱ با استفاده از پارامترهای دما، جرم مولکولی و فشار شبه بحرانی رابطه‌ای را برای گرانیوی گاز پیشنهاد کرد که در معادلات ۱۱ تا ۱۸ آمده است. این رابطه برای فشارهای پایین تر (زیر ۱۰۰ پام) کاربرد بیشتری دارد و نتایج دقیقی در این محدوده فشاری دارد [۷].

$$\mu_g \xi = 10^{-4} \left[ 0.807 T_{pr}^{0.618} - 0.357 \exp(-0.449 T_{pr}) + 0.340 \exp(-4.058 T_{pr}) + 0.018 \right] \quad (11)$$

$$\xi = 0.949 \left( \frac{T_{pc}}{M_w^3 P_{pc}^4} \right)^{1/6} \quad (12)$$

$$\mu / \mu_g = 1 + \frac{A_1 P_r^{1.3088}}{A_2 P_r^{A_5} + (1 + A_3 P_r^{A_4})^{-1}} \quad (13)$$

$$A_1 = \frac{0.001245 \exp(5.1726 T_r^{-0.3286})}{T_r} \quad (14)$$

$$A_2 = A_1 (1/655 T_r - 1/272) \quad (15)$$

$$A_3 = \frac{0.4489 \exp(3.0578 T_r^{-37.7332})}{T_r} \quad (16)$$

$$A_4 = \frac{1.7368 \exp(2.2310 T_r^{-7.6351})}{T_r} \quad (17)$$

$$A_5 = 0/9425 \exp(-0/1853 T_r^{0/4489}) \quad (18)$$

### رابطه چن<sup>۲</sup>

گوربانف و داداش‌زاده با استفاده از رگرسیون گیری از داده‌های تجربی در بازه دمایی ۳۱۰/۸ تا ۴۷۷/۴ k و جرم مولکولی گاز بین ۱۶ تا ۱۰۰ معادله خود را پیشنهاد کردند. چن در سال ۱۹۹۳ این معادله تجربی را بهینه‌سازی کرد و آن را در قالب معادلات ۱۹ و ۲۰ ارائه نمود [۱]. در این معادله ضرایب  $a_1$  تا  $a_4$  و  $b_1$  تا  $b_9$  ثابت‌های عددی هستند

$$\mu_1 = (a_1 + a_2 T_K) - (a_3 + a_4 T_K) \sqrt{M_w} \quad (19)$$

$$\frac{\mu}{\mu_1} = (b_1 + b_2 P_r + b_3 P_r^2) \frac{1}{T_r} + (b_4 + b_5 P_r + b_6 P_r^2) \frac{1}{T_r^4} + (b_7 + b_8 P_r + b_9 P_r^2) \quad (20)$$

### معادله ساتون<sup>۳</sup>

او در سال ۲۰۰۵ روابط پیشنهادی خود را بر اساس ۲۲۶۴ داده از گاز میعانی و ۳۲۰۰ داده از گازهای همراه نفت در

1. Lucas  
2. Chen  
3. Sutton  
4. LINGO

### روش کار

در این قسمت ابتدا درباره چگونگی جمع آوری داده‌ها بحث شده است. سپس در مرحله بعد، نحوه به کار بردن شبکه عصبی مصنوعی و بهینه‌سازی خطی و رگرسیون چند متغیره برای ایجاد تابع جدید توضیح داده شده است.

### جمع آوری داده‌ها

در این مطالعه از یک سری کامل داده‌ها که از منابع مختلف گردآوری شده است، استفاده شده است. در این داده‌ها دما، فشار، ترکیب مولکولی و چگالی به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری و گزارش شده است. لازم به ذکر است که در ایران تاکنون ابزار آزمایشگاهی اندازه‌گیری گرانیوی گاز وجود نداشته است و بنابراین داده‌ای تجربی برای گرانیوی گاز وجود ندارد. این داده‌ها شامل ۲۴۴۵ مخلوط دوتایی گازهای هیدروکربنی و غیر هیدروکربنی مانند  $N_2$  و  $CO_2$  است. این مخلوط‌ها در محدوده فشاری و دمایی مناسبی هستند که متناسب داده‌های گازی مخازن ایران نیز می‌باشد. مقادیر کمینه و بیشینه دما، فشار، وزن مولکولی، چگالی و گرانیوی گاز این داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- محدوده خواص استفاده شده در بانک داده‌ها

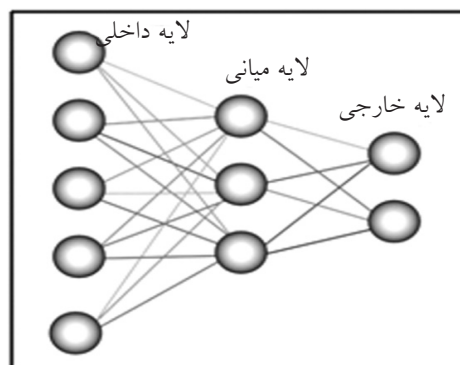
مقدار کمینه	مقدار بیشینه	خاصیت گاز
۱۰۰	۴۶۰	دما ( $^{\circ}F$ )
۱۴/۷	۱۰۰۰۰	فشار (پام)
۱۶/۰۴۳	۵۳/۹۱۵	جرم مولکولی ( $lb/lb_{mol}$ )
۰/۰۰۱	۰/۵۷۱	چگالی ( $g/cc$ )
۰	۳/۲	جزء مولی $CO_2$ (%)
۰	۴/۸	جزء مولی $N_2$ (%)

### انتخاب پارامترهای موثر با استفاده از شبکه عصبی

در این مقاله از شبکه‌های عصبی برای بررسی میزان تاثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی که همان گرانیوی گاز است؛ استفاده شده است. بدین منظور تعداد ۳۷۳ داده به‌طور تصادفی از بانک داده‌ها استخراج گردیده است. شبکه ساخته شده شامل ۸ پارامتر وابسته از جمله:  $T_{pr}$ ،  $P_{pr}$ ،  $P_{pc}$ ،  $T_{pc}$ ،  $\rho$ ،  $T$ ،  $P$ ،  $Mw$ ،  $\rho$  و گرانیوی گاز به‌عنوان پارامترهای ورودی و گرانیوی گاز به‌عنوان پارامتر خروجی است. پارامترهای ورودی بر اساس روابط تجربی و شناخته شده قبلی انتخاب شده‌اند.

- لایه‌های پنهان: عملکرد این لایه‌ها به وسیله ورودی‌ها و وزن ارتباط بین آنها و لایه‌های پنهان تعیین می‌شود. وزن بین واحدهای ورودی و پنهان نشان‌دهنده تاثیر هر یک از لایه‌هاست.

- لایه خروجی: عملکرد واحد خروجی بسته به فعالیت واحد پنهان و وزن ارتباط بین واحد پنهان و خروجی می‌باشد. شکل ۳، یک شبکه عصبی فرضی را با یک لایه مخفی و سه گره نشان می‌دهد [۹].



شکل ۳- شماتیک شبکه عصبی مصنوعی با یک سه گره و یک لایه مخفی

### بهینه‌سازی

بهینه‌سازی از مهم‌ترین ابزارهای ریاضیات کاربردی در مسائل امروز است که از مهندسی گرفته تا اقتصاد و پزشکی کاربرد دارد. شکل کلی مسائل بهینه‌سازی در معادلات ۲۶ تا ۲۸ آمده است.

$$\min (\max) f(x) \quad (X \in R^n) \quad (26)$$

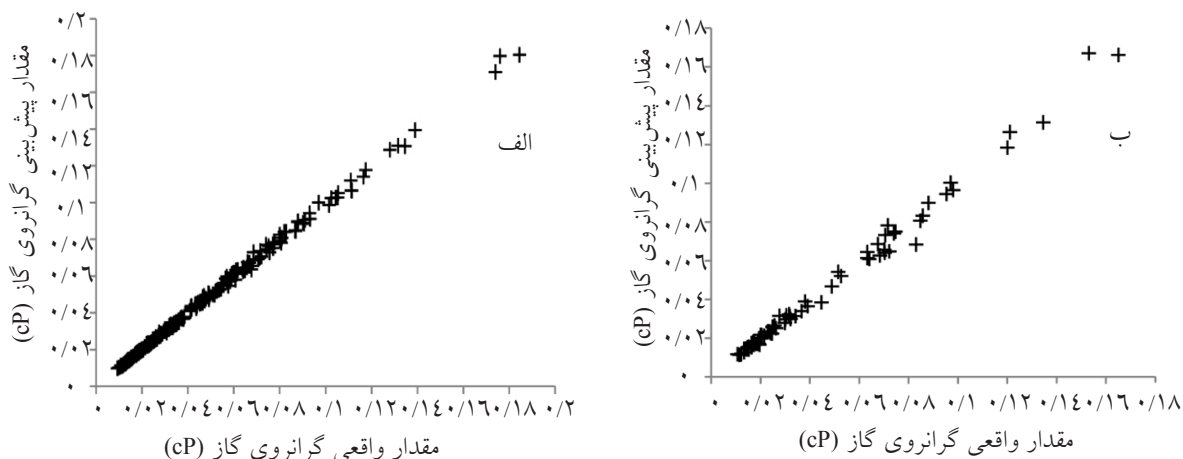
$$g_i(x) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,m_1 \quad (27)$$

$$g_i(x) = 0 \quad i=m_1+1,\dots,m_1+n \quad (28)$$

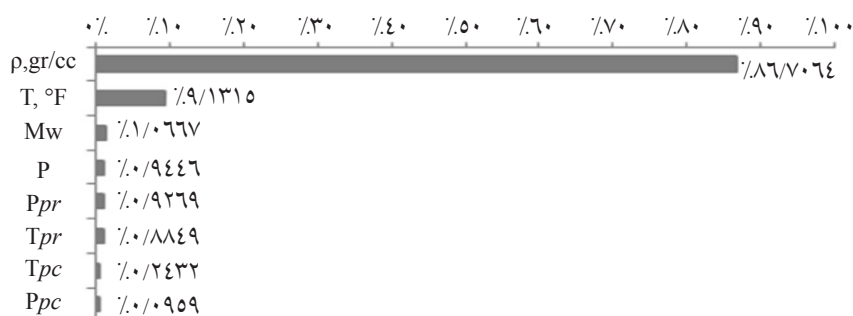
در حالتی که  $m$  برابر با صفر باشد؛ مسئله بهینه‌سازی بدون محدودیت و قید و شرط خواهد بود. اگر تابع هدف یا حداقل یکی از محدودیت‌ها غیر خطی باشد، مسئله بهینه‌سازی غیر خطی خواهد بود. برای حل مسائل بهینه‌سازی روش‌های متعددی وجود دارد. در این مقاله هدف از استفاده از بهینه‌سازی، مینیمم کردن میزان خطای موجود بین گرانیوی گاز محاسبه شده با گرانیوی گاز به‌دست آمده از آزمایشات است. به عبارت دیگر ضریب‌های معادله تجربی به نحوی محاسبه شوند که کمترین میزان خطا بین رابطه پیشنهادی و مشاهدات آزمایشگاهی وجود داشته باشد. برای این کار از نرم‌افزار لینگو استفاده شد [۱۰].

مقادیر واقعی در نظر گرفته شد. روش GRNN<sup>۱</sup> بهترین نتایج را در مقایسه با روش‌های دیگر ارائه کرد. خطای داده‌های آموزش و تست به ترتیب ۱/۷۵٪ و ۴/۹۶٪ شد. بعضی از نتایج این روش در جدول ۲ آمده است. با توجه به نتایج شکل ۵، برای کم کردن پارامترهای ورودی از میان ۸ پارامتر، ۴ پارامتر اصلی با میزان تاثیر بیشتر انتخاب شد و ادامه مطالعات بر مبنای پارامترهای فشار، دما، جرم مولکولی و دانسیته گاز صورت گرفت.

در نرم‌افزار لینگو ۲۹۸ داده به‌عنوان داده آموزش (train) و ۷۵ داده به‌عنوان داده تست استفاده شده است. شکل ۴ نشان‌دهنده نتایج آموزش و تست گرفته شده در نرم‌افزار است. این خروجی‌ها حاکی از این است که تست گرفته شده نتایج معقول و دقیقی را ارائه می‌دهد. در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار مقدار تاثیر هر یک از پارامترها مشخص گردیده است. شکل ۵ میزان تاثیر ۸ پارامتر ورودی را نشان می‌دهد. در نرم‌افزار، تلرانس بدترین پیش‌بینی برابر با ۱۰٪



شکل ۴- مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده گرانروی گاز از شبکه عصبی الف- برای داده‌های آموزش (سمت چپ) و ب- داده‌های تست



شکل ۵- تاثیر نسبی هر یک از پارامترهای ورودی به شبکه

جدول ۲- نتایج شبکه عصبی با روش GRNN

داده‌های تست	داده‌های آموزش	خلاصه
۷۵	۲۹۸	تعداد نمونه‌ها
۹/۳۳	۰	درصد پیش‌بینی‌های بد
۰/۰۰۳۳۶۹	۰/۰۰۱۱۷۵	مقدار R <sup>2</sup>
۰/۰۰۲۱۱۹	۰/۰۰۰۷۶۵۳	متوسط قدر مطلق خطای نسبی
۰/۰۰۲۶۲۰	۰/۰۰۰۸۹۲۰	انحراف معیار (SD)

1. General Regression Neural Network

## توسعه معادله تجربی جدید

رابطه جدید بر مبنای  $\rho$ ،  $M_w \cdot P$ ،  $T$  پارامتر ورودی و بررسی می‌شود. برای به دست آوردن رابطه جدید با استفاده از رگرسیون چند متغیره بهترین تابع که بر خروجی‌ها برازش بهتری دارد انتخاب می‌شود. مبنای محاسبات و در واقع تابع هدف، کمینه کردن متوسط قدر مطلق خطای نسبی و در نتیجه بیشینه کردن  $R^2$  برای هر تابع در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین پارامترهایی که برای ارزیابی روابط ارائه شده، بررسی می‌شوند،  $ARE$ ،  $AARE$  و  $SD$  می‌باشند که در معادلات ۲۹ تا ۳۲ آمده است.

$$E_i = \left( \frac{X_{exp} - X_{est}}{X_{exp}} \right) \times 100 \quad (i=1, 2, \dots, n_d) \quad (29)$$

$$ARE = \frac{1}{n_d} \sum_1^{n_d} E_i \quad (30)$$

$$AARE = \frac{1}{n_d} \sum_1^{n_d} |E_i| \quad (31)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n_d - 1} \sum_1^{n_d} (E_i - AARE)^2} \quad (32)$$

پس از مشخص شدن تابع جدید، در مرحله دوم از نرم افزار لینگو برای بهینه‌سازی ضرایب در تابع استفاده شد. در این نرم افزار حل معادلات بر اساس بهینه‌سازی خطی صورت می‌گیرد. با استفاده از کد نویسی در این نرم‌افزار و وارد کردن  $\rho$  پارامتر ورودی و پارامتر خروجی، تابع هدف، کمینه کردن متوسط قدر مطلق خطای نسبی میان مقدار گرانیوز آزمایشگاهی و مقدار پیش بینی شده در نظر گرفته شد که در معادله ۳۳ نشان داده شده است.

$$f(x) = \min \left( \left| \frac{\mu_{exp} - \mu_{est}}{\mu_{exp}} \right| \right) \quad (33)$$

رگرسیون چند متغیره و همچنین بهینه‌سازی خطی برای توسعه رابطه جدید استفاده شد.

این رابطه تجربی در معادلات ۳۴ تا ۳۹ آمده است.

$$\mu = P_3(\rho) + P_3\left(\frac{M_w}{T}\right) + P_3(T^\rho) + P_3(P^\rho) + P_3(M_w^\rho) \quad (34)$$

$$P_3(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 \quad (35)$$

$$P_3\left(\frac{M_w}{T}\right) = b_1\left(\frac{M_w}{T}\right) + b_2\left(\frac{M_w}{T}\right)^2 + b_3\left(\frac{M_w}{T}\right)^3 \quad (36)$$

$$P_3(T^\rho) = c_1(T^\rho) + c_2(T^\rho)^2 + c_3(T^\rho)^3 \quad (37)$$

$$P_3(M_w^\rho) = e_1(M_w^\rho) + e_2(M_w^\rho)^2 + e_3(M_w^\rho)^3 \quad (38)$$

$$P_3(M_w^\rho) = e_1(M_w^\rho) + e_2(M_w^\rho)^2 + e_3(M_w^\rho)^3 \quad (39)$$

که ضرایب موجود در این رابطه در جدول ۳ آمده است.

## بررسی اعتبارسنجی و دقت معادله جدید

در این بخش با استفاده از معادلات جدید توسعه یافته، میزان صحت آن در برابر نمودارهای موجود و همچنین دقت آن را در مقایسه با روابط گذشته سنجیده می‌شود.

## اعتبارسنجی معادله جدید

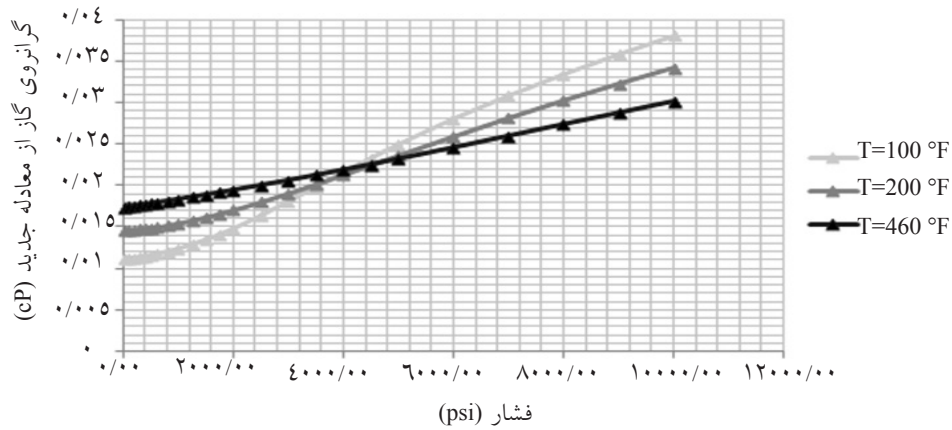
یک روش مطمئن برای بررسی این معادله تجربی، تست اعتبارسنجی است. برای سنجش صحت مدل ارائه شده، تعدادی داده به صورت تصادفی از بانک داده‌ها در سه دمای متفاوت ۱۰۰، ۲۲۰ و ۴۶۰ °F انتخاب شدند. گرانیوز گاز از مدل جدید بر حسب فشار در هر سه دما رسم شد (شکل ۶). در حالت کلی با کاهش فشار، گرانیوز گاز کاهش پیدا می‌کند. در فشارهای پایین نیز، با افزایش دما، گرانیوز گاز افزایش یافته، در حالیکه در فشارهای بالا، گرانیوز گاز با دما رابطه معکوس دارد. این رفتار به دلیل این است که گاز در فشار بالا رفتار مایع گونه به خود گرفته و لذا با افزایش دما گرانیوز آن کم می‌شود.

این رفتارها و تاثیر دما و فشار بر گرانیوز گاز پیش‌بینی شده به خوبی در شکل ۶ نمایان است. بنابراین صحت مدل با استفاده از پدیده‌های فیزیکی مورد تایید است.

## دقت معادله جدید

برای اندازه‌گیری میزان صحت رابطه پیشنهادی در مقایسه با روابط قبلی، با استفاده از داده‌ها، گرانیوز گاز با استفاده از معادله ارائه شده و روابط گذشته محاسبه شد و با داده‌های گرانیوز واقعی مقایسه شد. شکل ۷ نمودار گرانیوز تخمینی بر حسب گرانیوز واقعی است که برای رابطه ارائه شده در این مقاله در مقایسه با پنج رابطه دیگر دقت بالاتری دارد. از این شکل نیز نتیجه می‌شود که رابطه پیشنهادی در مقایسه با روابط قبلی همگرایی بیشتری به سمت خطای صفر نشان می‌دهد. جدول ۴ نیز برای هر یک از روابط میزان متوسط قدر مطلق خطای نسبی، متوسط خطای نسبی و انحراف معیار را نشان می‌دهد. داده‌های این جدول نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی صحیح‌ترین و دقیق‌ترین پیش‌بینی را برای محاسبه گرانیوز گاز ارائه می‌کند.

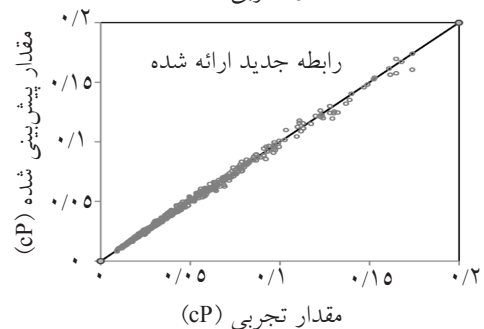
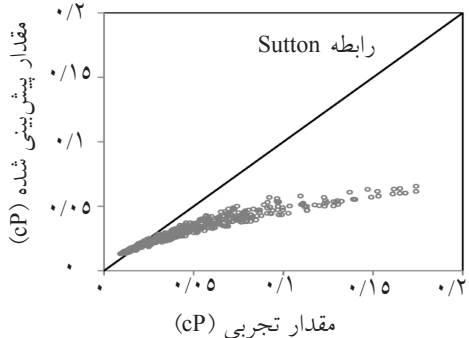
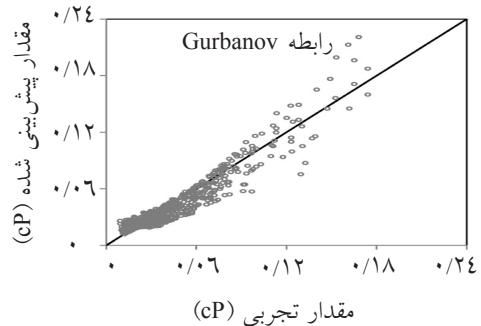
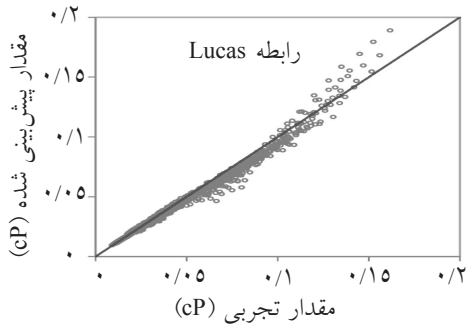
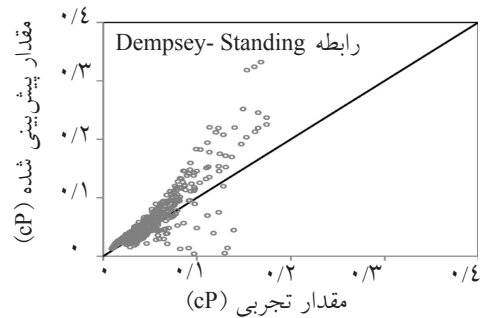
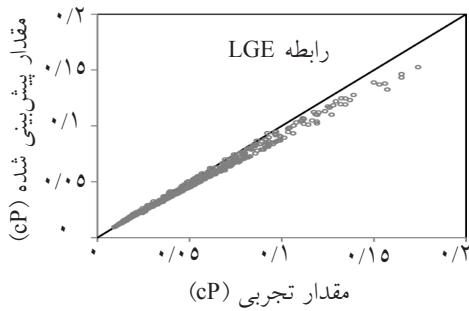
1. R-squared
2. Average Relative Error
3. Absolute Average Relative Error
4. Standard Deviation



شکل ۶- گرانروی پیش‌بینی شده گاز، از رابطه جدید برحسب فشار در سه دمای متفاوت

جدول ۳- ضرایب موجود در رابطه جدید ارائه شده

$a_0 = 0.1977132 \text{ (cp)}$	$a_1 = 0.2274942 \text{ (cp.g}^{-1}.\text{cm}^3)$	$a_2 = 0.2726357 \text{ (cp.g}^{-2}.\text{cm}^6)$	$a_3 = 0.2118326 \text{ (cp.g}^{-3}.\text{cm}^9)$
$b_1 = 0.1290755 \text{ (cp.R.g}^{-1}.\text{gmole)}$	$b_2 = 0.5052971 \text{ (cp.R.g}^{-2}.\text{gmole}^2)$	$b_3 = 0.6643018 \text{ (cp.R.g}^{-3}.\text{gmole}^3)$	$c_1 = 0.0358553 \text{ (cp.R}^{-\text{cm}^{-2}})$
$c_2 = -3/93944 e^{-\epsilon} \text{ (cp.R}^{-2}.\text{g}^{-\text{cm}^{-3}})$	$c_3 = 7/274715 e^{-\epsilon} \text{ (cp.R}^{-3}.\text{g}^{-\text{cm}^{-3}})$	$d_1 = 0.5019175 e^{-\epsilon} \text{ (cp.psi}^{-\text{g}^{-\text{cm}^{-3}})$	$d_2 = -2/12763 e^{-\epsilon} \text{ (cp.psi}^{-2}.\text{g}^{-\text{cm}^{-3}})$
$d_3 = 1/94621 e^{-9} \text{ (cp.psi}^{-3}.\text{g}^{-\text{cm}^{-3}})$	$e_1 = 0.026518 \text{ (cp.g/gmole}^{-\text{g}^{-\text{cm}^{-3}})$	$e_2 = 2/93349 e^{-\epsilon} \text{ (cp.g/gmole}^{-2}.\text{g}^{-\text{cm}^{-3}})$	$e_3 = 5/214413 e^{-9} \text{ (cp.g/gmole}^{-3}.\text{g}^{-\text{cm}^{-3}})$



شکل ۷- مقادیر پیش‌بینی شده گرانروی گاز برحسب مقادیر تجربی جهت مقایسه روابط موجود و رابطه توسعه یافته (ارائه شده) در این مقاله (اعداد برحسب cp)



## نتیجه‌گیری

در این مقاله یک رابطه ریاضی تجربی جدید برای پیش‌بینی گرانشی گاز با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، رگراسیون چند متغیره و بهینه‌سازی خطی ارائه شده است. این معادله، با استفاده از بانک داده‌های زیادی از مخلوط‌های هیدروکربوری در یک محدوده قابل قبول برای دما، فشار و جرم مولکولی تهیه شده است. این محدوده خواص حتی برای شرایط فشار و دمای بالا نیز قابل اتکا می‌باشد. معادله ارائه شده، از فرایند تک مرحله‌ای استفاده کرده و شامل ۵ عبارت چندجمله‌ای درجه سوم بر حسب پارامترهای فشار، دما، چگالی و جرم مولکولی و یا ترکیبی از اینهاست. با توجه به محاسبات انجام شده، رابطه جدید کم‌ترین مقدار خطای متوسط و انحراف معیار را دارد و بنابراین دقیق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی گرانشی گاز می‌باشد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از زحمات دکتر احسان دوانی برای فراهم کردن داده‌های مورد نیاز تشکر کنند. بی‌شک بدون وجود بانک داده‌ها ارائه رابطه جدید مقدور نبود.

## علائم و نشانه‌ها

AARE: قدرمطلق متوسط درصد خطای نسبی  
 ARE: متوسط درصد خطای نسبی  
 E<sub>i</sub>: درصد خطای نسبی  
 M<sub>w</sub>: متوسط جرم مولکولی  
 P: فشار (Psi)  
 P<sub>c</sub>: فشار بحرانی (Psi)  
 P<sub>pc</sub>: فشار شبه بحرانی (Psi)  
 P<sub>r</sub>: فشار کاهش (بدون بعد)  
 P<sub>pr</sub>: فشار شبه کاهش (بدون بعد)  
 SD: انحراف معیار  
 T: دما (°F)  
 T<sub>c</sub>: دمای بحرانی (°F)  
 T<sub>k</sub>: دما (K)  
 T<sub>r</sub>: دمای کاهش  
 T<sub>pc</sub>: دمای شبه بحرانی (°F)  
 X<sub>est</sub>: T<sub>pr</sub>  
 X<sub>exp</sub>: γg  
 μ: گرانشی گاز (cP)  
 μ<sub>1</sub>: گرانشی گاز در فشار اتمسفریک (cP)  
 چگالی گاز (gr/cc)

## مراجع

- [1]. Chen Z. A. and Ruth D. W., *On the viscosity correlation of natural gas*, The CIM 1993 annual technical conference, Calgary. 1993.
- [2]. William D. McCain, Jr., *The properties of petroleum fluids*, Second Edition, Pennwell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, ISBN 0-87814-335-1. 1990.
- [3]. Carr N. L., Kobayashi R., and Burrows D. B., "Viscosity of hydrocarbon gases under pressure", American Institute of Mechanical Engineers, Vol 201:pp 264-272. 1954.
- [4]. Leea. L., Gonzalez M. H. and Eain B. E. "The Viscosity of Natural Gases", Journal of Petroleum Technology, Vol 18 No 8, pp. 997-1000. 1966.
- [5]. DEMPSEY J. R., "Computer routine treats gas viscosity as a variable", Oil and Gas Journal, pp. 141. 1965.
- [6]. Standing M. B., *Volumetric and phase behaviour of oil field hydrocarbon systems*, Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, 1977.

- [7]. Poling B. E., Prausnitz J. M., and O'Connell J. P., *The properties of gases and liquids*, 5<sup>th</sup> Edition, McGrawHill. Chapter 9, 2001
- [8]. Sutton R. P., *Fundamental PVT calculations for associated and gas/condensate natural gas systems*, SPE 97099, SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, U.S.A, 2005.
- [9]. Fausett L. *Fundamentals of neural networks*, USA: Prentice Hall Company, 1994.
- [10]. Avriel Mordecai, *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*. Dover Publishing. 2003.