

## توسعه‌ی رابط‌های جدید محاسبه‌ی نرخ تولید کاهنده‌ی اچ‌های نفتی برای یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران

امیرمسعود فولادگر<sup>۱\*</sup>، امیرحسین محمدی المونی<sup>۲</sup>، شرکت مهندسی و توسعه‌ی نفت

### چکیده

از دیدگاه مهندسی بهره‌برداری و مخازن، اندازه‌گیری یا محاسبه‌ی دقیق نرخ جریان چندفازی چاه‌های تولیدی در مدیریت بهینه‌ی تولید میدان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اما با توجه به هزینه‌ی زیاد و دشواری عملیاتی اندازه‌گیری مستمر نرخ تولید همه‌ی چاه‌های یک میدان، از هفت دهه قبل محققان مختلف برای توسعه‌ی رابط‌های دقیق برای محاسبه‌ی نرخ تولید چاه با استفاده از فشار سرچاهی و اندازه‌ی کاهنده در تلاش بوده‌اند. اما از آنجا که هر یک از این روابط بر اساس مشخصات سیال یک میدان مشخص توسعه داده شده‌اند استفاده از آنها برای میادین دیگر، در اکثر موارد نتایج رضایت‌بخشی ندارد. بنابراین توسعه‌ی رابط‌های اختصاصی محاسبه‌ی نرخ تولید چاه‌ها برای میادین کشور با استفاده از اطلاعات همان میدان می‌تواند نقش به‌سزایی در افزایش دقت محاسبات داشته باشد. میدان مورد مطالعه از میادین جنوب غربی ایران است که نفت چهار مخزن مختلف در آن برداشت می‌شود. با توجه به اینکه تا کنون هیچ رابط‌های پیش‌بینی کننده‌ی نرخ اختصاصی برای این میدان توسعه داده نشده، ابهامات و خطاهای زیادی در تاریخچه‌ی آمار تولید چاه‌های میدان ایجاد شده است. در این مطالعه پس از جمع‌آوری و کنترل کیفیت تمامی اطلاعات آزمایش‌های اندازه‌گیری نرخ تولید چاه‌ها و با استفاده از روش خطی‌سازی<sup>۱</sup> و برازش خطی<sup>۲</sup>، رابط‌های جدید برای محاسبه‌ی نرخ تولید چاه‌ها با ساختاری نسبتاً متفاوت از روابط شناخته شده‌ی قبلی توسعه داده شد که بر مبنای ارزیابی‌های به‌عمل آمده، خطای مطلق میانگین و انحراف معیار آن نسبت به نرخ تولید اندازه‌گیری شده، به‌طور قابل توجهی کمتر از سایر روابط شناخته شده‌ی قبلی است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۲/۱۰

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۴/۲۱

### واژگان کلیدی:

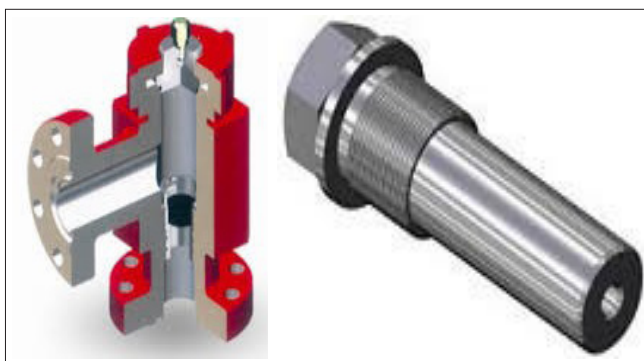
رابطه‌ی محاسبه‌ی نرخ جریان، کاهنده‌ی سرچاهی، جریان بحرانی، گیلبرت، بکسندال

### مقدمه

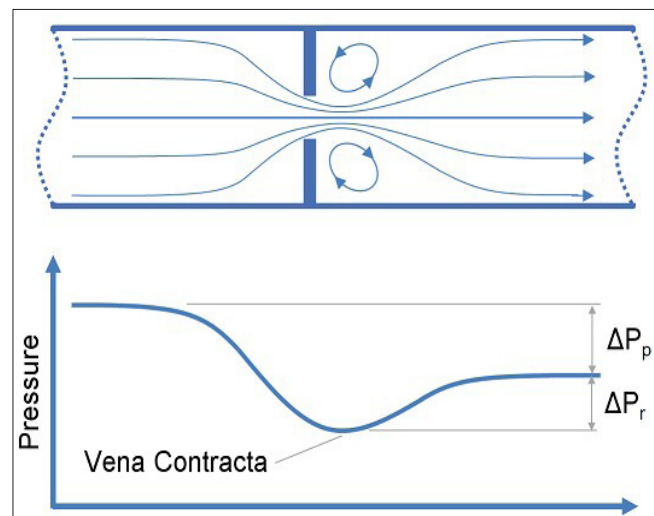
کاهنده، کاهش‌دهنده‌ی موضعی در سطح مقطع یک لوله است که منجر به شتاب‌دهی به جریان سیال و در نهایت افت فشار می‌شود. کاهنده‌های سرچاهی به‌عنوان عامل محدود کننده‌ی نرخ تولید چاه‌ها به‌کار می‌روند. به‌طور کلی دو نوع کاهنده‌ی ثابت و متغیر وجود دارد. استفاده از کاهنده در مسیر چاه منجر به تثبیت فشار سرچاهی و در نتیجه تولید پایدار از چاه خواهد شد.

افت فشار در طول کاهنده بسیار حائز اهمیت است. هیچ رابط‌های کلی که بتواند افت فشار در طول کل کاهنده را برای تمامی سیالات تولیدی محاسبه کند وجود ندارد. مدل‌های جریان

به‌طور معمول نرخ تولید بهینه و صیانتی چاه‌های یک میدان کمتر از پتانسیل تولید چاه است. در چنین شرایطی تولید چاه باید محدود و کنترل شود تا از بروز پدیده‌های آسیب‌زا برای مخزن مانند مخروط‌شدگی گاز، مخروط‌شدگی آب، رسوب آسفالتین، تولید ماسه و ... جلوگیری شود که برای این منظور از کاهنده‌ی سرچاهی استفاده می‌شود.



شکل ۱ | کاهنده‌ی ثابت



شکل ۲ | شماتیک کاهنده و پروفایل فشاری در طول کاهنده

\* نویسنده‌ی عهد در مکاتبات (Fuladgar@gmail.com)

متعددی برای پیش‌بینی نرخ عبوری از کاهنده وجود دارد که بر اساس خواص سیال (به‌طور خاص نسبت گاز به مایع تولیدی) و رژیم جریان (جریان صوتی و زیر صوتی) توسعه داده شده‌اند. با توجه به اینکه از نظر اصول بهینه‌سازی تولید، کاهنده‌های سرچاهی باید همواره در حالت جریان بحرانی<sup>۴</sup> تنظیم شوند در این مطالعه با هدف کاهش خطای محاسبه‌ی نرخ تولید چاه‌ها، تنها توسعه‌ی رابطه‌ای جدید برای محاسبه‌ی نرخ جریان سیال گذرنده از کاهنده در شرایط بحرانی تشریح شده است.

۱- محاسبه‌ی نرخ جریان تک‌فاز مایع درون کاهنده  
زمانی که فشار جریان سیال مایع در طول کاهنده به دلیل تغییرات انرژی جنبشی افت می‌کند می‌توان معادله‌ی پیش‌بینی نرخ سیال را به شکل رابطه‌ی ۱- نوشت:

۲- محاسبه‌ی نرخ جریان تک‌فاز گاز از درون کاهنده

معادلات فشار جریان برای گاز در کاهنده با در نظر گرفتن فرآیند ایزوتروپیک<sup>۵</sup> محاسبه می‌شوند. نرخ جریان گاز از درون کاهنده را می‌توان از رابطه‌ی ۲- محاسبه کرد:

$$q_{sc} = 1248 C_D A_2 P_{up} \times \sqrt{\frac{k}{(k-1)\gamma_g T_{up}} \left[ \left( \frac{p_{dn}}{p_{up}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{dn}}{p_{up}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2)$$

در این رابطه  $q_{sc}$  نرخ جریان گاز بر حسب هزار فوت مکعب استاندارد در روز،  $p_{up}$  فشار بالادست کاهنده بر حسب پام مطلق،  $A_2$  مساحت سطح مقطع کاهنده بر حسب اینچ مربع،  $T_{up}$  دمای بالادست کاهنده بر حسب رنکین<sup>۶</sup>،  $\gamma_g$  شتاب گرانش و  $\gamma_g$  وزن مخصوص گاز نسبت به هواست.

۱- محاسبه‌ی نرخ جریان تک‌فاز مایع درون کاهنده

در این رابطه  $q$  نرخ جریان سیال بر حسب  $ft^3/s$ ،  $C_D$  ضریب تخلیه‌ی کاهنده،  $A$  سطح مقطع کاهنده و  $\rho$  ضریب تبدیل گرانش<sup>۵</sup>

$$q = C_D A \sqrt{\frac{2g_c \Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

۳- محاسبه‌ی نرخ جریان چندفازی از درون کاهنده  
زمانی که نفت تولیدی از چاه به کاهنده‌ی سرچاهی می‌رسد معمولاً فشاری کمتر از فشار نقطه‌ی حباب دارد. چرا که مقداری گاز در طول کاهنده آزاد می‌شود. رفتار کاهنده با توجه به میزان گاز آزاد شده و همچنین رژیم جریانی (صوتی و زیرصوتی) متفاوت خواهد بود. بنابراین محاسبه‌ی نرخ جریان چندفازی از درون کاهنده برای جریان چندفازی بسیار پیچیده‌تر از جریان تک‌فازی است. بر اساس تاریخچه‌ی تحقیقات، محاسبه‌ی نرخ جریان سیال چندفازی از درون کاهنده با دو رویکرد تحلیلی و روابط تجربی توسط محققان مختلف انجام شده که توضیح روابط

۱ | متغیرهای روابط تجربی شناخته شده‌ی محاسبه‌ی نرخ جریان کاهنده

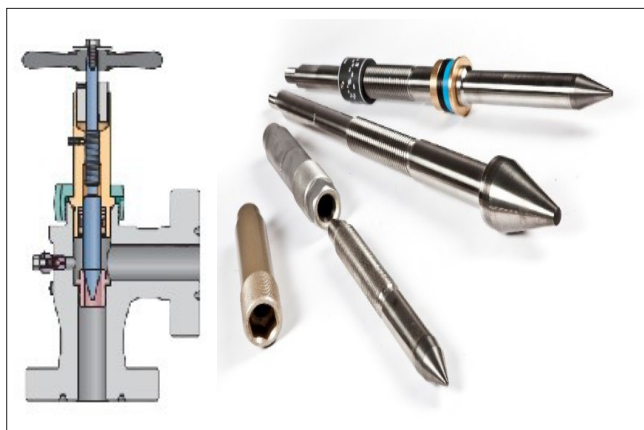
رابطه	A	B	C
گیلبرت	۰/۱	۱/۸۹	۰/۵۴۶
راس	۰/۰۵۷۴	۲	۰/۵
بکسندل	۰/۱۰۴	۱/۹۳	۰/۵۴۶
آچانگ	۰/۲۶۱۷	۱/۸۸	۰/۶۵

۲ | داده‌های استفاده شده در مقاله

سازند	کل داده‌های جمع‌آوری شده	داده‌های کنترل کیفیت شده
سروک	۱۱۲	۹۸
کژدمی	۱۶	۱۴
گدوان	۲۳	۱۹
فهلپان	۱۵	۱۱
مجموع	۱۶۶	۱۴۲

۳ | متغیرهای رابطه‌ی جدید محاسبه‌ی نرخ جریانی کاهنده‌ی مختص میدان مورد نظر مطابق ساختار رابطه‌ی ۴-  
میدان مورد نظر مطابق ساختار رابطه‌ی ۴-  
متغیر

مقدار	متغیر
۰/۳۱۳۵۴۵	A
۰/۸۰۷۹۴۷	B
۱/۷۴۰۵۶۵	C
۰/۴۰۷۶۷۶	D



شکل ۳ | کاهنده‌ی متغیر

تحلیلی خارج از چارچوب اهداف این مقاله است.

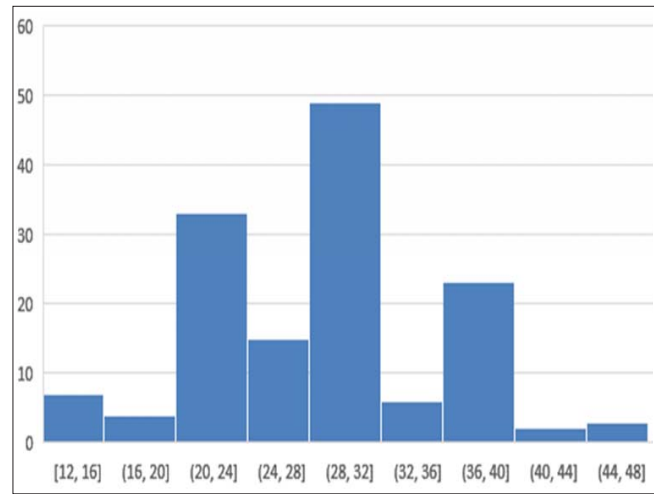
۴- روابط تجربی

نخستین تحقیق در زمینه‌ی توسعه‌ی رابطه‌ی تجربی محاسبه‌ی جریان چندفازی سیال درون کاهنده در ۱۹۴۹ توسط تانگرن<sup>۸</sup> [۱] و همکارانش انجام شد. این کار تنها در شرایطی که مایع، فاز پیوسته است (نسبت حجمی گاز به مایع کمتر از یک) کاربرد دارد. در ۱۹۵۴ گیلبرت<sup>۹</sup> [۲] نخستین رابطه‌ی تجربی را پیشنهاد داد برای این کار از داده‌های ۲۶۸ آزمایش چاه استفاده کرد. بکسندل<sup>۱۰</sup> [۳] دومین رابطه‌ی تجربی را ارائه داد. در ۱۹۶۰ راس<sup>۱۱</sup> [۴] کار تانگرن و همکارانش را گسترش داد و مدل مربوط به حالتی که گاز فاز پیوسته است را پیشنهاد کرد. در ۱۹۶۱ نیز آچانگ<sup>۱۲</sup> [۵] سومین رابطه‌ی تجربی را ارائه کرد. پس از آن در ۱۹۶۳ پوتمن و بک<sup>۱۳</sup> [۶] مدل رأس را برای سهولت در استفاده‌ی میدانی به واحد میدانی در آورده و مدل نهایی را به صورت تصویری ارائه کردند. در ۱۹۶۹ اومانان<sup>۱۴</sup> [۷] با استفاده از سیستم آب و گاز طبیعی آزمایش‌هایی انجام داد و رابطه‌ی را به دست آورد. گستره‌ی داده‌های مورد استفاده توسط اومانان اندازه‌ی کاهنده‌ی "۴/۶۴" تا "۱۴/۶۴" و بیشینه‌ی نرخ تولیدی جریان‌های بحرانی و زیربحرانی ارائه کرد. آشفورد<sup>۱۵</sup> در سال ۱۹۷۵ رابطه‌ی برای جریان زیربحرانی ارائه کرد.

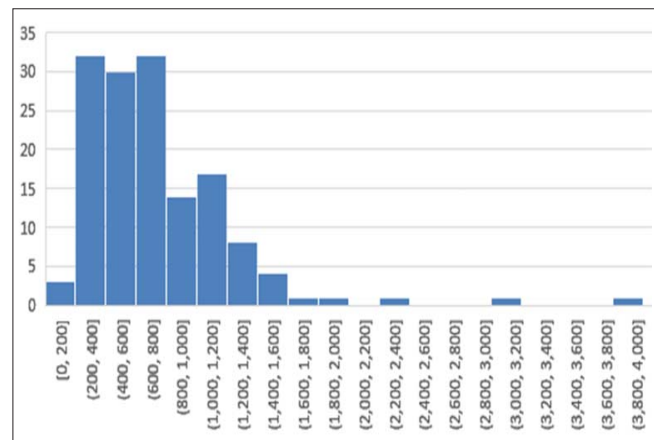
تانگرن یک آنالیز رفتاری روی انبساط یک سیستم گاز مایع انجام داد. وی نشان داد زمانی که حباب‌های گاز به یک سیال تراکم‌ناپذیر که سرعتی بیش از سرعت بحرانی دارد اضافه شوند سیستم قادر نخواهد بود تغییرات فشار را به بالادست کاهنده اعمال کند. بر این مبنا معادلات زیادی که در بالا به برخی از آنها اشاره شد توسعه داده شده‌اند که تقریباً همگی ساختار مشابه ساختار رابطه‌ی ۳- دارند.

$$Q = \frac{A \cdot WHP \cdot ChokeSize^B}{GLR^C} \quad (3)$$

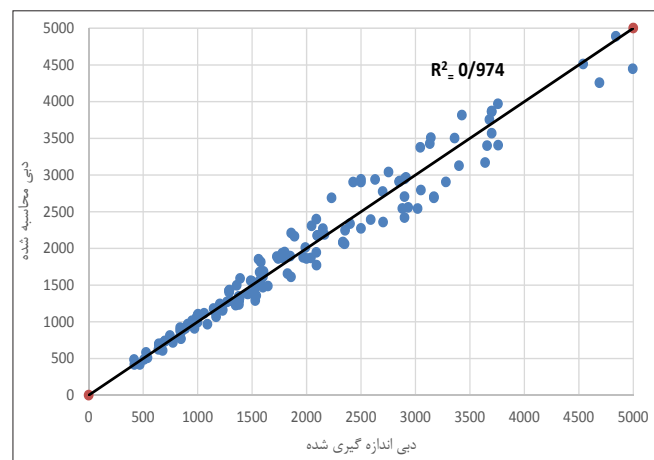
در این رابطه WHP فشار سرچاهی بر حسب پوند بر اینچ مربع نسبی، Choke Size اندازه‌ی کاهنده بر حسب ۱/۶۴ و GLR نسبت گاز به مایع تولیدی بر حسب SCF/STB است. در این مطالعه جهت ارزیابی و مقایسه با رابطه‌ی جدید از برخی روابط تجربی شناخته شده با ساختار رابطه‌ی ۳- استفاده شده که نام و مقادیر متغیرهای مربوط به این روابط تجربی در جدول ۱- ارائه شده است.



شکل ۴ نمودار توزیع فراوانی داده‌ها بر حسب اندازه‌ی کاهنده



شکل ۵ نمودار توزیع فراوانی داده‌ها بر حسب فشار جریان سرچاهی



شکل ۶ مقایسه‌ی داده‌های حاصل از آزمایش و محاسبه شده با استفاده از معادله‌ی جدید پیش‌بینی نرخ

همان‌گونه که اشاره شد در این مطالعه ساختار مشابه رابطه‌ی ۴- جهت توسعه‌ی رابطه‌ی اختصاصی پیش‌بینی نرخ تولید کاهنده برای میدان مورد نظر استفاده شد. با توجه به غیرخطی بودن متغیرهای چهارگانه‌ی این رابطه، برای انجام برازش خطی، باید ابتدا رابطه‌ی مربوطه خطی‌سازی شود. رابطه‌ی ۵- ساختار رابطه‌ی ۴- پس از خطی‌سازی شدن را نمایش می‌دهد.

$$Q = \log(A) + B \cdot \log(WHP) + C \cdot \log(\text{Choke size}) - D \cdot \log(\text{GLR}) \quad (5)$$

هدف از آنالیز برازش چند گانه یافتن رابطه‌ی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته است. در این مطالعه با استفاده از روش برازش خطی روی داده‌های کنترل کیفیت شده، متغیرهای کلی رابطه‌ی ۴- محاسبه گردید که در جدول ۳- نشان داده شده است.

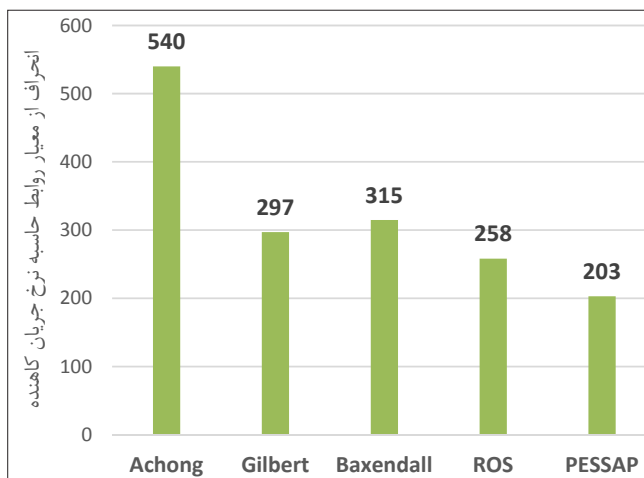
بنابراین پس از بازگردانی ساختار رابطه‌ی ۵- به شکل رابطه‌ی ۳- می‌توان رابطه‌ی جدید را به شکل زیر بازنویسی کرد.

$$Q = 0.3135 \frac{WHP^{0.807947} \cdot \text{ChokeSize}^{1.740565}}{\text{GLR}^{0.407676}} \quad (6)$$

نمودار زیر داده‌های واقعی را در مقابل داده‌های تخمینی در مقایسه با خط ایده‌آل  $X=Y$  نشان می‌دهد. پراکندگی نقاط و فاصله از شیب یک خطای تخمین را نشان می‌دهد که ضریب تشخیص ۰/۹۷۴ بیانگر همبستگی مناسب میان داده‌های تخمین زده شده و داده‌های واقعی است.

#### ۷- اعتبارسنجی رابطه‌ی جدید

جهت اعتبارسنجی و ارزیابی دقت رابطه‌ی جدید، مقدار



شکل ۸ | انحراف از معیار روابط مختلف محاسبه‌ی نرخ جریان کاهنده

اخیراً طی مطالعات انجام شده روی روابط جریان کاهنده مدل منعطف‌تر و قوی‌تری توسعه داده شده که می‌تواند نرخ عبوری از کاهنده را با دقت بیشتری تخمین بزند. فرم کلی معادله‌ی پیش‌بینی کننده‌ی نرخ تولید کاهنده که در این مطالعه نیز استفاده شده طبق رابطه‌ی ۴- است [۸].

$$Q = A \frac{WHP^B \cdot \text{ChokeSize}^C}{\text{GLR}^D} \quad (4)$$

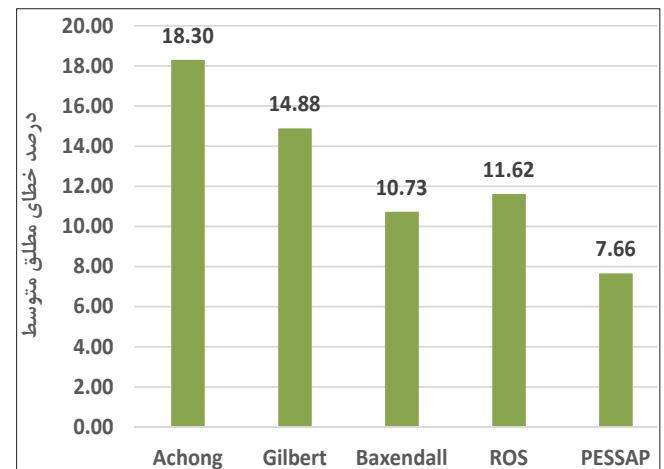
در این رابطه WHP فشار سرچاهی بر حسب پوند بر اینچ مربع نسبی، Choke Size اندازه‌ی کاهنده بر حسب ۱/۶۴ اینچ و GLR نسبت گاز به مایع تولیدی بر حسب SCF/STB است.

#### ۵- گردآوری داده‌ها

در گام اول این مطالعه گستره‌ی وسیعی از داده‌های حاصل از آزمایش‌های اندازه‌گیری نرخ تولید چاه‌های میدان در طول سال‌های گذشته گردآوری شد. با توجه به آنکه این داده‌ها به صورت میدانی جمع‌آوری شده و احتمال خطا در آنها زیاد است تمامی داده‌ها کنترل کیفیت شده و داده‌های نامعتبر مشخص و حذف گردید. جدول ۲- تعداد داده‌های اولیه و داده‌های کنترل کیفیت شده را بر حسب لایه‌ی مخزنی نشان می‌دهد.

در شکل‌های ۴ و ۵ توزیع فراوانی داده‌های کنترل کیفیت شده بر حسب اندازه‌ی کاهنده و محدوده‌ی فشار جریان سرچاهی نشان داده شده است.

#### ۶- برازش خطی چند متغیره ۱۷



شکل ۷ | درصد خطای مطلق میانگین روابط مختلف محاسبه‌ی نرخ جریان کاهنده

■ نظر به اینکه اغلب آزمایش‌های اندازه‌گیری نرخ جریان چاه‌های این میدان روی اندازه‌ی کاهنده‌ی میانگین انجام شده، افزایش خطای محاسبه برای اندازه‌ی کاهنده‌ی کوچک‌تر از "۱۶/۶۴ و بزرگ‌تر "۴۲/۶۴ دور از انتظار نیست.

■ با توجه به تعداد محدود داده‌های آزمایش‌های اندازه‌گیری نرخ جریان در سازندهای کژمی، گدوان و فهلیان، افزایش خطای محاسبه‌ی نرخ جریان برای این سازندها نسبت به میانگین خطای رابطه‌ی اختصاصی جدید دور از انتظار نیست.

#### پیشنهادها

■ پیشنهاد می‌شود در آزمایش‌های آتی اندازه‌گیری نرخ جریان چاه‌ها، تا حد امکان نرخ جریان روی کاهنده‌های کوچک‌تر از "۱۶/۶۴ و بزرگ‌تر از "۴۲/۶۴ نیز اندازه‌گیری شود.

■ باتوجه به در جریان بودن آزمایش‌های اندازه‌گیری بیشتر در میدان، پیشنهاد می‌شود نرخ تولید چاه‌ها در شرایط جریان زیربحرانی نیز اندازه‌گیری شود تا در مرحله‌ی بعدی روابط محاسبه‌ی نرخ جریان زیربحرانی کاهنده نیز ارزیابی شده و در صورت نیاز روابط حاکم بر مبنای مشخصات سیال تولیدی میدان شخصی‌سازی شوند. ■

خطای مطلق میانگین و انحراف از معیار نرخ جریان محاسبه شده با استفاده از رابطه‌ی جدید و سایر روابط شناخته شده برای تمامی داده‌های مورد استفاده و همچنین برای داده‌های جدیدی که پس از انجام مطالعه جمع‌آوری گردید محاسبه شد. بر اساس نتایج حاصل که در شکل‌های ۷و۸ نشان داده شده رابطه‌ی جدید (PSSAP<sup>1</sup>) توانسته خطای مطلق میانگین و انحراف از معیار محاسبه‌ی نرخ تولید چاه‌ها را به‌طور قابل توجهی نسبت به سایر روابط شناخته شده‌ی پیشین بهبود ببخشد.

#### نتیجه‌گیری

■ نتایج این مطالعه نشان می‌دهد توسعه‌ی رابطه‌ی اختصاصی محاسبه‌ی نرخ جریان کاهنده برای هر یک از میدان کشور می‌تواند دقت محاسبه‌ی نرخ جریان چاه‌های آن میدان را نسبت به استفاده از روابط قدیمی شناخته شده به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

■ با توجه به خطاهای متفاوت ابزاری و انسانی معمول حین عملیات آزمایش‌های اندازه‌گیری نرخ جریان چاه، اعتبارسنجی و حذف داده‌های نامعتبر تأثیر به‌سزایی در افزایش کیفیت رابطه‌ی اختصاصی دارد.

#### پانویس‌ها

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1. Choke                           | 10. Baxandall                               |
| 2. Linearization                   | 11. Ross                                    |
| 3. Regression                      | 12. Achong                                  |
| 4. Critical flow                   | 13. Poettmann& Beck                         |
| 5. Gravitational conversion factor | 14. Omana                                   |
| 6. Isentropic                      | 15. Fortunati                               |
| 7. Rankin                          | 16. Ashford                                 |
| 8. Tangren                         | 17. Multivariable linear regression         |
| 9. Gilbert                         | 18. Production Engineering & Studies- South |

#### منابع

- [1] Tangren, R. F., C. H. Dodge, and H. S. Seifert. "Compressibility effects in two-phase flow." *Journal of Applied Physics* 20.7 (1949): 637645-.
- [2] Gilbert, W. E. "Flowing and gas-lift well performance." *Drilling and production practice*. American Petroleum Institute, 1954.
- [3] Baxendell, P. B. "Bean performance-lake wells." *Shell Internal Rep* (1957).
- [4] Ros, N. C. J. "An analysis of critical simultaneous gas/liquid flow through a restriction and its application to flowmetering." *Applied Scientific Research* 9.1 (1960): 374.
- [5] Achong, I. "Revised bean performance formula for Lake Maracaibo wells." *internal company report, shell Oil Co., Houston* (1961).
- [6] Poettmann, F. H., and R. L. Beck. "New charts developed to predict gas-liquid flow through chokes." *World Oil* 184.3 (1963): 95100-.
- [7] Omana, R., et al. "Multiphase flow through chokes." *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Society of Petroleum Engineers, 1969.
- [8] Khorzoughi, Mohammad Babaei, Mahmoud Safar Beiranvand, and Mohammad Reza Rasaei. "Investigation of a new multiphase flow choke correlation by linear and non-linear optimization methods and Monte Carlo sampling." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 3.4 (2013): 279285-.