

# بررسی مدل جدید حسن و کبیر و تاثیر روابط مختلف ضریب اصطکاک بر پیش‌بینی افت فشار جریان دوفازی در چاه‌های نفتی عمودی

جواد جفایی و اسماعیل لکزیان\*

گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۵

## چکیده

در این مقاله، معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی برای جریان دوفازی به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شوند و خواص سیالات با روابط PVT به دست می‌آیند. برای اولین بار شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی در سه چاه نفتی با مدل‌های مختلف اریکوزسکی، حسن و کبیر قدیم و حسن و کبیر جدید انجام و به دلیل انطباق بهتر با داده‌های تجربی، مدل جدید حسن و کبیر انتخاب شد. در این مدل از رابطه اصطکاک چن استفاده شده است. چون تعیین ضریب اصطکاک عاملی بسیار مهم برای پیش‌بینی افت فشار و تعیین الگوی جریان در چاه‌های نفتی است، روابط اصطکاک معتبری همانند کولبروک، گودار و کاراگاز در مدل حسن و کبیر استفاده شده‌اند. تاثیر استفاده از مدل‌های اصطکاک مختلف بر افت فشار کم بوده است، اما به طور کیفی می‌توان گفت که به کارگیری رابطه کاراگاز، که در آن از روابط لگاریتمی استفاده شده، انطباقی بهتر با داده‌های تجربی دارد.

**کلمات کلیدی:** دوفازی، شبیه‌سازی عددی، مدل حسن و کبیر، ضریب اصطکاک، چاه نفتی.

## مقدمه

الگوهای جریانی به خواص سیال و نیروهای موثر بر سیال از جمله نیروهای شناوری، آشفتگی، اینرسی و تنش سطحی و هم‌چنین مشخصه‌های جریانی و هندسی مانند دبی جریان، قطر لوله و شیب خط لوله بستگی دارد. برای تعیین الگوهای جریان و افت فشار، مدل‌های مختلف دوفازی ارائه شده‌اند. اریکوزسکی ترکیبی از روش‌های پیشین تجربی را برای محاسبه افت فشار بر مبنای تعیین الگوهای جریان ارائه داد و معادله‌ای جدید را نیز برای ضریب اصطکاک جریان لخته‌ای منتشر کرد [۱].

عامل اصلی انتقال سیال در چاه‌های نفتی و خطوط انتقال نفت اختلاف فشار (اختلاف پتانسیل) است. محاسبات مربوط به افت فشار در طول مسیر حرکت سیال در چاه‌های نفتی و خطوط انتقال نفت، به دلیل زیاد بودن مشخصه‌ها و تغییر الگوهای جریان، پیچیده و زمان براند. مدل‌سازی این مشخصه‌های چندفازی و تشخیص الگوهای جریانی در طراحی و بهره‌برداری از چاه‌های نفتی نقشی مهم دارد. وقوع

دوفازی در سه چاه نفتی و تعیین افت فشار با استفاده از مدل جدید حسن و کبیر و اصلاح آن و مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده با روش قدیم حسن و کبیر و مدل اریکوزوسکی انجام شده است. سپس ضرایب اصطکاک کولبروک، گودار و کاراگاز در مدل مذکور به‌شکل کیفی بررسی شده‌اند. در مقایسه کیفی با داده‌های تجربی، ضریب اصطکاک کاراگاز انطباقی بهتر با نتایج تجربی داشت.

### داده‌های تجربی

داده‌های تجربی مربوط به دو چاه نفتی شماره‌های یک و دو [۱۰] و نیز چاه نفتی شماره ۲۷ [۲]، که با استفاده از مدل اریکوزوسکی و مدل‌های قدیم (۱۹۹۰) و جدید (۲۰۱۰) حسن و کبیر شبیه‌سازی شده‌اند، در جدول ۱ آمده‌اند.

### معادلات حاکم

در مدل جدید حسن و کبیر، معادله گرادیان فشار کلی جریان سیال به‌ترتیب مجموع گرادیان‌های هیدرواستاتیک، اصطکاک و شتابی است [۴]:

$$-\frac{dp}{dz} = g\rho_m + \frac{f_m v_m^2 \rho_m}{2d} + \rho_m v_m \frac{dv_m}{dz} \quad (1)$$

این معادله تعادل انرژی مکانیکی نامیده می‌شود. چگالی مخلوط  $\rho_m$  به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۴]:

$$\rho_m = \rho_g f_g + \rho_l (1 - f_g) \quad (2)$$

$f_g$ ، کسر فضای خالی است که حسن و کبیر ارایه کرده‌اند [۴]:

$$f_g = \frac{v_{sg}}{c_0 v_m \pm v_\infty} \quad (3)$$

عزیز و همکارانش نخستین مدل مکانیکی را برای محاسبه مشخصه‌های جریان چندقاز با تهیه نقشه الگوی جریان ارایه دادند [۲]. حسن و کبیر نیز براساس مدل‌های مکانیکی چهار الگوی جریانی متفاوت را تعیین و نام‌گذاری و چگونگی گذار بین این الگوها، کسر فضای خالی<sup>۱</sup> و پیش‌بینی افت فشار را مشخص کردند [۳].

حسن و کبیر در سال ۲۰۱۰ با استفاده از تقریب جابه‌جایی سیال رابطه‌ای جدید را برای کسر فضای خالی ارایه کردند [۴] که در آن کسر فضای خالی تابعی از الگوی جریان و سرعت بالارونده است. آنها با تعیین صحیح ضرایب برای رابطه مذکور توانستند افت فشار در جریان‌های چندقازی را دقیق‌تر پیش‌بینی کنند. تعیین ضریب اصطکاک عاملی بسیار مهم برای پیش‌بینی افت فشار و تعیین الگوی جریان در چاه‌های نفتی است [۵]. برای تخمین ضریب اصطکاک روابطی مختلف ارایه شده‌اند. روابط اصطکاک باید بتوانند در رژیم‌های مختلف ضریب اصطکاک مناسب را ارایه کنند. کولبروک معروف‌ترین رابطه ضمنی را برای تعیین ضریب اصطکاک ارایه کرد [۶]. سپس محققانی چون چن و گودار روابطی صریح را ارایه دادند [۷ و ۸]. کاراگاز برپایه پروفیل سرعت لگاریتمی یک معادله صریح را برای ضریب اصطکاک دیواره‌های زیر و صاف ارایه کرده است [۹]. هدف این تحقیق بررسی پیش‌بینی الگوی جریان در یک چاه و استفاده از مدل دوفازی رفتار مناسب جریان با توجه به اهمیت بسیار زیاد آن است. در این تحقیق شبیه‌سازی عددی جریان

جدول ۱ داده‌های تجربی دو چاه نفتی شماره‌های یک و دو [۱۰] و چاه نفتی شماره ۲۷ [۲].

مشخصه	چاه شماره ۲۷	چاه شماره یک	چاه شماره دو
نسبت آب/نفت ((WOR) bbl/bbl)	۰/۲۳	۰	۰
عمق چاه (ft)	۱۲۴۵۳	۱۰۷۰۰	۱۲۰۰۰
قطر لوله مغزی (ft)	۰/۱۹۸	۰/۵۸۳	۰/۳۵۶
فشار اندازه‌گیری شده سرچاه (psi)	۴۲۵	۶۰۰	۵۴۸

که در آن ویسکوزیته مخلوط به صورت زیر به دست می آید [۴]:

$$\mu_m = \mu_g x + \mu_l (1-x) \quad (7)$$

کسر مایع تجمعی  $H_L$  کسر سطح مقطع لوله است که با فاز مایع اشغال شده تعریف می شود [۵]:

$$H_L = \frac{A_L}{A_P} \quad (8)$$

بین کسر مایع تجمعی و کسر فضای خالی<sup>۷</sup> رابطه  $H_L = 1 - f_g$  برقرار است و به صورت معادله زیر تعریف می شود [۴]:

$$H_L = 1 - \frac{v_{sg}}{c_0 v_m \pm v_\infty} \quad (9)$$

### تعیین الگوهای جریان در مدل حسن و کبیر

در جریان های دوفازی بالارونده الگوهای جریانی حبابی، لخته ای، لخته ای پیوسته و حلقوی اتفاق می افتند که در شکل ۱ ارائه شده است. در مدل حسن و کبیر، با بالا آمدن جریان نفتی به سمت دهانه چاه، فشار کاهش می یابد. با اتصال حباب های کوچک، افزایش  $f_g$  به بیش از ۰/۲۵ و گذار از جریان حبابی به جریان لخته ای رخ می دهد. گذار از جریان لخته ای به جریان لخته ای پیوسته هنگامی رخ می دهد که سرعت مخلوط  $v_m$

بیش از سرعت  $v_{ms}$  شود [۴]:

$$2v_{ms}^{1.2} \left(\frac{f}{2d}\right)^{0.4} \left(\frac{\rho_L}{\sigma}\right)^{0.6} \sqrt{g(\rho_L - \rho_g)} \\ = 0.725 + 4.15 \sqrt{\frac{v_{sg}}{v_m}} \quad (10)$$

که  $c_0$ ، مشخصه بی بعد جریان و  $v_\infty$ ، سرعت بالا آمدن حباب است. در روش حسن و کبیر، عبارت  $c_0$  به عنوان ضریب جریان تعریف شده است که در تعیین گذارها و کسر مایع تجمعی تاثیر دارد. مقدار  $c_0$  در تمام رژیم های جریانی حبابی<sup>۱</sup>، حبابی پخش شده<sup>۲</sup>، لخته ای<sup>۳</sup>، لخته ای پیوسته<sup>۴</sup> و حلقوی<sup>۵</sup> بسته به الگوی جریان، متفاوت است. تعیین مقدار  $c_0$  ضریب جریان در روش های جدید (الف) و قدیم (ب) حسن و کبیر به صورت زیر است:

الف) روش تعیین مقدار  $c_0$  ضریب جریان در روش جدید حسن و کبیر در جدول ۲ نشان داده شده است [۴].

ب) روش تعیین مقدار  $c_0$  ضریب جریان در روش قدیم حسن و کبیر به شکل زیر است [۳]:

$$c_0 = \begin{cases} 1.2 & \text{if } d < 0.12 \text{ m or if } v_{sl} > 0.02 \text{ m/s} \\ 2.0 & \text{if } d > 0.12 \text{ m and if } v_{sl} < 0.02 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

در مدل حسن و کبیر فاکتور اصطکاکی  $f_m$  در تمام رژیم های جریان با استفاده از عدد رینولدز مخلوط ( $Re_m$ ) و رابطه اصطکاکی چن محاسبه می شود [۴]:

$$Re_m = \frac{D v_m \rho_m}{\mu_m} \quad (5)$$

$$f_m = 1 / [4 \log \left( \frac{\epsilon}{3.7065d} - \frac{5.0452}{Re_m} \log \Lambda \right)]^2 \quad (6)$$

$$\Lambda = \frac{\left(\frac{\epsilon}{d}\right)^{1.1098}}{2.8257} + \left(\frac{7.149}{Re_m}\right)^{0.8981}$$

جدول ۲ تعیین ضریب جریانی با توجه به نوع جریان [۴].

الگوهای جریان	پارامتر $c_0$			$\infty v$
	بالارو هم جهت	بالارو غیرهم جهت	پایین رو	
حبابی و حبابی پخش شده	۱/۲	۲/۰	۱/۲	$v_{sb}$
لخته ای	۱/۲	۱/۲	۱/۱۲	$\bar{v}_\infty$
لخته ای پیوسته	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۲	$\bar{v}_\infty$
حلقوی	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰

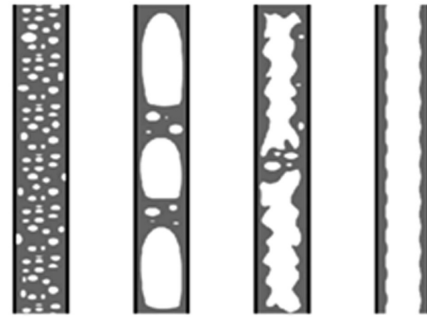
1. Bubble
- 2 Dispersed Bubbly
- 3 Slug
- 4 Churn
- 5 Annular
6. Liquid Hold up
7. Void fraction

مقدار  $0.002 \text{ psi/ft}$  حدس زده می‌شود. باید توجه داشت که حل عددی و تعیین الگوهای جریان به حدس اولیه حساس نیستند و گام به گام و تکرار جواب نهایی انجام می‌شوند. الگوریتم حل عددی با شروع از سرچاه به شرح زیر است:

- (۱) گام مکانی به صورت  $\Delta z$  تعیین می‌شود؛
- (۲) افت فشار برای گام زمانی تخمین زده می‌شود. مقدار تخمین زده شده برای تمام الگوهای جریان است؛
- (۳) با روش نفت سیاه و اطلاعات گام ۲ خواص سیال و نرخ جریان تعیین می‌شوند؛
- (۴) با زیربرنامه‌های حسن و کبیر، نوع رژیم جریان و افت‌های ارتفاع، اصطکاک و شتاب محاسبه می‌شوند؛
- (۵) نتایج گام ۴ با نتایج گام ۲ مقایسه می‌شوند و در صورت عدم برقراری شرط هم‌گرایی، به گام ۲ برگشت می‌شود؛
- (۶) در صورت برقراری شرط هم‌گرایی، گره بعدی انتخاب و به گام ۲ برگشت می‌شود؛
- (۷) با حل و تعیین کل طول چاه، محاسبات خاتمه می‌یابند.

#### استقلال از شبکه

برای بررسی حساسیت پاسخ‌ها، فشار در سرچاه نسبت به تعداد گره‌های انتخابی محاسبه و سپس اثبات می‌شود که نتایج از تعداد گره‌های انتخابی مستقل‌اند. در اولین مرحله کل عمق چاه به بیست بخش مساوی تقسیم شد و نتایج با تعداد گره‌های سی، چهل و پنجاه و شصت مقایسه شدند که با توجه به اختلاف اندک سی و چهل گره تعداد چهل گره، که مقداری متوسط است، انتخاب شد (جدول ۳). با توجه به جدول ۳ در حالت چهل گره، که حالت انتخابی است، درصد خطا  $7/5\%$  است که این مقدار در روش عزیز [۲]  $11/5\%$  است که برتری روش انتخابی به روش‌های منتشر شده قبلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ انواع الگوهای جریان در جریان دوفازی بالارونده [۱۱].

گذار از جریان لخته‌ای پیوسته به جریان حلقوی نیز هنگامی رخ می‌دهد که  $f_g$  بیش از  $0.7$  و سرعت ظاهری گاز  $v_{sg}$  بیش از سرعت  $v_{gc}$  شود [۴]:

$$v_{gc} = 3.1 [g\sigma(\rho_L - \rho_g) / \rho_g^2]^{1.4} \quad (11)$$

#### روابط اصطکاکی

حسن و کبیر (۲۰۱۰) از رابطه چن [۶] برای تعیین ضریب اصطکاک استفاده کردند. در این تحقیق برای بهبود تعیین افت فشار در مدل حسن و کبیر از روابط اصطکاکی معتبری همانند کولبروک [۵]، گودار [۷] و کاراگاز [۸] استفاده شده که دلیل آن تقریب مناسب روابط مذکور در مراجع است. روابط اصطکاکی کولبروک، گودار و کاراگاز به ترتیب در معادله‌های زیر نشان داده شده‌اند:

$$f = (1.14 - 2 \log \left( \frac{\epsilon}{d} + \frac{9.28}{\text{Re} \sqrt{f}} \right))^{-2} \quad (12)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.8686 \ln(0.4587 \text{Re}_m / (s - 0.31)^{\frac{s}{s+1}}) \\ s = 0.124 \text{Re}_m \left( \frac{\epsilon}{D} \right) + \ln(0.4587 \text{Re}_m) \quad (13)$$

$$f = 6.4 / (\ln(\text{Re}) - \ln(1 + 0.01 \text{Re} \epsilon (1 + 10\sqrt{\epsilon}))^2)^{2.4} \quad (14)$$

#### حل عددی

شرایط مرزی فشار و دما در سر دو چاه نفتی [۱۰] و نیز چاه نفتی شماره ۲۷ [۲] معین هستند. محاسبات افت فشار از سر چاه شروع می‌شوند. در سر چاه داده‌های ورودی شامل دما و فشار، دبی جریان گاز و نفت، وزن مخصوص گاز و نفت، قطر و شیب لوله مشخص‌اند. سپس طول بازه محاسباتی تعیین و برای بازه اول فشار خروجی

جدول ۳ مشخصه‌های تعداد گره‌ها.

ردیف	مشخصه شبکه	تعداد گره‌ها	افت فشار محاسبه شده	افت فشار اندازه‌گیری شده	افت فشاری که عزیز محاسبه کرده [۲]
۱	درشت‌تر	۲۰	۴۴۳۸/۳۵	۴۸۰۱	۴۲۵۷/۶
۲	درشت	۳۰	۴۴۳۸/۲۸	۴۸۰۱	۴۲۵۷/۶
۳	متوسط	۴۰	۴۴۳۸/۲۶	۴۸۰۱	۴۲۵۷/۶
۴	ریز	۵۰	۴۴۳۸/۲۳	۴۸۰۱	۴۲۵۷/۶
۵	بسیار ریز	۶۰	۴۴۳۸/۱۲	۴۸۰۱	۴۲۵۷/۶

## نتایج

در جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی در چاه نفتی شماره ۲۷ [۲] با مدل ارکیزوسکی و مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر ارایه شده‌اند. نتایج عددی هر یک از مدل‌های دوفازی با نتایج تجربی عزیز در مقاله مرجع ۲ و دو چاه نفتی مرجع ۱۰ مقایسه شده‌اند. با توجه به نزدیکی نتایج عددی به نتایج تجربی، می‌توان استدلال کرد که نتایج مدل جدید حسن و کبیر انطباق بهتری دارند و صحیح‌تراند. نتایج مدل ارکیزوسکی نشان می‌دهند که ابتدا جریان مایع است و سپس در عمق ۶۲۲۶ ft تغییر الگوی جریان مایع به جریان حبابی و در عمق ۲۴۹۰ ft تغییر الگوی جریان حبابی به جریان لخته‌ای اتفاق می‌افتد و تا سرچاه ادامه می‌یابد. در مدل قدیم حسن و کبیر ابتدا جریان مایع است و سپس در عمق ۷۱۶۰ ft تغییر الگوی جریان مایع به جریان حبابی و در عمق ۲۴۹۰ ft تغییر الگوی جریان حبابی به جریان لخته‌ای اتفاق می‌افتد و تا سرچاه ادامه می‌یابد. در مدل جدید حسن و کبیر ابتدا جریان مایع است و سپس در عمق ۴۹۸۱ ft تغییر الگوی جریان مایع به جریان حبابی اتفاق می‌افتد و تا سرچاه ادامه می‌یابد.

در جدول ۵ خطاهای شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی دو چاه نفتی مرجع ۱۰ و نیز چاه نفتی شماره ۲۷ مرجع ۲ با مدل ارکیزوسکی و مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر قدیم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که نشان داده شده مدل جدید حسن و کبیر انطباقی بهتر با نتایج تجربی دارد و اختلاف

داده‌های اندازه‌گیری شده برای فشار ته‌چاهی در چاه‌های شماره ۱ و ۲، ۰/۶ و ۰/۱٪ و در چاه شماره ۲۷، ۷/۵۵٪ است که دلیل این برتری ارایه رابطه  $f_p$  بر مبنای الگوهای جریان، سرعت بالارونده و تعیین صحیح ضرایب جریانی مناسب در مدل جدید حسن و کبیر است. مقدار خطا از مقایسه نتایج حل عددی مدل ارکیزوسکی و مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر با داده‌های تجربی سه چاه نفتی به‌دست آمده است.

مقدار خطا با فرمول زیر مقایسه شده است:

$$e_r = \frac{\Delta p_{cal} - \Delta p_{mea}}{\Delta p_{mea}} \quad (15)$$

نتایج حل عددی توزیع فشار برای دو چاه نفتی مرجع ۱۰ در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. در این نمودارها، افت فشار فاز مایع در مدل ارکیزوسکی از مدل قدیم حسن و کبیر بیش‌تر است، ولی در بخش دوفازی، مقدار افت فشار از مدل قدیم حسن و کبیر کم‌تر است. مدل جدید حسن و کبیر مقادیر افت فشاری کم‌تر از دو مدل قبلی را در فاز مایع و دوفاز پیش‌بینی می‌کند. در این تحقیق نتایج عددی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند و توافق خوبی به‌دست آمده است. منابع خطا و عدم قطعیت طبق نظریه پرز [۱۲] حاصل مدل‌سازی فیزیکی و گسسته‌سازی هستند. مدل‌سازی فیزیکی شامل عدم قطعیت‌ها در مدل ریاضی ناشی از تخمین‌ها و شرایط مرزی و در گسسته‌سازی شامل خطاهای حل و خطاهای گرد کردن است. با توجه به استفاده از روش رانگ کوتا مرتبه ۴ برای حل معادلات غیرخطی دقت حل عددی از مرتبه ۴ است.

جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی برای چاه شماره ۲۷ مرجع ۲ با مدل اریکوسکی و مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر.

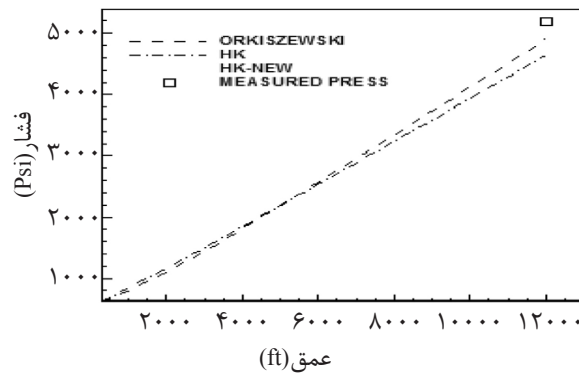
عمق (ft)	جدید چاه ۲۷ HK نتایج روش				نتایج روش HK قدیم چاه ۲۷				نتایج روش اریکوسکی چاه ۲۷			
	فنشار (Psi)	الگو	VSL	VSG	فنشار (Psi)	الگو	VSL	VSG	فنشار (Psi)	الگو	VSL	VSG
۳۱۱/۳۲	۵۱۰/۳۱	حبابی	۰/۳۱۳۳	۰/۸۱۳۱	۴۸۵/۷۸	لخته‌ای	۰/۳۱۱۴	۰/۹۳۸۳	۴۷۴/۷۴	لخته‌ای	۰/۳۰۹۵	۰/۹۰۴
۶۲۲/۶۵	۵۹۹/۳۳	حبابی	۰/۳۱۶۹	۰/۶۴۰۸	۵۴۹/۷۴	لخته‌ای	۰/۳۱۳۳	۰/۷۹۷۴	۵۲۸/۴۹	لخته‌ای	۰/۳۱۱۱	۰/۷۸۷۴
۹۳۳/۹۷	۶۹۱/۳۴	حبابی	۰/۳۲۰۶	۰/۵۱۱۳	۶۱۶/۶۲	لخته‌ای	۰/۳۱۵۳	۰/۶۸۲۳	۵۸۶/۰۱	لخته‌ای	۰/۳۱۲۸	۰/۶۸۶۳
۱۲۴۵/۳	۷۸۵/۷۵	حبابی	۰/۳۲۴۶	۰/۴۱۳۳	۶۸۶/۲	لخته‌ای	۰/۳۱۷۴	۰/۵۸۷۱	۶۴۷/۰۴	لخته‌ای	۰/۳۱۴۷	۰/۵۹۸۹
۱۵۵۶/۶۲	۸۸۲/۰۹	حبابی	۰/۳۲۸۵	۰/۳۳۵۷	۷۵۸/۲۲	لخته‌ای	۰/۳۱۹۷	۰/۵۰۷۵	۷۱۱/۳۹	لخته‌ای	۰/۳۱۶۸	۰/۵۳۳۴
۱۸۶۷/۹۵	۹۸۰/۰۳	حبابی	۰/۳۳۲۱	۰/۲۷۴	۸۳۲/۴۸	لخته‌ای	۰/۳۲۲۱	۰/۴۴۰۴	۷۷۸/۴۸	لخته‌ای	۰/۳۱۸۹	۰/۴۵۸
۲۱۷۹/۲۸	۱۰۷۹/۲۳	حبابی	۰/۳۳۵۶	۰/۳۲۴۶	۹۰۸/۷۳	لخته‌ای	۰/۳۲۴۶	۰/۳۸۳۴	۸۴۸/۳۴	لخته‌ای	۰/۳۲۱۲	۰/۴۰۱۲
۲۴۹۰/۶	۱۱۷۹/۴۹	حبابی	۰/۳۳۹۴	۰/۱۸۲	۹۹۰/۰۳	حبابی	۰/۳۲۷۲	۰/۳۳۲۶	۹۲۸/۳۹	حبابی	۰/۳۲۳۸	۰/۳۴۹۴
۲۸۰۱/۹۲	۱۲۸۰/۶۱	حبابی	۰/۳۴۳۳	۰/۱۴۵۹	۱۰۷۲/۴۱	حبابی	۰/۳۳	۰/۲۹	۱۰۱۱/۷۳	حبابی	۰/۳۲۶۶	۰/۳۰۲۳
۳۱۱۳/۲۵	۱۳۸۲/۴۵	حبابی	۰/۳۴۷۹	۰/۱۱۲۵	۱۱۵۵/۸۲	حبابی	۰/۳۳۲۹	۰/۲۵۱۱	۱۰۹۸/۰۲	حبابی	۰/۳۲۹۶	۰/۲۶۰۷
۳۴۲۴/۵۷	۱۴۸۴/۸۸	حبابی	۰/۳۵۲۹	۰/۰۸۱۸	۱۲۴۰/۲۵	حبابی	۰/۳۳۵۹	۰/۲۱۶۴	۱۱۸۷/۱۲	حبابی	۰/۳۳۲۷	۰/۲۲۲۴
۳۷۳۵/۹	۱۵۸۷/۷۶	حبابی	۰/۳۵۷۶	۰/۰۵۶۵	۱۳۲۵/۶۱	حبابی	۰/۳۳۸۹	۰/۱۸۵۹	۱۲۷۸/۶۷	حبابی	۰/۳۳۶	۰/۱۸۸۶
۴۰۴۷/۲۲	۱۶۹۰/۹۶	حبابی	۰/۳۶۲۱	۰/۰۳۵۶	۱۴۱۱/۸۳	حبابی	۰/۳۴۲	۰/۱۵۸۸	۱۳۷۲/۳۵	حبابی	۰/۳۳۹۴	۰/۱۵۸۷
۴۳۵۸/۵۵	۱۷۹۴/۳۷	حبابی	۰/۳۶۶۲	۰/۰۱۸۵	۱۴۹۸/۸۳	حبابی	۰/۳۴۵۲	۰/۱۳۴۷	۱۴۶۷/۸۹	حبابی	۰/۳۴۲۹	۰/۱۳۲۱
۴۶۶۹/۸۷	۱۸۹۷/۹۱	حبابی	۰/۳۷۰۲	۰/۰۰۳۸	۱۵۸۶/۵۴	حبابی	۰/۳۴۸۴	۰/۱۱۳	۱۵۶۵/۰۱	حبابی	۰/۳۴۶۶	۰/۱۰۸۴
۴۹۸۱/۲	۱۹۹۸/۰۵	ملیع	۰/۳۷۰۸	۰	۱۶۷۴/۹	حبابی	۰/۳۵۱۷	۰/۰۹۳۵	۱۶۶۳/۴۹	حبابی	۰/۳۵۰۳	۰/۰۸۷۱
۵۲۹۳/۵۲	۲۰۹۸/۳۹	ملیع	۰/۳۷۰۱	۰	۱۷۶۳/۸۴	حبابی	۰/۳۵۵	۰/۰۷۵۸	۱۷۶۳/۱۴	حبابی	۰/۳۵۴۱	۰/۰۶۸۱

ادامه جدول ۴

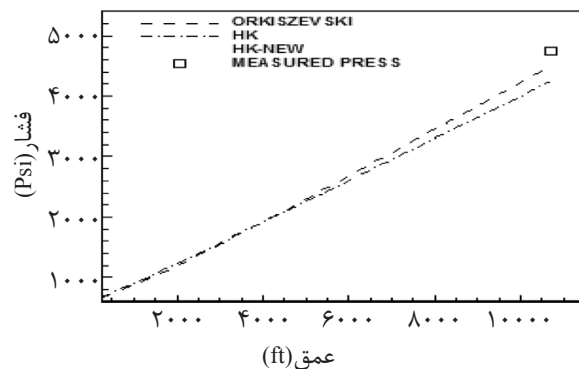
۸۵/۵۶۰۳	۲۱۹۸/۹۲	مائع	۰/۳۶۹۴	۰	۱۸۵۳/۳	حبابی	۰/۳۵۸۴	۰/۰۵۹۸	۱۸۶۳/۷۶	حبابی	۰/۳۵۸	۰/۰۵۰۹
۱۷/۵۹۱۵	۳۲۹۹/۶۲	مائع	۰/۳۶۸۷	۰	۱۹۴۳/۲۴	حبابی	۰/۳۶۱۹	۰/۰۴۵۱	۱۹۴۵/۲	حبابی	۰/۳۶۲	۰/۰۳۵۳
۵/۶۲۲۶	۲۴۰۰/۴۸	مائع	۰/۳۶۸۲	۰	۲۰۳۳/۶۱	حبابی	۰/۳۶۵۴	۰/۰۳۱۶	۲۰۶۸/۸۹	مائع	۰/۳۶۶۱	۰/۰۲۱
۸۲/۶۵۳۷	۲۵۰۱/۴۹	مائع	۰/۳۶۱۶	۰	۲۱۲۴/۳۵	حبابی	۰/۳۶۸۹	۰/۰۱۹۲	۲۱۷۳/۱۶	مائع	۰/۳۷۰۳	۰/۰۰۷۹
۱۵/۶۸۴۹	۲۶۰۲/۶۲	مائع	۰/۳۶۸۲	۰	۲۲۱۵/۴۲	حبابی	۰/۳۷۲۵	۰/۰۰۷۷	۲۲۷۱/۶۴	مائع	۰/۳۷۲۸	۰
۷/۱۶۰/۴۷	۲۷۰۳/۸۹	مائع	۰/۳۶۶۷	۰	۲۳۰۳/۵۷	مائع	۰/۳۷۴۹	۰	۲۳۷۱/۳	مائع	۰/۳۷۲۱	۰
۷۴۷۱/۸	۲۸۰۵/۲۶	مائع	۰/۳۶۶۳	۰	۲۳۹۱/۸۸	مائع	۰/۳۷۴۳	۰	۲۴۷۱/۱۳	مائع	۰/۳۷۱۵	۰
۷۷۸۳/۱۲	۲۹۰۶/۷۵	مائع	۰/۳۶۵۹	۰	۲۴۸۰/۳۲	مائع	۰/۳۷۳۷	۰	۲۵۷۱/۱۱	مائع	۰/۳۷۰۹	۰
۸۰۹۴/۴۵	۳۰۰۸/۳۳	مائع	۰/۳۶۵۵	۰	۲۵۶۸/۸۹	مائع	۰/۳۷۳۲	۰	۲۶۷۱/۲۴	مائع	۰/۳۷۰۴	۰
۸۴۰۵/۷۷	۳۱۱۰/۰۱	مائع	۰/۳۶۵۲	۰	۲۶۵۷/۵۷	مائع	۰/۳۷۲۷	۰	۲۷۷۱/۴۹	مائع	۰/۳۶۹۹	۰
۸۷۱۷/۱	۳۲۱۱/۷۸	مائع	۰/۳۶۴۹	۰	۲۷۴۶/۳۷	مائع	۰/۳۷۲۲	۰	۲۸۷۱/۸۷	مائع	۰/۳۶۹۴	۰
۹۰۲۸/۴۲	۳۳۱۳/۶۲	مائع	۰/۳۶۴۶	۰	۲۸۳۵/۲۷	مائع	۰/۳۷۱۸	۰	۲۹۷۲/۳۷	مائع	۰/۳۶۹	۰
۹۳۳۹/۷۵	۳۴۱۵/۵۵	مائع	۰/۳۶۴۳	۰	۲۹۲۴/۲۷	مائع	۰/۳۷۱۴	۰	۳۰۷۲/۹۷	مائع	۰/۳۶۸۶	۰
۹۶۵۱/۰۸	۳۵۱۷/۵۵	مائع	۰/۳۶۴۱	۰	۳۰۱۳/۳۶	مائع	۰/۳۷۱	۰	۳۱۷۳/۶۷	مائع	۰/۳۶۸۲	۰
۹۹۶۲/۴	۳۶۱۹/۶۲	مائع	۰/۳۶۳۸	۰	۳۱۰۲/۵۴	مائع	۰/۳۷۰۶	۰	۳۲۷۴/۴۷	مائع	۰/۳۶۷۹	۰
۱۰۲۷۳۷	۳۷۲۱/۷۵	مائع	۰/۳۶۳۶	۰	۳۱۹۱/۸	مائع	۰/۳۷۰۳	۰	۳۳۷۵/۳۵	مائع	۰/۳۶۷۶	۰
۱۰۵۸۵/۱	۳۸۲۳/۹۵	مائع	۰/۳۶۳۴	۰	۳۲۸۱/۱۴	مائع	۰/۳۷	۰	۳۴۷۶/۳۲	مائع	۰/۳۶۷۳	۰
۱۰۸۹۶/۴	۳۹۲۶/۲	مائع	۰/۳۶۳۲	۰	۳۳۷۰/۵۶	مائع	۰/۳۶۹۷	۰	۳۵۷۷/۳۷	مائع	۰/۳۶۷	۰
۱۱۲۰۷/۷	۴۰۲۸/۵۱	مائع	۰/۳۶۳	۰	۳۴۶۰/۰۴	مائع	۰/۳۶۹۴	۰	۳۶۷۸/۴۹	مائع	۰/۳۶۶۷	۰
۱۱۵۱۹	۴۱۳۰/۸۷	مائع	۰/۳۶۲۸	۰	۳۵۴۹/۵۹	مائع	۰/۳۶۹۱	۰	۳۷۷۹/۶۹	مائع	۰/۳۶۶۴	۰
۱۱۸۳۰/۴	۴۲۳۳/۲۹	مائع	۰/۳۶۲۶	۰	۳۶۳۹/۲	مائع	۰/۳۶۸۸	۰	۳۸۸۰/۹۵	مائع	۰/۳۶۶۲	۰
۱۲۱۴/۱۷	۴۳۳۵/۷۵	مائع	۰/۳۶۲۴	۰	۳۷۲۸/۸۸	مائع	۰/۳۶۸۶	۰	۳۹۸۲/۲۸	مائع	۰/۳۶۶	۰
۱۲۴۵۳	۴۴۳۸/۲۶	مائع	۰/۳۶۲۳	۰	۳۸۱۸/۶۱	مائع	۰/۳۶۸۴	۰	۴۰۸۳/۶۶	مائع	۰/۳۶۵۸	۰

جدول ۵ ارکیزوسکی و مدل های قدیم و جدید حسن و کبیر. عمق (Ft) فشار (Psi)

مشخصه	مدل جدید حسن و کبیر	مدل قدیم حسن و کبیر	مدل ارکیزوسکی	مدل عزیز و همکاران (۱۹۷۲)
چاه شماره ۲۷	۷/۵۵	۲۰/۴	۱۴/۹	۱۱/۳
چاه شماره ۱	۰/۶	۱۰/۵	۵/۲	-
چاه شماره ۲	۰/۱	۱۰/۴	۵/۳	-



شکل ۲ حل عددی توزیع فشار و مقایسه مدل ارکیزوسکی و مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر برای چاه نفتی شماره یک مرجع ۱۰.



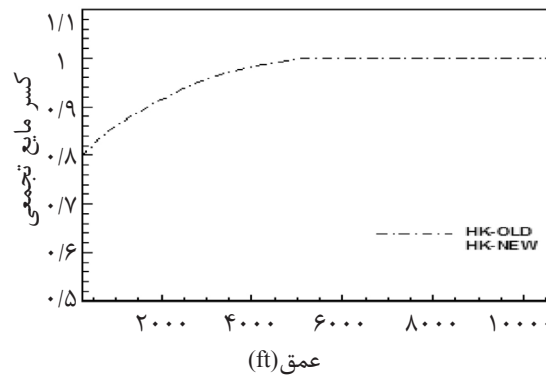
شکل ۳ حل عددی توزیع فشار و مقایسه مدل ارکیزوسکی و مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر برای چاه نفتی شماره دو مرجع ۱۰.

برای شبیه‌سازی جریان نفتی این مدل است، ولی چون تعیین ضریب اصطکاک عاملی مهم برای پیش‌بینی افت فشار است، در جدول ۶ نتایج حل عددی توزیع فشار و مقایسه به‌کارگیری روابط اصطکاکی کولبروک، گودار و کاراگاز در مدل حسن و کبیر برای چاه نفتی شماره ۲۷ مرجع ۲ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، خطاها در گزینه استفاده از رابطه کاراگاز در حدود ۷/۵۲٪ و اندکی کم‌تر از مدل‌های دیگراند. دلیل این بهبود جزئی، استفاده کاراگاز از اعداد ثابت جدید بر مبنای داده‌های تجربی و توزیع سرعت لگاریتمی جدید است. هم‌چنین فقط به‌صورت کیفی پیشنهاد می‌شود که برای شبیه‌سازی جریان دوفازی در چاه‌های نفتی، مدل اصلاحی حسن و کبیر، که در آن از رابطه اصطکاکی کاراگاز به جای چن استفاده شده، به کار رود.

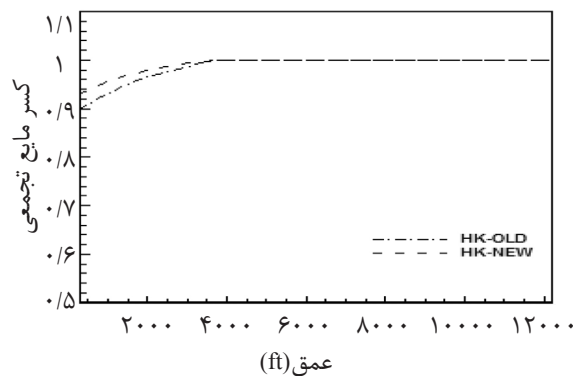
مقدار عدم قطعیت در چاه‌ها بر اساس دقت وسایل اندازه‌گیری استفاده‌شده ۵٪ است و نتایج روش در محدوده بررسی هستند به‌دلیل برتری مدل‌های حسن و کبیر بر مدل ارکیزوسکی، در ادامه برای مقایسه مایع تجمع‌یافته فقط از روش‌های حسن و کبیر استفاده شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ حل عددی توزیع کسر مایع تجمعی و مقایسه مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر برای دو چاه نفتی مرجع ۱۰ ارائه شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در روش جدید حسن و کبیر کسر مایع تجمعی بیش از مدل قدیم حسن و کبیر است.

با توجه به نتایج قابل قبول مدل جدید حسن و کبیر در محاسبه افت فشار، برای مایع تجمعی مقداری صحیح‌تر ارائه می‌شود. با توجه به نتایج جدول ۶، مدل جدید حسن و کبیر انطباقی بهتر با نتایج تجربی داشت؛ بنابراین مدل دوفازی مناسب





شکل ۴ حل عددی توزیع کسر مایع تجمع می و مقایسه مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر برای چاه نفتی شماره یک مرجع ۱۰.



شکل ۵ حل عددی توزیع کسر مایع تجمع می و مقایسه مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر برای چاه نفتی شماره دو مرجع ۱۰.

جدول ۶ مقایسه خطاهای روش‌های نتایج شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی چاه نفتی شماره ۲۷ مرجع ۲ با روابط اصطکاکی کولبروک، چن، گودار و کاراگاز.

مدل چن	مدل کاراگاز	مدل گودار	مدل کولبروک	مشخصه
۴۴۳۸/۲۶	۴۴۳۹/۴۹	۴۴۳۹/۴۱	۴۴۳۷/۸	فشار محاسبه شده (psi)
۷/۵۵	۷/۵۲	۷/۵۳	۷/۵۶	درصد خطا

### نتیجه گیری

در امتداد چاه ارایه و با داده‌های تجربی مقایسه شد. تاثیر استفاده از مدل‌های مختلف جریان دوفازی و نیز به کارگیری روابط اصطکاکی گوناگون بر مشخصه‌های جریان نیز بررسی شد که مهم‌ترین نتایج آن به شرح زیراند:

۱- برای اولین بار از مدل جدید حسن و کبیر برای شبیه‌سازی عددی در دو چاه نفتی مرجع ۱۰ و نیز چاه نفتی شماره ۲۷ مرجع ۲ استفاده شد که با توجه به انطباق مناسب نتایج با داده‌های تجربی، استفاده از این مدل در چاه‌های نفتی پیشنهاد می‌شود؛

۲- در فاز مایع، افت فشار در مدل اریکوزوسکی بیش از مدل قدیم حسن و کبیر و در بخش دوفازی این روند

به دلیل شرایط راهبردی، اطلاعات تجربی منتشر شده برای چاه‌های نفتی بسیار کم‌اند. با این حال، در این مقاله نتایج حل عددی با داده‌های تجربی سه چاه نفتی مقایسه شدند و برای اولین بار از مدل جدید حسن و کبیر در چاه‌های نفتی ایران استفاده شد. در این تحقیق مدل جدید حسن و کبیر با استفاده از ضرایب اصطکاکی به‌روزی مانند کاراگاز (۲۰۰۹) اصلاح کیفی شد که نه تنها در ایران، در دنیا بی‌سابقه است. در این تحقیق پس از شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی در سه چاه نفتی با مدل اریکوزوسکی و مدل‌های قدیم و جدید حسن و کبیر، توزیع مشخصه‌های فشار و مایع تجمع یافته

از مدل جدید حسن و کبیر جدید رخ می‌دهد؛  
 ۴- تاثیر استفاده از مدل‌های اصطکاکی مختلف (چن، کولبروک، گودار و کاراگاز) بر افت فشار کم بوده، اما به‌طور کیفی می‌توان گفت که نتایج رابطه کاراگاز، که در آن از روابط لگاریتمی استفاده شده، انطباقی بهتر با داده‌های تجربی دارند؛  
 ۵- با توجه به نتایج به‌طور کیفی پیشنهاد می‌شود که برای شبیه‌سازی جریان دوفازی در چاه‌های نفتی، مدل اصلاحی حسن و کبیر به کار رود که در آن از رابطه اصطکاکی کاراگاز به جای چن استفاده شده است.

معکوس است. هم‌چنین مدل جدید حسن و کبیر افت فشاری کم‌تر از دو مدل قبلی را در فاز مایع و دوفاز پیش‌بینی می‌کند؛  
 ۳- در تمام مدل‌های ارائه‌شده، ابتدا جریان مایع است اما الگوهای جریان در عمق‌هایی مختلف تغییر می‌کنند. تغییر الگوی جریان مایع به جریان حبابی در مدل اریکوزوسکی در عمقی بالاتر از مدل قدیم حسن و کبیر و عمقی پایین‌تر از مدل جدید حسن و کبیر اتفاق می‌افتد. تغییر الگوی جریان حبابی به لخته‌ای در مدل اریکوزوسکی در عمقی تقریباً یکسان با مدل قدیم حسن و کبیر و پایین‌تر

## مراجع

- [1]. Orkiszewski J., "Predicting two-phase pressure drops in vertical pipes," Journal of Petroleum Technology., Vol. 19, pp. 829-838, 1967.
- [2]. Aziz k., Govier G. W. and Fogarasi M., "Pressure drop in wells producing oil and gas," Journal of Canadian Petroleum Technology., Vol. 11, pp. 38-46, 1972.
- [3]. Kabir C. S. and Hasan A. R., "Performance of a two-phase gas/ liquid flow model in vertical wells," J. Pet. Sci. Eng., Vol.4, pp. 273-289, 1990.
- [4]. Hasan A. R., Kabir C. S. and Sayarpour M., "Simplified two-phase flow modeling in wellbores," Journal of Petroleum Technology., Vol. 72, pp. 42-49, 2010.
- [5]. Brill J. P. and Mukhrejee. H., "Multiphase flow in wells," 1<sup>th</sup> ed., Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1999.
- [6]. Colebrook C. F., "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws," Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol. 11, pp. 133-156, 1939.
- [7]. Chen N. H., "An explicit equation for friction factor in pipe," Ind. Eng. Chem. Fundamentals., Vol. 18, pp. 296-297, 1979.
- [8]. Goudar C. T. and Sonnad J. R., "Comparison of the iterative approximations of the colebrook-white equation," Hydrocarbon Processing Fluid Flow and Rotating Equipment Special Report., pp.79-83, 2008.
- [9]. Kargoz I. and Avci A., "A novel explicit equation for friction factor in smooth and rough pipes," Journal of Fluids Engineering., Vol.131, pp. 201-204, 2009.
- [10]. Naghdbishi M. and Fatipor S., "Optimization of production from oil wells by installing appropriate tubing," Second Symposium of Promotion of Technology, Tehran, 2007.
- [11]. Hasan A. R. and Kabir C. S., "Predicting multiphase flow behavior in a deviated wells," SPEPE, pp. 474-482, 1988.
- [12]. Perez R., "Uncertainty analysis of computational fluid dynamics via polynomial chaos," Dissertation submitted to The Faculty of The Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Aerospace Engineering, 2008.