



## پیش‌بینی عملکرد جریان داخلی در یکی از چاه‌های افقی نفتی ایران

مهدی کاوه<sup>۱</sup>، شکرک بهره‌برداری نفت و گاز آغاخاری  
عباس هلالی‌زاده، جمشید مقدسی<sup>۲</sup>، دانشگاه صنعت نفت

چکیده

مهندسان بهره‌برداری همواره به دنبال یافتن روابطی هستند تا بتوانند بر اساس آن رابطه‌ای بین نرخ جریان چاه در سطح زمین و فشار جریانی ته‌چاه ارائه کنند. برای تعریف این رابطه منحنی IPR<sup>۱</sup> به کار می‌رود. در این مقاله منحنی‌های جریان دو فاز (نفت-گاز) در یک چاه افقی برای مدل‌های تجربی و هم‌چنین مدل حاصل از شبیه‌سازی ارائه می‌شوند. داده‌های لازم جهت رسم منحنی‌های IPR از شبیه‌ساز ECLIPSE100 نسخه A2005 به دست آمده‌اند. بدین ترتیب که در ضریب‌های بازیافت و فشارهای مختلف مخزن می‌توان مقادیر نرخ جریان را در مقابل مقادیر متفاوت  $P_{wf}$  رسم نمود. در مرحله بعد منحنی‌های IPR حاصل از شبیه‌ساز که مربوط به یکی از چاه‌های افقی نفتی ایران است با منحنی‌های IPR حاصل از روابط تجربی مقایسه می‌شوند. نتیجه مهم این مقایسه تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی با منحنی IPR حاصل از رابطه Vogel در هر ضریب بازیافت است. بنابراین می‌توان نتایج رابطه Vogel را به جای نتایج مدل شبیه‌سازی که تهیه آن زمان‌بر می‌باشد به کار گرفت.

واژگان کلیدی عملکرد جریان داخلی<sup>۲</sup>، فشار جریانی ته‌چاه<sup>۳</sup>، ضریب بازیافت<sup>۴</sup>، مدل شبیه‌سازی<sup>۵</sup>

### مقدمه

منحنی‌های IPR جهت مطالعه قابلیت انتقال<sup>۶</sup> چاه‌ها و تخمین نرخ جریان تولیدی برای یک فشار جریانی ته‌چاهی خاص استفاده می‌شوند. به بیان دیگر این نمودارها توانایی یک مخزن در انتقال سیال به دهانه چاه را منعکس می‌کنند. محل برخورد منحنی IPR و منحنی مربوط به عملکرد لوله مغزی (TPR)<sup>۷</sup>، نقطه عملیاتی<sup>۸</sup> چاه را مشخص می‌کند. تعیین این نقطه برای مهندسان بهره‌برداری بسیار حائز اهمیت است. از آنجایی که استفاده از چاه‌های افقی چه از نوع چندجهتی<sup>۹</sup> و چه از نوع افقی منفرد در حال افزایش است نیاز به پیش‌بینی منحنی‌های IPR جریان چندفازی جهت به‌دست آوردن شاخص بهره‌دهی بیشتر احساس می‌شود. هرچند می‌توان از شبیه‌سازی مخزن جهت دستیابی به این منظور استفاده نمود اما استفاده از شبیه‌سازی می‌تواند پرهزینه و زمان‌بر باشد. روابط تجربی زیادی برای محاسبه عملکرد جریان داخلی در چاه‌های افقی و عمودی بیان شده‌اند. هدف این تحقیق، آنالیز و مقایسه روابط تجربی به کاررفته جهت پیش‌بینی عملکرد جریان داخلی یکی از چاه‌های افقی ایران با نمودارهای IPR به دست آمده از شبیه‌ساز ESPILSE است. در خاتمه این مطالعه، بر اساس مطالعات انجام شده پیشنهادهایی ارائه می‌گردد.

### ۱- تکنولوژی حفاری چاه‌های افقی

هدف مهم از حفاری چاه‌های افقی و جهت‌دار، بهبود سطح تماس چاه و مخزن است. با بهبود سطح تماس چاه با مخزن، شاخص بهره‌دهی مخزن نیز افزایش خواهد یافت. این موضوع در افزایش ضریب بازیافت نفت نیز مؤثر خواهد بود [۱]. عوامل زیادی در توانایی تولید از چاه‌های افقی مؤثرند که با ایجاد کوچک‌ترین تغییر در آنها نتیجه نیز تغییر خواهد کرد. طول چاه، مکان حفر چاه در مخزن، پایداری مکان حفاری و نوع تکمیل چاه از جمله این عوامل هستند که به شدت به استراتژی حفاری بستگی دارند. برخی از این عوامل نقش مهمی در محاسبه شاخص بهره‌دهی چاه دارند.

### ۲- مطالعه تحلیلی جریان سیال در چاه‌های افقی

شکل هندسی جریان سیال در یک محیط متخلخل همگن و به سمت دهانه چاه عمودی<sup>۱۰</sup> به صورت شعاعی است. رفتار جریان در محیط متخلخل را می‌توان با قانون دارسی تشریح کرد. با استفاده از معادله دارسی می‌توان معادله انتشار را برای جریان شعاعی و جهت به دست آوردن توزیع فشار حل کرد:

\* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

کرده بودند، رابطه IPR جدیدی ارائه کردند [۶]. در این رابطه ضریب بازیافت پارامتر مؤثری به شمار می‌رود. مدل فیزیکی Aziz & Bendakhlia شامل مخزن جعبه‌ای شکل با ناحیه ریزش مربعی است. سازند از نظر تراوایی همگن و همسان‌گرد بوده و دارای تراکم‌پذیری ثابت می‌باشد. رابطه‌ای که آنها به دست آوردند ترکیبی از رابطه Fetkovich & Vogel می‌باشد که به شکل زیر ارائه شده است.

$$\frac{q_0}{q_{0\max}} = \left[ 1 - v \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right) - [1 - v] \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right)^2 \right]^n \quad (3)$$

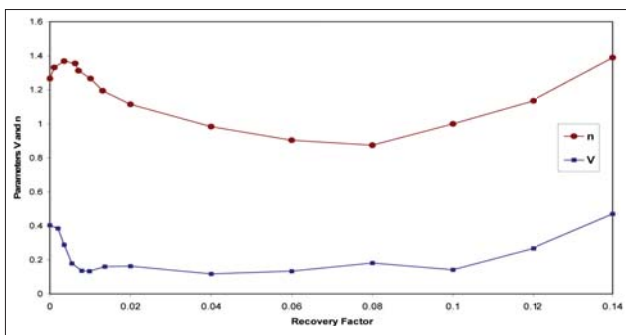
که در رابطه بالا  $n$  و  $v$  پارامترهایی هستند که با ضریب بازیافت تغییر می‌کنند (شکل-۱). در این رابطه  $n$  و  $v$  حداکثر تا ضریب بازیافت ۱۴ درصد قابل محاسبه هستند. لذا این موضوع محدودیتی برای رابطه Aziz & Bendakhlia به شمار می‌رود.

### ۳-۳-۳ مدل Cheng

Cheng در سال ۱۹۹۰ رابطه‌ای جهت محاسبه منحنی IPR برای چاه‌های افقی و جهت‌دار ارائه کرد [۵]. او جهت ایجاد منحنی‌های IPR چاه‌های افقی و جهت‌دار از شبیه‌ساز نیپر<sup>۱۱</sup> استفاده نمود و رابطه خود را براساس نتایج شبیه‌سازی گسترش داد [۸]. مدل او یک مخزن مستطیل شکل محدود است که چاهی در وسط آن حفر شده است. این مخزن همگن، ایزوتروپیک و دارای اشباع آب ثابت می‌باشد. آب در طول تولید غیرقابل حرکت است. بنابراین فقط نفت و گاز در مخزن تولید می‌شوند. در این مدل از نیروهای فشار موینگی سیالات مخزن نیز چشم‌پوشی می‌شود. رابطه Cheng با توجه به تغییر زاویه چاه جهت‌دار از حالت عمودی به افقی ارائه شده و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{q_0}{q_{0\max}} = a_0 - a_1 \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right) - a_2 \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right)^2 \quad (4)$$

ثابت‌های  $a_0$ ،  $a_1$  و  $a_2$  برای یک چاه کاملاً افقی به ترتیب برابر



پارامترهای  $v$  و  $n$  در رابطه Aziz & Bendakhlia

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu C_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

این معادله تحلیلی برای جریان تک فاز و با در نظر گرفتن فرضیات دارسی و به کارگیری شرایط اولیه و مرزی به سادگی قابل حل است. اما برای جریان دوفازی در چاه‌های افقی و به ویژه زمانی که تراوایی نسبی و انتقال‌پذیری فازها نیز مورد بحث باشند، حل آن بسیار پیچیده خواهد بود. به همین دلیل استفاده از روابط تجربی در تخمین نمودارهای IPR بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

### ۳-۳-۲ روابط تجربی تخمین IPR

Vogel در سال ۱۹۶۸ رابطه تجربی خود جهت پیش‌بینی نمودار IPR چاه را ارائه کرد [۳]. وی رابطه خود را براساس نتایج شبیه‌سازی مخزن تهیه کرده بود. پس از اینکه رابطه تجربی Vogel موفقیت و کاربرد زیادی در صنعت پیدا کرد مقالات و مدل‌های زیادی در مورد پیش‌بینی روابط IPR چاه‌های افقی بر اساس و در راستای کار Vogel ارائه شد. در این مطالعه علاوه بر ارائه رابطه Vogel، به بیان روابط تجربی Aziz, Cheng & Bendakhlia و Economide & Retnanto نیز خواهیم پرداخت.

### ۳-۱-۳ رابطه Vogel

Vogel جهت پیش‌بینی منحنی‌های IPR مخازنی که مکانیزم تولید آنها رانش گاز محلول بود از یک برنامه کامپیوتری که در سال ۱۹۶۶ توسط Weller طراحی شده بود استفاده کرد [۷ و ۳]. وی در مدل خود مخزن را به شکل مدور که یک چاه عمودی در مرکز آن تکمیل شده بود فرض کرد. در این مدل سازند یکنواخت، همگن و دارای اشباع آب ثابت فرض شده که آثار گرانشی و تراکم‌پذیری سنگ و آب در آن قابل چشم‌پوشی هستند. رابطه IPR تجربی او برای جریان دوفازی در چاه‌های عمودی و بر اساس رسم منحنی‌های بی‌بعد به شکل زیر ارائه شده است.

$$\frac{q_0}{q_{0,\max}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right)^2 \quad (2)$$

رابطه Vogel به طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل عملکرد جریان داخلی چاه‌ها در مخازنی با مکانیزم رانش گاز محلول کاربرد دارد.

### ۳-۲-۳ مدل Bendakhlia & Aziz

در سال ۱۹۸۹ Aziz & Bendakhlia بر اساس داده‌هایی که از شبیه‌سازی مخزن و منحنی‌های بی‌بعد شبیه‌سازی شده تهیه



در رابطه بالا  $n$  پارامتری است که به فشار نقطه حباب بستگی دارد. در این رابطه برای مقادیر  $n$  های کمتر از یک، جوابها از صحت کافی برخوردار نیستند و در مقادیر  $n$  منفی نیز رابطه بی معنی خواهد بود.

#### ۴-۴ تهیه نمودارهای IPR از طریق شبیه سازی

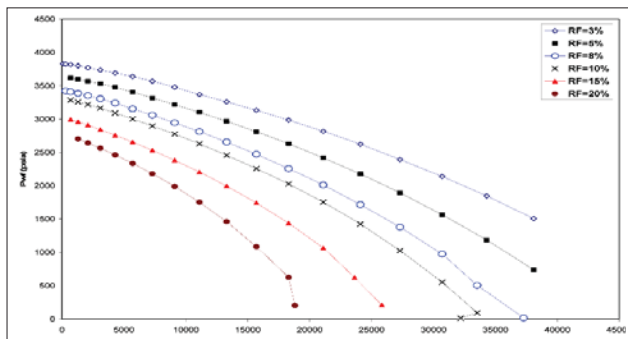
در این بخش جهت مقایسه نتایج روابط تجربی با داده های خروجی شبیه ساز و بررسی میزان دقت هر یک از آنها مدلی از یک چاه افقی با اطلاعات واقعی در شبیه ساز ساخته شد و منحنی های IPR مربوط به چاه از این مدل استخراج گردید. در ادامه این مطالعه منحنی های IPR تجربی نیز از روابط مربوطه تهیه شد و با خروجی شبیه ساز مقایسه شد. لازم به ذکر است که تأثیر افت فشار به زیر نقطه حباب نیز در نمودارهای IPR مشاهده می گردد.

#### ۴-۱-۱ مشخصات مدل

مدل مورد نظر سه بعدی و مستطیل شکل است که در وسط آن چاهی افقی قرار گرفته است. این مدل با استفاده از شبیه ساز تجاری Eclipse 100 نسخه ۲۰۱۰ ساخته و اجرا شده است. مدل مذکور از نسخه نفت سیاه این شبیه ساز که یک شبیه ساز سه فاز-سه بعدی است و از روش غیر صریح کامل<sup>۱۳</sup> برای حل معادلات استفاده می کند. نمایی از شبکه بندی مدل و موقعیت قرارگیری چاه در این مدل در شکل ۲-۱ قابل مشاهده است. فشار اولیه مدل معادل فشار حباب سیال و برابر با ۳۸۰۰ پام در نظر گرفته شده است. درجه API نفت خام نیز ۲۵ می باشد. شرایط و خصوصیات دیگر مدل، مشابه یکی از مخازن جنوب غرب ایران انتخاب شده است. طول تکمیل چاه ۱۰۰۰ فوت و قطر دهانه آن نیز ۱۷ اینچ در نظر گرفته شده است. مشخصات مدل ساخته شده در جدول ۱ ارائه شده است.

#### ۴-۲-۲ بررسی نوع قید<sup>۱۴</sup> مورد استفاده در شبیه سازی

به طور کلی دو نوع قید در شبیه سازی مورد استفاده قرار می گیرند



شکل ۴-۲-۲ مقایسه نمودارهای IPR در حالت نرخ جریان ثابت در ضریب بازیافت های مختلف

با ۰/۹۸۸۵، ۰/۲۰۵۵- و ۱/۱۸۱۸ می باشد. در مدل Cheng مسئله قابل توجه محاسبه پتانسیل جریان باز مطلق (AOFP)<sup>۱۲</sup> است. واضح است که زمانی که فشار جریانی ته چاه را برابر صفر قرار دهیم نرخ جریان برابر AOFP نخواهد بود که این موضوع برای این رابطه تجربی یک ضعف محسوب می شود. در نتیجه در رابطه محاسبه IPR باید برای ثابت اول، همواره عدد یک را در نظر گرفت تا به ازای  $P_{wf} = 0$  نرخ جریان برابر با  $q_{o,max}$  محاسبه شود.

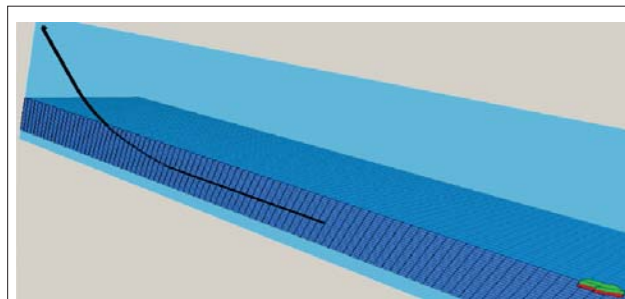
#### ۴-۳-۲ رابطه Retnanto & Economides

Economides & Retnanto در سال ۱۹۹۸ رابطه ای را جهت محاسبه IPR جریان دوفازی در چاه های افقی ارائه نمودند [۴]. در این مدل برای رسم منحنی های IPR از شبیه ساز عددی VIP چاه های افقی در شرایط مختلف استفاده شده است. رابطه تجربی آنها بر مبنای نتایج شبیه ساز عددی به شکل زیر می باشد:

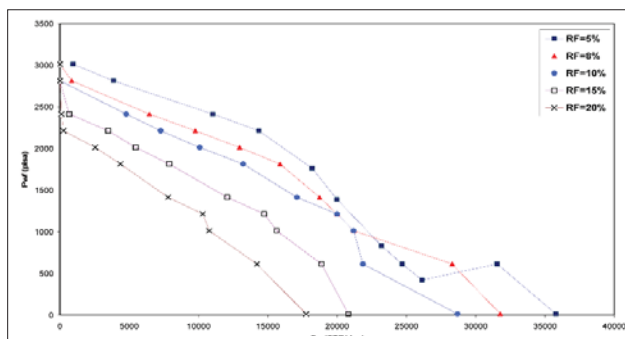
$$\frac{q_o}{q_{o,max}} = 1 - 0.25 \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right) - 0.75 \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right)^n \quad (5)$$

در این رابطه پارامتر  $n$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$n = \left( 0.27 + 1.46 \left( \frac{P_{wf}}{P_b} \right) - 0.96 \left( \frac{P_{wf}}{P_b} \right)^2 \right) (4 + 1.66 \times 10^{-3} P_b) \quad (6)$$



شکل ۴-۲-۱ شبکه بندی مدل و موقعیت قرارگیری چاه در آن



شکل ۴-۲-۳ مقایسه نمودارهای IPR در حالت فشار ثابت در ضریب بازیافت های مختلف

### ۳-۴- مقایسه نمودارهای IPR تجربی و شبیه سازی

در این قسمت روابط تجربی ذکر شده در بخش ۳-۳ با نتایج شبیه سازی ECLIPSE مقایسه شده اند. لازم به ذکر است روابط تجربی ساده و ایده آل هستند و نباید از آنها انتظار دقت زیادی داشت. روابط IPR چاه های افقی مورد استفاده عبارتند از:

■ Bendakhlia & Aziz (1989)

■ Cheng (1990)

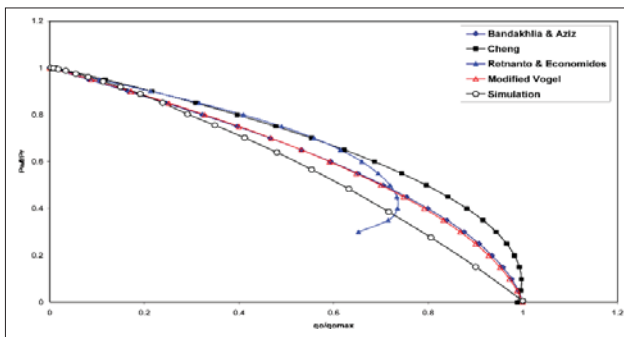
■ Retnanto & Economides (1998)

■ Vogel (1968)

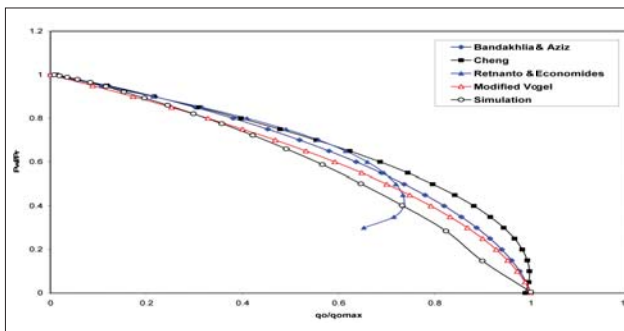
برای مقایسه، شرایط چاه و مخزن یکسان در نظر گرفته شده و شبیه سازی در ضرایب بازیافت متفاوت (از ۳ تا ۲۰ درصد) انجام شد. لازم به ذکر است از میان چهار رابطه تجربی ذکر شده، تنها رابطه Bendakhlia & Aziz به ضریب بازیافت وابسته بوده و سایر روابط به ضریب بازیافت حساس نیستند. شکل های ۷ و ۸ مقایسه نمودارهای IPR تجربی و شبیه سازی را در سه ضریب بازیافت مختلف نشان می دهد.

### ۴-۴- میزان انحراف

در جدول ۲- میزان انحراف نمودارهای IPR تجربی با نتایج شبیه سازی محاسبه و مقایسه شده است. برای محاسبه میزان انحراف



شکل ۵ | مقایسه نمودارهای IPR تجربی و شبیه سازی در ضریب بازیافت ۳ درصد



شکل ۶ | مقایسه نمودارهای IPR تجربی و شبیه سازی در ضریب بازیافت ۱۰ درصد

که عبارتند از تولید با فشار ته چاهی معین و یا تولید در نرخ جریان مشخص. در این تحقیق برای تهیه نمودارهای IPR از هر دو روش استفاده شد تا تفاوت میان آنها نیز مشخص شود. مدل شبیه سازی تا ضرایب بازیافت ۵، ۸، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و با دو نوع قید مورد اشاره اجرا<sup>۱۵</sup> شد و فشار ته چاه بر حسب نرخ جریان رسم گردید. شکل های ۳-۴ به ترتیب نمودارهای مربوط به قید فشار ثابت و نرخ جریان ثابت را به ازای مقادیر مختلف ضریب بازیافت نشان می دهند. همان طور که در این شکل ها نشان داده شده نمودارهایی که بر اساس فشار ثابت ته چاهی رسم شده اند نسبت به حالت نرخ جریان ثابت پایداری کمتری دارند.

با توجه به شکل های ۳-۴ نتیجه می گیریم که برای حصول نمودارهای IPR بهتر و هموارتر، ضروری است در شبیه سازی ها از حالت نرخ جریان ثابت استفاده شود.

جدول ۱ | مشخصات مدل مخزن

مشخصه	مقدار	واحد
تخلخل	۲۵	درصد
تراوایی افقی	۱۰۰	میلی داریسی
تراوایی عمودی	۱۰	میلی داریسی
طول مدل	۵۰۰۰	فوت
عرض مدل	۲۰۰۰	فوت
ارتفاع مدل	۵۰۰	فوت
ضریب حجمی سازند نفت	۱/۴۱	بشکه / بشکه استاندارد
گرانروی نفت	۱/۴	سانتی پویز
تعداد سلول ها در جهت X	۴۰	-
تعداد سلول ها در جهت Y	۱۰۰	-
تعداد سلول ها در جهت Z	۲۰	-
اندازه سلول ها در جهت X	۵۰	فوت
اندازه سلول ها در جهت Y	۵۰	فوت
اندازه سلول ها در جهت Z	۲۵	فوت

جدول ۲ | مقایسه نمودارهای IPR با نتایج شبیه سازی در ضرایب بازیافت ۱۰ و ۳ درصد

میزان انحراف در ضریب بازیافت ۱۰ درصد	میزان انحراف در ضریب بازیافت ۳ درصد	روش ایجاد نمودار IPR
۰/۰۱۷۳	۰/۰۱۹۷	Vogel اصلاح شده
۰/۰۲۳۳	۰/۰۲۱۳	Bendakhlia & Aziz
۰/۰۵۲۸	۰/۰۷۷۳	Cheng
۰/۴۹۵	۰/۶۲۳	Retnanto & Economides



### نتیجه‌گیری

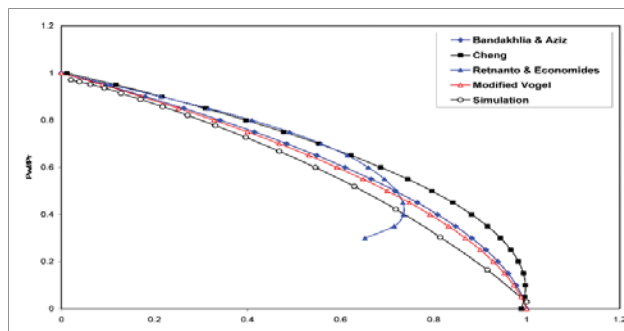
با توجه به شکل-۴ و با در نظر گرفتن شیب منحنی‌ها در ضرایب مختلف بازیافت مشخص می‌شود که در ضرایب بازیافت بالاتر، نمودار شاخص بهره‌دهی ضمن افزایش نرخ جریان با شیب بیشتری نزول می‌کند. با افزایش ضریب بازیافت، بیشینه نرخ جریان (AOF) کاهش می‌یابد. دلیل این امر آنست که با افزایش ضریب بازیافت، فشار متوسط مخزن کاهش یافته و در نتیجه نیروی اختلاف فشاری که نقش اساسی در راندن سیال در محیط متخلخل دارد کاهش می‌یابد.

رابطه Vogel در همه ضرایب بازیافت‌ها بهترین تطابق را با نتایج شبیه‌سازی دارد. بنابراین می‌توان به جای شبیه‌سازی (که زمان‌بر و پرهزینه است) از مدل Vogel که قابل قبول نیز هست استفاده نمود. همان‌گونه که در شکل‌های ۷ و ۸ نیز مشهود است هرچه ضریب بازیافت افزایش می‌یابد رابطه Vogel نتایج بهتر و نزدیک‌تری به نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌دهد. بنابراین دقت مدل Vogel در ضرایب بازیافت‌های بالا، بیشتر است. پیشنهاد می‌شود برای مقایسه هرچه بهتر نمودارهای IPR، منحنی عملکرد جریان داخلی چاه افقی بر اساس داده‌های واقعی (نرخ جریان و فشار ته‌چاهی نفت) نیز رسم گردد. هرچند به دلیل آنکه در اکثر شرکت‌های نفتی، چاه را فقط در یک نرخ جریان خاص جریان می‌دهند تحقق این امر دشوار به نظر می‌رسد.

از مربع اختلاف فشار ته‌چاهی بین نمودار مورد نظر و نمودار شبیه‌سازی مطابق فرمول زیر استفاده شده است:

$$deviation = \sum \left[ \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right)_{correlation} - \left( \frac{P_{wf}}{P_R} \right)_{simulation} \right]^2 \quad (7)$$

همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود نمودار Vogel اصلاح شده نسبت به نتایج شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار ECLIPSE کمترین انحراف را دارد.



شکل ۷ | مقایسه نمودارهای IPR تجربی و شبیه‌سازی در ضرایب بازیافت ۱۰ درصد

### پانویس‌ها

- |                                    |                                    |                                  |
|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Inflow Performance Relationship | 6. deliverability                  | 11. NIPER                        |
| 2. inflow performance              | 7. Tubing Performance Relationship | 12. Absolute Open Flow Potential |
| 3. bottom hole pressure            | 8. operating point                 | 13. fully implicit               |
| 4. recovery factor                 | 9. multilateral wells              | 14. constraint                   |
| 5. simulation model                | 10. vertical well                  | 15. run                          |

### منابع

- [1] Sada D. Joshi, Ph.D.: "Horizontal well Technology", Sep 1990, pp 1-26
- [2] Shaojun Wang.: "Predicting productivity Index of horizontal well", journal of energy resources technology, 2007.
- [3] J. V. Vogel.: "Inflow Performance Relationships for Solution Gas Drive Wells", Journal of Petroleum Technology, January, 1968, 83-92.
- [4] Albertus Retnanto and Michael J. Economides: "Inflow Performance Relationships of Horizontal and Multi-branched Wells in a Solution Gas-Drive Reservoir", SPE paper 50659, presented at the SPE European Petroleum Conference held in The Hague, The Netherlands, and October 20-22, 1998.
- [5] A.M. Cheng: "Inflow Performance Relationships for Solution-Gas-Drive", SPEpaper20720, presented at the 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineering held in New Orleans, LA, September 1990, 23-26.
- [6] H. Bendakhila and K. Aziz: "Inflow Performance Relationships for Solution-Gas Drive Horizontal Well", SPE paper 19823, presented at the 64th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in San Antonio, TX, October 8-11, 1989.
- [7] Weller, W.T.: "Reservoir Performance during Two-phase Flow", Journal of Petroleum Technology, February, 1960, 240-246.
- [8] Chang, M.M.: "Simulation of Production from Wells with Horizontal and Slanted Laterals", Department of Energy Report No. NIPER-328, Revised, October, 1998.