



## بررسی پدیده‌ی جریان برگشتی در چاه‌های چندشاخه‌ای و کاربرد آن در چاه هوشمند

شهرام قدمی • دانشگاه صنعتی شریف

اسماعیل قاسمی کفرودی\*، حسن بیگلریان • پژوهشگاه صنعت نفت

### چکیده

چاه‌های چندشاخه‌ای فن آوری جدیدی برای افزایش تولید به‌زای هر چاه و کاهش هزینه‌های ناشی از گسترش میدان است که به‌سرعت در حال جایگزینی به‌جای روش‌های قدیمی است. برای مدل‌سازی این نوع چاه‌ها از روش‌های کلاسیک، نیمه‌تحلیلی و تحلیلی استفاده می‌شود. مدل‌های بسته که از روش‌های تحلیلی است برای پیش‌بینی شرایط وقوع جریان برگشتی در چاه‌های چندشاخه‌ای کاربرد دارند. در این روش ابتدا چاه و مخزن به  $n$  قسمت تقسیم و افت فشار چاه محاسبه می‌شود. یک بررسی موردی نشان می‌دهد که در یک چاه دوشاخه‌ای با فشارهای اولیه ۱۹۶۲ و ۳۴۴۴ psi در فشارهای سرچاهی ۱۲۰ و ۸۰۰ psi به ترتیب ۴۵ و ۲۲ درصد از تولید مربوط به چاه کم‌فشار است و حدوداً در فشار سرچاهی ۸۵۰ psi جریان از شاخه‌ی پر فشار به شاخه‌ی کم‌فشار جاری می‌شود. برای جلوگیری از وقوع جریان برگشتی یا باید توسط شیرهای تنظیم فشار، فشار در شاخه‌ی پر فشار کاهش داده شود تا در نقطه‌ی تقاطع فشار به‌اندازه‌ی کافی کاهش یابد یا شاخه‌ی کم‌فشار بسته شود تا فشار در مخزن پر فشار به‌اندازه‌ی کافی کاهش یابد که این دو روش نیازمند استفاده از ابزار چاه هوشمند برای کنترل جریان است.

### اطلاعات مقاله

#### \* دریافت:

۹۴/۱۱/۲۰

#### \* پذیرش:

۹۴/۱۱/۲۷

#### \* ارسال برای چاپ:

۹۴/۱۲/۳

### واژگان کلیدی

چاه چندشاخه‌ای  
چاه هوشمند  
جریان بازگشتی  
تولید هر شاخه

### مقدمه

چاه‌های چندشاخه‌ای با پخش کردن جریان ورودی در میان دو یا چندشاخه‌ی جانبی کوچک‌تر، افت فشار اصطکاکی هنگام تولید را کاهش می‌دهند. مثلاً شاخه‌های جانبی<sup>۱</sup> در مقایسه با یک چاه افقی تک‌حفره‌ای با نرخ تولید و سطح تماس یکسان، فشار اصطکاکی را کاهش می‌دهند. با وجود آنکه تجهیزات چاه‌های چند شاخه‌ای نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه‌ی بیشتری دارد اما از طریق کاهش حفاری تعداد چاه‌های مورد نیاز، به طرز مؤثری هزینه‌ی کل و همچنین هزینه‌های توسعه (مثل هزینه‌های عملیاتی) را کاهش می‌دهد. این فن آوری، تجهیزات سرچاهی، سکو، رایزر و تجهیزات تکمیلی زیردریایی را کاهش می‌دهد که این موارد سبب کاهش هزینه می‌شود. این فن آوری همچنین استفاده از اسلات را روی سکوهای دریایی یا قالب‌های زیرسطحی بهینه می‌کند. این چاه‌ها اندازه‌ی سکوهای خشکی و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از عملیات حفاری را نیز کاهش می‌دهند. با کاهش حفره‌های اصلی حفاری، خطرات عملیات حفاری در مجرای بالای<sup>۲</sup> کاهش می‌یابد. چاه‌های با شاخه‌های جانبی چندگانه برای بهره‌برداری از مخازنی مثل مخازن نفت سنگین، مخازن کم‌تراوا یا مخازنی با شکستگی‌های طبیعی، مخازن لایه‌ای و هیدروکربن‌های موجود در ساختارهای جداگانه یا ساختارهای چینه‌ای مختلف مناسبند. شاخه‌های جانبی افقی، هنگام تولید، افت فشار را کاهش داده، از مخروطی شدن سطح آب با نفت و گاز<sup>۳</sup> کاسته و تزریق بخار در این مخازن را گسترش

افزایش نیاز به انرژی در شرایط کنونی، نیازمند بهره‌وری بهینه با بیشترین بازدهی است. بدین منظور انسان هر روزه فن آوری‌های جدیدی را در زمینه‌ی استخراج از مخازن توسعه می‌دهد که در این مورد می‌توان به چاه‌های چندشاخه‌ای<sup>۱</sup> اشاره کرد. در بیش از ۱۰ درصد از ۷۴ هزار چاه حفاری شده در جهان از فن آوری چاه‌های چندشاخه‌ای استفاده شده است [۱]. این فن آوری همچنین برای ورود مجدد به چاه‌های موجود نیز استفاده می‌شود. نخستین چاه چندشاخه‌ای (چندجهتی) در دنیا که در ۱۹۵۳ در شوروی سابق با طراحی مهندس الکساندر میخایلوویچ گریگوریان حفر شد به‌منظور ایجاد سطح تماس بیشتر با مخزن و با ۹ شاخه‌ی جانبی در ردیف‌های کرناتهای کربونifer حفاری گردید [۲].

در بعضی موارد، فن آوری چندشاخه‌ای نسبت به سایر فن آوری‌ها (مانند چاه‌های قائم و افقی متداول) مزیت‌های بیشتری دارد. امروزه این چاه‌ها که به‌منظور حفاری بیش از یک مخزن یا سازندهای مختلف استفاده می‌شوند ابزاری مفید جهت تولید اقتصادی از قسمت‌های جداگانه یک مخزن و مخازن حاوی ذخیره‌ی محدود هستند. چاه‌های چندشاخه‌ای برای برداشت از مخازنی با شکستگی‌های طبیعی و مخازن لایه‌ای مناسب است. چاه‌های زه‌کشی با زاویه‌ی زیاد یا افقی چندگانه، شکستگی‌های طبیعی بیشتری را قطع می‌کنند و غالباً نسبت به چاه‌های افقی تک‌حفره‌ای عملیات شکست هیدرولیک تولید بهتری خواهند داشت [۳].

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (ghasemias@ripi.ir)

مهم ترین چالش مدل سازی این نوع چاه ها که معروف به چاه های غیر متعارف<sup>۷</sup> هستند به دست آوردن ضریب چاه<sup>۸</sup> به عنوان رابطه ای بین اختلاف فشار بلوک چاه، مخزن و جریان ورودی به چاه است. این ضریب به شکل هندسی مخزن، چاه و همچنین مشخصات فیزیکی مخزن مثل نفوذ پذیری، ضریب اصطکاک سیال و ... بستگی دارد. برای محاسبه ای این ضریب، روش های متفاوتی وجود دارد که در یک تقسیم بندی می توان آنها را به سه دسته ی روش های کلاسیک، نیمه تحلیلی و تحلیلی تقسیم کرد [۶]. در روش کلاسیک که نخستین بار توسط پیکمن<sup>۹</sup> [۱] و برای چاه های افقی ارائه شده با استفاده از ضریب تولید چاه، رابطه ای بین اختلاف فشار بلوک چاه، مخزن و جریان ورودی به چاه به دست می آید. سپس با استفاده از روش های عددی مثل تفاضل محدود، معادلات چاه و مخزن به یکدیگر کوپل می شوند. مزیت این روش انعطاف پذیری زیاد آن و توانایی شبیه سازی چاه هایی با اشکال پیچیده و همچنین مخازن ناهمگن و ناهمسانگرد<sup>۱۰</sup> است. اما به علت ساده سازی های انجام شده در به دست آوردن این مدل (فرض شده جریان ورودی به چاه شعاعی باشد)، این روش برای شبیه سازی چاه هایی که در آنها جریان چرخشی وجود دارد و جریان به طور عمودی وارد چاه نمی شود (مثل چاه های چندشاخه ای) دقت مناسبی دارد. مطالعات موریتا<sup>۱۱</sup> [۷] نشان می دهد که مشکل دیگر این روش، زمان زیاد لازم برای پردازش و نیز نیاز به اطلاعات زیادی از چاه و مخزن است که معمولاً به دلیل در دسترس نبودن این گونه اطلاعات در ابتدای حفاری، استفاده از این روش در مواردی نامطلوب به نظر می رسد.

راه حل دیگر، استفاده از روش های تحلیلی است که برای بررسی عملکرد چاه در حالت پایدار یا شبه پایدار به کار می روند. در این روش ها ضریب تولید کلی چاه به صورت تحلیلی محاسبه شده و رابطه ی صریحی بین افت فشار و تولید به دست می آید. این گونه مدل ها را مدل های بسته<sup>۱۲</sup> نیز می نامند. نخستین مدل از این نوع را جویو<sup>۱۳</sup> [۸] ارائه کرد و پس از او اکونومیدس<sup>۱۴</sup> [۹] مدلی تحلیلی ارائه داد. همچنین بابو<sup>۱۵</sup> و همکاران [۱۰] مدلی پر کاربرد برای حالت شبه پایدار ارائه کردند. آنها ضریب چاه را برای جریانی در حالت شبه دائم و در یک مخزن مکعبی شکل به دست آوردند. در این روش فرض شده چاه که کاملاً افقی است یک محور موازی داشته باشد. همچنین مخزن کاملاً همگن و تک فاز فرض شده که مزیت آن سهولت تخمین تولید چاه است.

در روش تحلیلی دیگری، به طور کلی ابتدا چاه را به قسمت هایی تقسیم می کنند و در هر قسمت با استفاده از فرض هایی مانند جریان ثابت یا فشار ثابت، ضریب چاه را تقریب می زنند. در روشی که کامکم<sup>۱۶</sup> و همکاران [۱۱] ارائه کردند ابتدا چاه به قسمت هایی تقسیم می شود و سپس با روش های تحلیلی ذکر شده ضریب چاه برای هر قسمت محاسبه می گردد

می دهند [۳ و ۴]. شاخه ها به ویژه در مخازن کم ضخامت نفتی و کلاهک های گازی، مخروطی شدن سطح آب یا گاز با نفت<sup>۱۷</sup> را کاهش می دهند. امروزه از چاه های چندشاخه ای جهت اکتشاف و نمونه گیری در تعیین کیفیت مخازن افقی، مقدار سطحی آنها و تله های چینه شناسی نیز استفاده می شود (توصیف مخزن) [۴].

فن آوری های جدید، خطرات و پیچیدگی های فنی گوناگون دارند. بنابراین علاوه بر کاربرد آنها باید معایبشان را نیز برشمرد. عملیات تکمیل چاه های چندشاخه ای از نظر مکانیکی بسیار پیچیده تر از چاه های معمولی است و به ابزار آلات و سیستم های ته چاهی بستگی دارد. کنترل چاه در حین حفاری به روش چندشاخه ای یا عملیات تکمیل نیز می تواند بسیار پیچیده باشد. همچنین در خصوص دسترسی به حفاره ی چاه برای تعمیر یا مدیریت مخزن خطرات بیشتری وجود دارد [۵]. تکمیل چاه های چندشاخه ای از ابتدای حفاری تا مرحله ی تولید، در شش مرحله ی تکمیل چاه انجام می شود که در دو مرحله ی نخست، حفاری چاه اصلی و شاخه های جانبی صورت می گیرد. ابتدا حفاره و جداره گذاری چاه اصلی تا عمق مدنظر (جهت انحراف) و سپس حفاری شاخه ها به طور جداگانه انجام می شود. طی دو مرحله ی چهارم و پنجم آستری در شاخه های جانبی نصب می گردد و سپس پشت آستری را سیمان کاری می کنند. مرحله ی آخر شامل دو بخش است:

- پس از اتمام حفاری شاخه های جانبی و رسیدن به مخزن مورد نظر، لوله مغزی تولیدی درون شاخه های جانبی نصب می شود.
- درون چاه اصلی دو لوله ی تولیدی نصب می گردد. لوله های تولیدی بیرون آمده از هر شاخه ی جانبی را به یکی از این لوله های تولیدی در چاه اصلی متصل می کنند و پس از آن عملیات تحریک مخزن و سپس تولید آغاز می شود [۵].

۱   متغیرهای مورد استفاده در روابط ۲ تا ۵ [۱۴]		
$k_{eq} = \sqrt[3]{k_x k_y k_z}$	$z_{eq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_z}}$	$z_{weq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_z}} z$
$x_{eq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_x}}$	$x_{weq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_x}} x$	$a_{eq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_x}}$
$y_{eq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_y}}$	$b_{eq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_y}}$	$L_{eq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_y}}$
$y_{weq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_y}} y$	$h_{eq} = \sqrt{\frac{k_{eq}}{k_z}}$	$r_{weq} = \frac{1}{2} r_w \left( \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} + \sqrt{\frac{k_z}{k_x}} \right)$
$A_{eq} = a_{eq} k$		

که با این روش می‌توان در خصوص اثرات ناشی از افت فشار جریان دو فاز در داخل لوله نیز تحقیق کرد. به‌هر حال این روش با وجود دقت بیشتر در مقایسه با روش‌های تحلیلی ذکر شده، با این محدودیت مواجه است که تنها عملکرد چاه را در حالت پایا یا شبه‌پایا بررسی می‌کند و نیز در هر مخزن تنها یک چاه می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین برای بررسی عملکرد یک چاه چندشاخه‌ای در داخل یک مخزن نمی‌توان از این روش استفاده کرد. در این میان یکی از آثار نامطلوب، اثر جریان برگشتی<sup>۱۷</sup> یعنی حرکت جریان از چاهی به چاه دیگر است که سبب کاهش قابل ملاحظه‌ی تولید می‌گردد. این پدیده معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که فشار خروجی سرچاه به فشار مخازن نزدیک باشد. برای بررسی این پدیده الگوریتم‌های مختلفی پیشنهاد شده که در همگی آنها باید از روش سعی و خطا استفاده نمود تا بتوان به‌طور کلی جریان برگشتی و عملکرد کلی چاه را پیش‌بینی کرد [۱۲ و ۱۳].

در این مقاله ابتدا مدل تحلیلی استفاده شده جهت چاه‌های چندشاخه‌ای بررسی خواهد شد، سپس پدیده‌ی جریان برگشتی و نحوه‌ی پیش‌بینی و نیز جلوگیری از وقوع آن بررسی می‌گردد و در ادامه نیز با ارائه‌ی مثالی اهمیت استفاده از شیرهای کنترل جریان جهت جلوگیری از جریان برگشتی و نیز بهینه‌سازی عملکرد چاه مطالعه خواهد شد.

#### ۱- عملکرد چاه‌های چندشاخه‌ای با استفاده از مدل‌های بسته

در چاه‌های چندشاخه‌ای حداقل دو شاخه به قسمت اصلی چاه متصل شده است. تولید از هر شاخه می‌تواند با شاخه‌ی اصلی ترکیب شود تا تولید کلی چاه را افزایش دهد یا هر شاخه به‌صورت جداگانه تولید کند. فشار در قسمت اصلی باید با شرایط جریان در هر شاخه‌ی متصل به تقاطع سازگار باشد؛ بدین معنی که فشار در قسمتی که شاخه‌ها به یکدیگر می‌رسند یا به قسمت اصلی متصل می‌شوند برابر باشد. در غیر این صورت تولید از یک شاخه می‌تواند به شاخه‌ی دیگر جاری شده و سبب کاهش تولید کلی

۲ | مشخصات مخزن چاه دو شاخه‌ای [۱۳]

مشخصات	چاه ۱	چاه ۲
قطر چاه (in)	۶٫۵	۶٫۵
نفوذپذیری افقی (md)	۱۷۵	۱۷۵
نفوذپذیری عمودی (md)	۱۰	۱۰
ضخامت مخزن (ft)	۸۱	۵۸
چگالی نفت (API °)	۳۲	۳۲
گرانروی (cp)	۳۰۰	۳۰۰
نسبت گاز به نفت (scf/bbl)	۶۰۰	۶۰۰
طول چاه (ft)	۲۰۰۰	۲۰۰۰
فشار اولیه‌ی چاه (psi)	۳۴۴۴	۱۹۶۲

گردد. در این مدل فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود:

- هر شاخه افقی بوده و به قسمت اصلی چاه متصل است.
- قسمت اصلی چاه تولیدکننده نیست و تنها برقرار کننده‌ی رابطه‌ی بین شاخه‌هاست.
- افت فشار در قسمت شاخه‌ها و قسمت اصلی چاه در نظر گرفته می‌شود.
- در هر مخزن تنها یک شاخه وجود دارد و مخازن از یکدیگر مستقل هستند.

فرض می‌شود که جریان ورودی به چاه در هر قسمت کاملاً شعاعی باشد.

#### ۱-۱- محاسبه‌ی تغییرات فشار و جریان در یک شاخه

برای محاسبه‌ی تغییرات فشار و جریان در داخل یک شاخه‌ی چاه، ابتدا باید چاه و مخزن به  $\Pi$  قسمت تقسیم شوند و به‌منظور محاسبه‌ی افت فشار در دهانه‌ی چاه (که در ادامه شرح داده خواهد شد) مدل جریان تک‌فاز به کار گرفته شود. برای محاسبه‌ی افت فشار در دهانه‌ی چاه از رابطه‌ی ۱- استفاده می‌شود که در آن  $Q$  جریان ورودی به چاه در قسمت مدنظر است،  $P_r$  فشار مخزن،  $P_{wf}$  فشار درون چاه در قسمت مورد بررسی است و متغیر [به مشخصات هندسی و خواص سنگ و سیال مخزن بستگی دارد. برای محاسبه‌ی جریان ورودی به هر قسمت مخزن فرض می‌شود که چاه افقی، مخزن مورد بررسی مکعبی شکل و وجوه جانبی مخزن موازی با چاه باشند] [۱۳].

$$q = J (p_r - p_{wf}) \quad (1)$$

رابطه‌ی جریان استفاده شده در مدل، آثار مربوط به ناهمسان‌گردی نفوذپذیری مخزن را در نظر می‌گیرد. همچنین لازم نیست چاه در مرکز مخزن قرار گیرد. رابطه‌ی موردنظر از ضریب شکل دیتسز [۱۴] استفاده می‌کند که در آن فرض شده مخزن شرط مرزی بدون جریان داشته باشد. همچنین برای محاسبه‌ی جریان در جهت  $X$  (در جهت چاه) از ضریب شکل نفوذپذیری نسبی استفاده می‌شود. برای به‌دست آوردن رابطه از شرط حالت شبه‌پایدار استفاده شده و در نتیجه ضریب تولید چاه با روابط ۱- تا ۵ محاسبه می‌گردد.

$$J = \frac{k_{eq} b_{eq}}{141.2 B \mu \left( \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{4A_{eq}}{\gamma r_{weq}^2} \right] - \frac{1}{2} \ln C_A + S_p + s \right)} \quad (2)$$

تعریف متغیرهای مورد استفاده در جدول ۱- ارائه شده است. ضریب

شکل  $C_A$ ، در معادله ۲- از رابطه ۳- محاسبه می‌شود:

$$\ln C_A = 4.485 - \left[ 4.187 - 12.56 \left( \frac{x_{weq}}{a_{eq}} \right) + 12.56 \left( \frac{x_{weq}}{a_{eq}} \right)^2 \right] \left( \frac{a_{eq}}{h_{eq}} \right) + 2.0 \ln \left( \sin \left( \frac{\pi z_{weq}}{h_{eq}} \right) \right) + \ln \left( \frac{a_{eq}}{h_{eq}} \right) \quad (3)$$

و ضریب نفوذپذیری نسبی،  $S_p$ ، عبارت است از:

$$S_p = \left( \left( \frac{b_{eq}}{L_{eq}} \right)^{0.858} - 1 \right) (A + B) \quad (4)$$

که در آن  $A$  و  $B$  برابرند با:

$$A = -0.025 + 0.022 \ln C_A - 3.781 \ln \left( \frac{h_{eq}}{a_{eq}} \right) \\ B = \frac{1.289 - 4.751 \left( \frac{y_{weq}}{b_{eq}} \right) + 4.652 \left( \frac{y_{weq}}{b_{eq}} \right)^2 + 1.654 \left( \frac{y_{weq}}{b_{eq}} \right) - 1.718 \left( \frac{y_{weq}}{b_{eq}} \right)^2}{\left( \frac{h_{eq}}{a_{eq}} \right) \left( \frac{a_{weq}}{b_{eq}} \right)^{1.472}} \quad (5)$$

پس از تقسیم بندی هر چاه به  $n$  قسمت، برای هر قسمت یکی از سه حالت قسمت انتهایی<sup>۱۸</sup>، قسمت پاشنه<sup>۱۹</sup> یا قسمت میانی اتفاق می‌افتد. برای قسمت میانی، چاه به طور سراسری در ناحیه تقسیم شده نفوذ می‌کند. بنابراین ضریب شکل نفوذپذیری نسبی برابر صفر است. برای قسمت‌های مربوط به انتها و پاشنه، این ضریب طبق معادله ۴- محاسبه می‌شود. اگر موقعیت چاه نسبت به مرزهای جهت  $x$  متقارن نباشد، ضریب نفوذپذیری برای قسمت‌های پاشنه و انتها متفاوت خواهد بود. بدین ترتیب ضریب تولید  $J$ ، برای هر قسمت محاسبه می‌شود. نقطه میانی هر قسمت به عنوان مرکز فشاری آن در نظر گرفته می‌شود و فشار در سراسر یک قسمت ثابت و برابر فشار مرکز آن قسمت فرض می‌گردد.

پس از آن برای قسمت انتهایی چاه، یک فشار حدس زده می‌شود و سپس با استفاده از رابطه افت فشار در دهانه چاه، جریان ورودی به آن قسمت محاسبه می‌گردد. با داشتن نرخ در آن قسمت و استفاده از رابطه افت فشار اصطکاکی، فشار داخل چاه در قسمت بعدی چاه محاسبه می‌شود و همین روند برای سایر قسمت‌ها نیز تکرار می‌گردد تا به پاشنه چاه ختم شود. به دلیل آنکه فشار پاشنه، جزئی از معلومات مسأله است، فشار حاصل با این فشار مقایسه می‌شود و در صورت یکسان نبودن آنها، فشار جدیدی برای قسمت انتهایی چاه فرض شده و مجدداً مراحل قبلی تکرار می‌گردد.

## ۲-۱- محاسبه عملکرد چاه‌های چندشاخه‌ای

در ادامه روند محاسبه عملکرد چاه، به دست آوردن فشار پاشنه‌ها و

در نتیجه توزیع فشار و جریان در داخل شاخه‌ها توضیح داده خواهد شد. برای این کار باید فشار یا جریان خروجی مشخص باشد.

الف) با فرض داشتن فشار خروجی، یک مقدار برای قسمت جریان خروجی حدس زده ( $Q_1$ ) و افت فشار از خروجی چاه تا نخستین شاخه چاه محاسبه می‌شود ( $P_{wf3}$ ).

ب) سپس به از روش گفته شده برای محاسبه عملکرد یک شاخه، با داشتن فشار پاشنه و فشار مخزن، جریان تولیدی در آن شاخه به دست می‌آید.

ج) جریان محاسبه شده در یک شاخه از قسمت قبل را از جریان شاخه اصلی کم کرده ( $P_1 - P_3$ ) و مجدداً افت فشار تا شاخه  $S$  بعدی را محاسبه می‌کنند و فشار پاشنه در شاخه ۲- ( $Q_{wf3}$ ) به دست می‌آید. همین روند برای تمامی شاخه‌ها انجام می‌گردد.

د) در پایان مجموع جریان تولیدی از شاخه‌ها ( $q_1 + q_2 + q_3$ ) با جریانی که در قسمت ۱- ( $Q_1$ ) فرض شده بود مقایسه می‌گردد. اگر تفاوت بین این دو مقدار از خطای فرض شده بیشتر باشد مجدداً به قسمت ۱- برگشته و مقدار تصحیح می‌شود.

## ۲-۲- بررسی جریان برگشتی

یکی از دلایل کاهش تولید در چاه‌های چندشاخه‌ای، جریان برگشتی است. زمانی جریان برگشتی از مخزن پایینی به بالایی اتفاق می‌افتد که فشار سطح بسیار زیاد و نزدیک فشار مخزن بالایی باشد و در نتیجه جریان از مخازن پایینی به جای اینکه به سطح جاری شود به شاخه‌ی بالایی وارد می‌گردد؛ چرا که فشار سیال در مسیر رسیدن به سطح کاهش می‌یابد و اگر فشار در سطح زیاد باشد به دلیل آنکه تعادل فشاری برقرار نمی‌شود باید جریان به شاخه‌های بالاتر جاری شود. برای بررسی جریان برگشتی ابتدا فرض می‌شود که جریان برگشتی رخ نداده باشد. سپس اگر فشار در نقاط تقاطع شاخه‌ها با قسمت اصلی، جواب منطقی داشت؛ بدین معناست که با حرکت از سر چاه به سمت شاخه‌های پایین تر، فشار افزایش می‌یابد و در نتیجه جریان برگشتی اتفاق نمی‌افتد. در غیر این صورت با این فرض که در یکی از شاخه‌ها جریان برگشتی اتفاق افتاده باید محاسبات را تکرار نموده و دوباره منطقی بودن جواب‌های حاصل را بررسی کرد.

دو راه برای پیشگیری از وقوع این نوع جریان برگشتی در چاه‌های چندشاخه‌ای وجود دارد. روش نخست کاهش فشار در پایین ترین شاخه توسط شیرهای تنظیم فشار است؛ تا فشار در نقطه تقاطع به اندازه‌ی کافی کاهش یافته و جریان اجازه یابد به سمت سطح حرکت کند. در روش دوم شاخه‌ی بالایی بسته می‌شود تا فشار در مخزن پایینی به اندازه‌ی کافی کاهش یابد. این دو روش نیازمند استفاده از ابزار چاه هوشمند برای کنترل



جریان است [۱۵].

### ۳- بررسی موردی

شاخه‌ی ۲- اتفاق می‌افتد (در فشار بیشتر از ۸۰۰ psi نرخ شاخه‌ی ۲- به صفر نزدیک می‌شود). بنابراین وقتی جریان شاخه‌ی ۱- به‌طور نسبی کمتر است، فشار در نقطه‌ی تقاطع، نسبت به فشار مخزن در شاخه‌ی ۲- بیشتر است.

در فشار سرچاهی زیاد، شاخه‌ی ۱- نسبت به شاخه‌ی ۲- توانایی تولید بیشتری دارد؛ این در حالی است که نرخ تولیدی از شاخه‌ی ۲- در فشارهای زیاد (تقریباً فشار بیشتر از ۸۰۰ psi)، صفر است. بنابراین در فشارهای زیاد تا زمانی که فشار سرچاه به‌اندازه‌ای است که شاخه‌ی ۱- بتواند تولید کند جریان برگشتی از شاخه‌ی ۱- به شاخه‌ی ۲- اتفاق می‌افتد. یعنی در فشارهای زیاد که شاخه‌ی ۱- توانایی تولید دارد شاخه‌ی ۲- به دلیل فشار کمتر مخزن آن قادر به تولید نیست و در نتیجه جریان از شاخه‌ی ۱- به شاخه‌ی ۲- وارد می‌شود.

در شکل ۲- مشاهده می‌شود که در فشارهای زیاد عمده‌ی کسر جریان مربوط به شاخه‌ی ۱- است و با کاهش فشار سرچاهی، با وجودی که کسر تولید از شاخه‌ی ۲- افزایش و کسر تولید از شاخه‌ی ۱- کاهش می‌یابد اما همچنان کسر تولید از شاخه‌ی ۱- بیشتر است. نکته‌ی مهمی که در شکل ۲- مشاهده می‌شود روند تغییرات کسر تولید از شاخه‌هاست؛ نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش فشار سرچاهی، روند کاهش تولید از شاخه‌ی ۲- در فشاری بین ۶۹۰ تا ۸۰۰ psi به شدت افزایش می‌یابد و حتی امکان فشار سرچاهی باید کمتر از این نگه داشته شود.

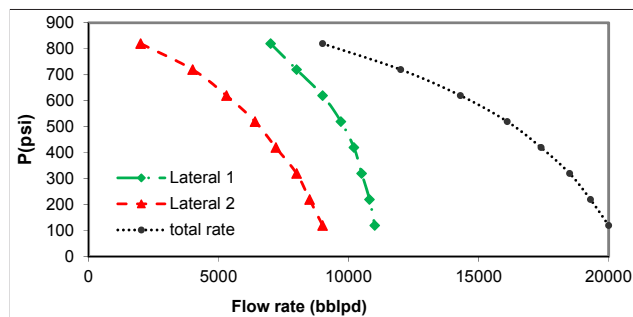
با افزایش فشار، کسر تولید از شاخه‌ی ۱- افزایش یافته و کسر تولید از شاخه‌ی ۲- کاهش می‌یابد؛ تا زمانی که جریان برگشتی از شاخه‌ی ۱- به شاخه‌ی ۲- اتفاق بیفتد. در شکل ۳- که کسر کلی تولید برای هر شاخه برحسب نرخ تولید رسم شده این مطلب به وضوح دیده می‌شود. در فشارهای کم که سبب نرخ تولید زیاد می‌شود کسر تولید از شاخه‌ی ۲- زیاد است. اما با افزایش فشار سرچاهی، سهم تولید شاخه‌ی ۲- کاهش یافته و به تدریج به سمت صفر میل می‌کند و پس از آن جریان برگشتی اتفاق می‌افتد. باید توجه داشت که در سمت راست نمودار بیشترین نرخ تولید در فشار کم (۱۲۰ psi) اتفاق می‌افتد و به تدریج با حرکت به سمت چپ، فشار افزایش می‌یابد که تولید از شاخه‌ی ۲- کاهش یافته و در نهایت جریان برگشتی از شاخه‌ی ۱- به شاخه‌ی ۲- اتفاق می‌افتد.

### نتیجه‌گیری

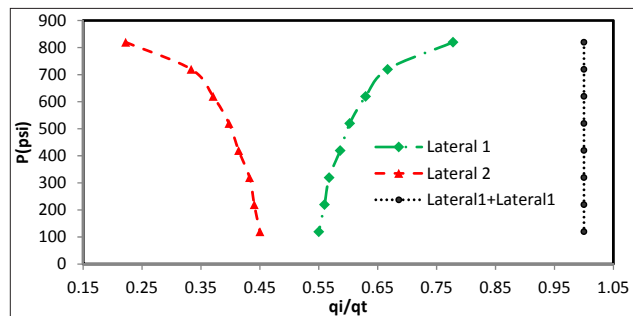
چاه‌های چندشاخه‌ای به دلایل اقتصادی و همچنین افزایش تولید، مورد توجه روزافزون قرار گرفته‌اند. پدیده‌ی جریان برگشتی که در چاه‌های چندشاخه‌ای متداول است سبب کاهش تولید از چاه می‌شود. با استفاده از مدل‌های بسته که جزء روش‌های تحلیلی است. می‌توان چاه‌های چندشاخه‌ای را مدل‌سازی کرد. با این روش می‌توان وقوع جریان برگشتی

در این قسمت مثالی برای یک چاه دو شاخه‌ای ارائه می‌شود و اثر تغییرات فشار سطح بر عملکرد چاه بررسی می‌گردد. مشخصات آرایش چاهی که به دو مخزن مستقل از یکدیگر متصل است در جدول ۲- ارائه شده است.

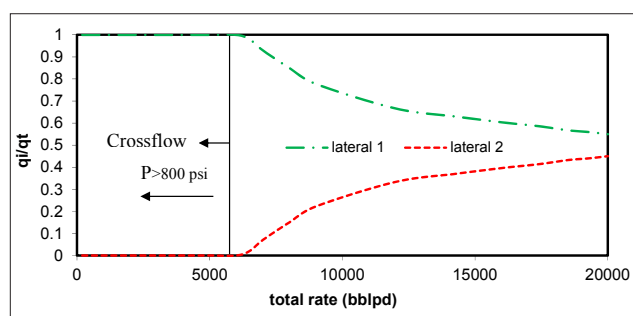
پس از مدل‌سازی چاه نتایج ارائه شده است. در شکل ۱- نمودار تغییرات جریان ورودی به هر شاخه و جریان کلی بر حسب فشار خروجی چاه رسم شده است. در این شکل نمودارها در فشار سرچاهی ۸۰۰ psi متوقف می‌شود؛ چرا که در فشاری بیشتر از آن، جریان برگشتی از شاخه‌ی ۱- به



شکل ۱ | نمودار تغییرات جریان ورودی به هر شاخه و جریان کلی بر حسب فشار خروجی چاه



شکل ۲ | کسر تولید هر شاخه در فشارهای مختلف



شکل ۳ | کسر جریان در هر شاخه بر حسب نرخ کل تولید

از شاخه‌ی کم‌فشار به شدت افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از وقوع جریان برگشتی در چاه‌های چندشاخه‌ای باید به یکی از دو شیوه‌ی زیر عمل کرد: الف) فشار در شاخه‌ی پرفشار توسط شیرهای تنظیم فشار کاهش داده شود تا فشار در نقطه‌ی تقاطع به اندازه‌ی کافی کاهش یابد ب) شاخه‌ی کم‌فشار بسته شود تا فشار در مخزن پایینی به اندازه‌ی کافی کاهش یابد این دو روش نیازمند استفاده از ابزار چاه هوشمند برای کنترل جریان است. ■

در این گونه چاه‌ها را پیش‌بینی کرد و با استفاده از امکانات فن آوری چاه هوشمند و پیشگیری از وقوع این پدیده، مانع از کاهش تولید چاه شد. مطالعه‌ی موردی این مقاله نشان می‌دهد که در یک چاه دوشاخه‌ای با فشارهای اولیه‌ی ۱۹۶۲ و ۳۴۴۴psi در فشارهای سرچاهی ۱۲۰ و ۸۰۰psi به ترتیب ۴۵ و ۲۲ درصد تولید مربوط به چاه کم‌فشار است و حدوداً در فشار سرچاهی ۸۵۰psi جریان برگشتی از شاخه‌ی پرفشار به شاخه‌ی کم‌فشار حرکت می‌کند. همچنین روند کاهش تولید از شاخه‌ی کم‌فشار نسبت به افزایش فشار سرچاهی ثابت نیست و در فشارهای بیشتر، روند کاهش تولید

#### پانویس‌ها

- |                         |                        |                  |
|-------------------------|------------------------|------------------|
| 1. Multilateral         | 8. Well Index          | 15. Babu         |
| 2. Dual opposed         | 9. Peaceman            | 16. Kamkom       |
| 3. Platform             | 10. Anisotrope         | 17. Crossflow    |
| 4. Top hole             | 11. Morita             | 18. Toe Segment  |
| 5. Water coning         | 12. Closed Form Models | 19. Heel Segment |
| 6. Conning water or gas | 13. Joshi              |                  |
| 7. Unconventional       | 14. Economides         |                  |

#### منابع

- [1] Peaceman, D.W., "Interpretation of Well-Block Pressures in Numerical Reservoir Simulation", Society of Petroleum Engineers Journal, Vol. 23(3), pp. 531-543, 1983.
- [2] Khamitov, O., Prostyakov, K., Khasanov, R., "Horizontal Well Drilling in Bashneft Oil Company-Current Situation and Prospects", SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition, Russia, 2014.
- [3] Augustine, J.R., "An Investigation of the Economic Benefit of Inflow Control Devices Horizontal Well Completions Using a Reservoir-Wellbore Couples Model", presented at the 2008 SPE, European Petroleum Conference, Aberdeen, Scotland, U.K., 2002.
- [4] Husain, T. M., Yeong, L. C., Saxena, A., Cengiz, U., Ketineni, S., Khanzhode, A. and Muhamad, H., "Economic Comparison of MultiLateral Drilling over Horizontal Drilling for Marcellus Shale Field Development", Integrative Design of Energy & Mineral Engineering Systems, 2011.
- [5] Clark, B., Morley, J. S., "Patent Issued System and method for drilling multilateral wells using magnetic ranging while drilling", Schlumberger Technology Corporation, 2012.
- [6] Valvatne, P.H., Durlafsky L.J., Aziz, K., "Semi-Analytical Modeling of the Performance of Intelligent Well Completions", SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, 2001.
- [7] Morita, N., Singh, S.P., Chen, H.S., Whitfill, D.L., "Three-Dimensional Well Model Pre-Processors for Reservoir Simulation with Horizontal and Curved Inclined Wells", presented at the SPE-AIME 92nd Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 1990.
- [8] Joshi, S.D., "Augmentation of Well Productivity with Slant and Horizontal Wells", Journal of Petroleum Technology", Vol. 40(6), pp. 729-739, 1998.
- [9] Economides, M.J., Brand, C.W., and Frick, T.P. "Well Configurations in Anisotropic Reservoirs", Society of Petroleum Engineers, Vol. 11(4), pp. 257 - 262, 1996.
- [10] Babu, D.K. and Odeh A.S., "Productivity of a Horizontal Well", SPE Reservoir Engineering, pp. 417-421, 1989.
- [11] Kamkom, R., Zhu, D., "Two-Phase Correlation for Multilateral Deliverability", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 2005.
- [12] Gue B., Zhou J., Ling K., Ghalambor A., "A Rigorous Composite-Inflow-Performance Relationship Model for Multilateral Wells", SPE Production & Operations, Vol. 23(2), pp. 241-248, 2008.
- [13] Chen W., Zhu D., Hill A.D., "A Comprehensive Model of Multilateral Well Deliverability", International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, 2000.
- [14] Dietz D.N., "Determination of average reservoir pressure from Build-up Surveys", Journal of Petroleum Technology, Vol. 17(8), pp. 955-959, 1995.
- [15] Zhu, D., Hill, A. D., "Evaluation of Crossflow Effects in Multilateral Wells", SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 2002.