



فرایند به کارگیری تکنولوژی مخازن هوشمند

در صنایع نفت و گاز عموماً متداول است که در گروهی از چاه‌های نفتی، عملیات خاصی انجام و نتایج آنها مطالعه و تحلیل می‌شود، بدون آنکه در سایر چاه‌های باقیمانده‌ی میدان، این عملیات آزمایش شود. همچنین، ممکن است روش انجام آن‌ها در چاه‌های مختلف، متفاوت باشد. یکی از دلایل آن می‌تواند محدودیت بودجه برای انجام چنین عملیاتی و دیگری دلایل فنی خاص هر چاه نفتی برای مناسب بودن آن عملیات باشد. در این مطالعه به بررسی فرایند به کارگیری تکنولوژی چاه هوشمند و اینکه تکنولوژی مخازن هوشمند در کدام چاه‌ها/میادین می‌تواند بهترین نتایج را در پی داشته باشد، خواهیم پرداخت. سوال کلیدی این است که: "کدام چاه‌ها/میادین در هوشمندسازی سود بیشتری به ما می‌رسانند و می‌توانند متخصصان علوم زمین، مهندسان و مدیریت را بهتر به اهداف خود برسانند؟" به این فرایند، فرایند انتخاب چاه‌ها یا غربالگری چاه‌ها و یافتن دستورالعمل نحوه به کارگیری عملیات هوشمندسازی برای اهداف موردنظر گفته می‌شود.

علی‌رغم اینکه غربالگری چاه‌ها برای عملیات مختلف از جمله به کارگیری تکنولوژی مخازن هوشمند بسیار متداول است، اما این فرایند، فرایند ساده‌ای نبوده و تاکنون یک روش یکسان و مشخص برای آن ارائه نگردیده است. اگرچه این موضوع بسیار وابسته به مورد است، در این مقاله تلاش می‌شود یک فرایند کلی در خصوص نحوه به کارگیری تکنولوژی مخازن هوشمند ارائه و ملاحظات موردنیاز در این فرایند تشریح گردد.

واژگان کلیدی: چاه هوشمند، غربالگری، فرایند، شیرهای کنترل درون‌چاهی

مقدمه

پیوسته انجام می‌شود. بدین ترتیب، کاربر می‌تواند شرایط چاه را پایش کند. همچنین، در این تکنولوژی، براساس اطلاعات جمع‌آوری شده، با نصب سامانه کنترلی و شیرهای کنترل بازه‌ای موسوم به ICV، اعمال تصمیمات به‌هنگام و بهینه کردن فرایند تولید یا تزریق امکان‌پذیر است. در این صورت، دستیابی به شرایط عملیاتی بهینه در هنگام تولید از یک چاه بدون نیاز به عملیات درون‌چاهی^۵ فراهم می‌گردد. هدف از کنترل

است تمام ابزارها و ادوات هوشمند در ته چاه نصب شوند، ولی نصب آن‌ها باعث هیچ‌گونه بهبودی در بهره‌دهی نشود که در چنین حالتی به آن، چاه هوشمند گفته نمی‌شود [۲]. بهره‌برداری از چاه‌های هوشمند با چاه‌های معمولی تفاوت دارد. در چاه‌های هوشمند، با توجه به اطلاعات حاصل از حسگرهای نصب شده در درون چاه، نظارت و تفسیر شرایط عملیاتی مانند دما، فشار و مقدار جریان به‌طور

چاه هوشمند چاهی است که به ابزارهای حسگر^۲ و شیرهای کنترل بازه‌ای^۳ درون‌چاهی مجهز شده است به طوری که می‌تواند مقدار جریان سیال تولیدی از قسمت‌های مختلف مخزن را که به وسیله توپیک^۴ از هم جدا شده‌اند، کنترل و تنظیم کند. البته یک چاه تنها زمانی هوشمند است که در طی عمر خود بتواند ارزش افزوده ایجاد کند [۱]. این بدین معنی است که ممکن

*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (behrouzt@ripi.ir)

۱-۱- شناسایی فرصت‌های هوشمندسازی میدانی نفتی

اهداف هوشمندسازی عبارتند از: کاهش هزینه‌های تداخل در تولید، تأخیر در تولید آب/گاز، افزایش بازیافت، بهبود تولید/عملکرد تزریق آب، مدیریت هم‌زمان تولید و تزریق، مدیریت ریسک‌های زمین‌شناسی، مدیریت عملکرد تولید از چند لایه یا کاهش تعداد چاه‌های مورد نیاز برای توسعه میدان از طریق روش‌هایی مانند تولید هم‌زمان از چند ناحیه‌ی مخزنی با فشارهای متفاوت.

تجهیزات هوشمندسازی با اهداف مختلفی نصب می‌شوند. این اهداف ممکن است ملزومات مختلفی برای عملکرد سخت‌افزارهای نصب شده نیاز داشته باشند. ممکن است با هم در یک راستا نیز نباشند (مثلاً لازم باشد تولید نفت را بیشینه و تولید گاز یا آب را هم‌زمان کمینه کرد).

۱-۲- آنالیز داده‌ها و اطلاعات میدان موردنظر (امکان‌سنجی به کارگیری فناوری چاه هوشمند)

باید جهت شناسایی فرصت‌های هوشمندسازی از لحاظ فنی و با ریسک قابل قبول در میدان موردنظر، اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، نمودارگیری، تاریخچه تولید و... بررسی شوند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

آیا حداقل شعاع درون‌چاهی مورد نیاز برای نصب شیرهای کنترلی و سیستم کنترلی فراهم است؟

اعتمادپذیری تجهیزات و سیستم‌های کنترلی چقدر است؟

آیا افزایش ریسک ناشی از به کارگیری سیستم‌های پیچیده باتوجه به پتانسیل ارزش افزوده قابل ملاحظه است؟

۱-۳- تعریف شرایط طراحی چاه هوشمند

این موضوع شامل سوالات زیر است:
 ■ نیازمندی‌های تزریق/تولید چاه یا میدان چیست؟

مخزن واحد زیادی بهبود می‌یابد.

۱- فرایند به کارگیری هوشمندسازی

در این قسمت، به کارگیری فناوری مخازن هوشمند بررسی می‌شود. به طور کلی، در هر مطالعه‌ای، یک چک‌لیست غربالگری برای شناسایی و معرفی چاه و میدان برای انتخاب به مرحله بعدی و مطالعات بیشتر وجود دارد. فرایند غربالگری برای شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی چاه‌ها یا میدانی برای به کارگیری تکنولوژی هوشمند به کار می‌رود. این غربالگری راه‌حل ۱۰۰ درصدی ارائه نمی‌کند ولی انتظار می‌رود میدانی که مناسب‌ترین را معرفی نماید.

اگرچه به کارگیری تکنولوژی مخازن هوشمند در صنعت نفت در جهان مورد قبول واقع شده است، اما به کارگیری جریان کاری یکپارچه‌ی لازم جهت رسیدن به هدف هوشمندسازی، نیازمند توجه سیستماتیک است. در بحث چاه‌های هوشمند علاوه بر نیاز به آماده بودن تکنولوژی، وجود یکپارچگی در کلیه تخصص‌های نفتی فعال در این پروژه‌ها ضروری است. عدم وجود این یکپارچگی خود عاملی است که باعث می‌شود اهداف متصور از به کارگیری چاه‌های هوشمند تحقق نیابد.

در این بخش به بیان جریان کاری یا به عبارت دیگر الگوی هوشمندسازی و ملزومات آن پرداخته خواهد شد. در یک نگاه کلی این الگو به شش فاز تقسیم‌بندی می‌شود که عبارتند از: شناسایی، ارزیابی، انتخاب، تعریف، اجرا و عملیات (شکل-۱).

به طور کلی، سه فاز اول منجر به انتخاب مخزن با اولویت بالاتر جهت هوشمندسازی می‌شود. در سه فاز بعدی، با توجه به انتخاب صورت گرفته، چگونگی انتخاب و اکتساب کلیه تجهیزات لازم تا اجرایی شدن پروژه هوشمندسازی مدنظر قرار خواهد گرفت.



ناحیه‌ای جریان در یک چاه، با استفاده از ICV، به حداکثر رساندن تولید نفت و یا به حداقل رساندن تولید سیالات ناخواسته مانند گاز و آب یا لحاظ کردن هم‌زمان هر دو حالت است [۳]. به طور کلی ارزش افزوده در چاه‌های هوشمند غالباً با کاهش هزینه‌های درون‌چاهی، کم کردن یا به تأخیر انداختن تولید سیالات ناخواسته، شتاب دادن به تولید سیالات دلخواه و همچنین قابلیت انعطاف برای مواجهه با مشکلات عملیاتی حاصل می‌شود.

در سطحی بالاتر از چاه هوشمند، تکنولوژی مخزن هوشمند وجود دارد. در این تکنولوژی، چاه‌های یک مخزن هوشمند به صورت یکپارچه مدیریت می‌شوند به طوری که اطلاعات لازم از هر چاه به روش‌های مختلف به اتاق کنترل فرستاده و تمام تصمیمات در آنجا و براساس استراتژی تولید از مخزن گرفته می‌شود. سپس، دستور لازم از آنجا صادر و بر چاه‌های هوشمند اعمال می‌شود.

میدان هوشمند میدانی است خود کار که به ابزارهایی ویژه مجهز شده است تا بتوان فرایند مدیریت مخازن را بهبود بخشید. این کار با به کارگیری نیروی متخصص در رشته‌های مختلف، تکنولوژی، مدل‌سازی و فرایندهای کنترل با اعمال روش‌های ایمن و در یک فضای کار گروهی انجام می‌شود تا بازیافت نهایی از میدان نفتی یا گازی بیشینه شود. معمولاً عملیات هوشمند کردن ابتدا با هوشمند کردن یک چاه نفتی یا گازی آغاز می‌شود و سپس، برای یکپارچه کردن عملکرد این چاه‌ها مبحث میدان هوشمند به میان می‌آید. در موضوع چاه هوشمند، بحث تکمیل هوشمند مبحث مهمی است که انجام مجموعه‌ای از فرایندها را شامل می‌گردد. در این فرایندها نحوه تولید از مخزن نسبت به تولید به روش‌های مرسوم متفاوت است و در نهایت، با مدیریت تولید چاه‌ها، مدیریت



می‌پذیرد. کیفیت و دقت مدل است که تعیین می‌کند که پیش‌بینی‌ها چقدر دقیق است.

■ تخمین هزینه‌ها: هزینه‌های حفاری، تکمیل، تولید و سایر هزینه‌ها در مقایسه با حالت تکمیل متداول بررسی شود. کم‌شدن هزینه‌های تجهیزات سرچاهی، سکو و هزینه‌های تداخل در تولید می‌تواند عوامل ارزش آفرین چاه هوشمند باشد. ■ آنالیز ریسک فازهای پروژه:

در ادامه، فلوچارت‌ها یا جریان‌های کاری برای نحوه به کارگیری سیستم‌های چاه‌های هوشمند در مخازن ارائه می‌شود. در این

شود؟ (آیا مواد خورنده تولید می‌شود؟)

۴-۱- انتخاب از میان گزینه‌های طراحی معرفی شده

این مرحله شامل گام‌های زیر است:
- پیش‌بینی عملکرد مخزن برای ارزیابی چاه هوشمند: یک چک‌لیست از پارامترهای مورد نیاز برای تصمیم‌گیری در مخازن مختلف باید آماده شود.

■ پیش‌بینی عملکرد مخزن/چاه در سناریوهای مختلف مدل: این کار از طریق شبیه‌سازی انجام

■ چه درجه‌ای از کنترل مورد نیاز است؟ (شیرهای باز/بسته، شیرهای تناسبی)

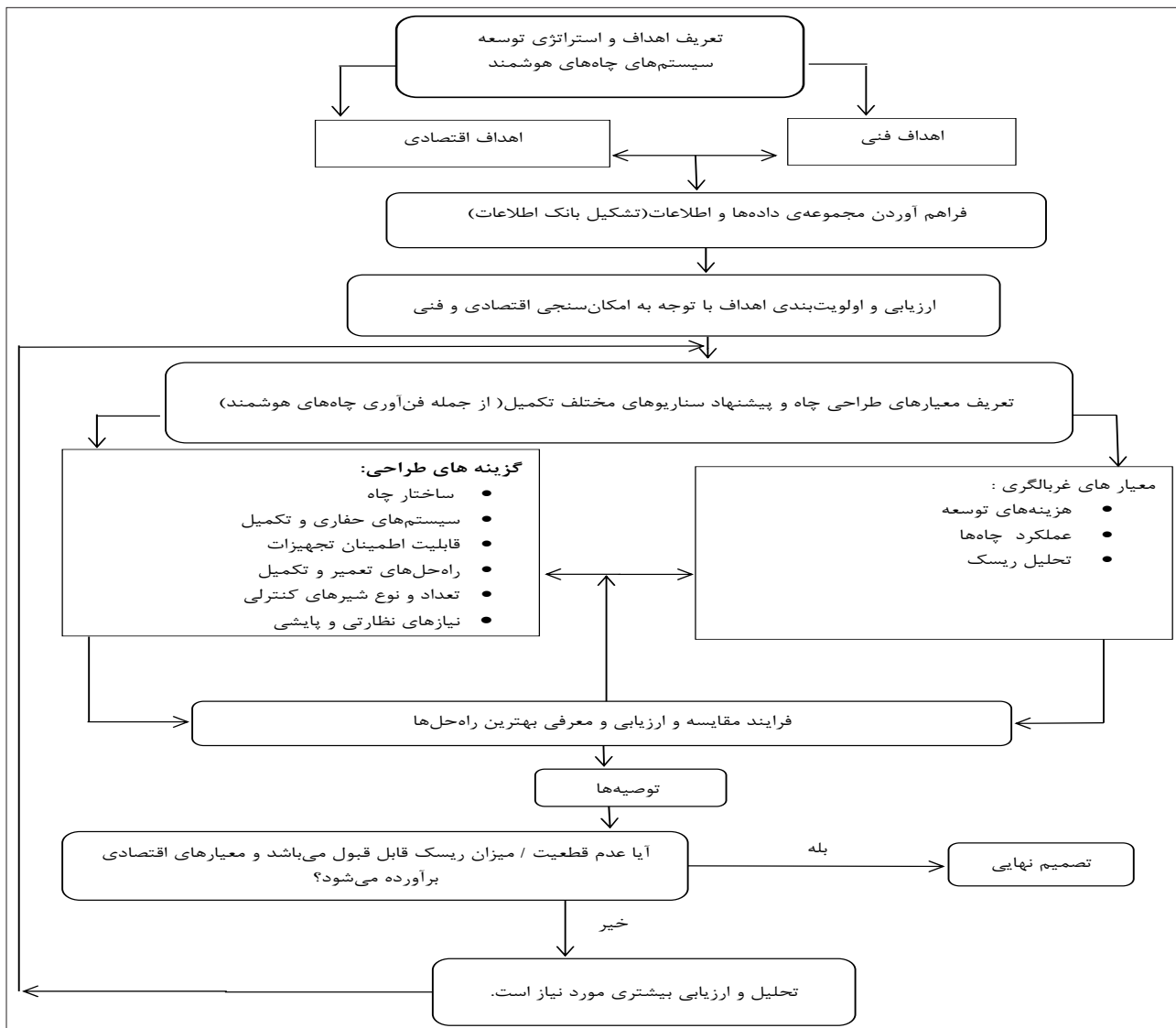
■ چه درجه‌ای از اعتمادپذیری تجهیزات مورد نیاز است؟

■ چه نوع حس‌گرهایی برای فراهم کردن داده‌های پایه مورد نیاز است؟

■ آیا نیاز هست تجهیزات کنترل شن نصب شوند؟

■ شرایط محیطی چگونه است؟ (دما، فشار، ترکیب سیالات تولیدی و...)

■ برای شیرهای کنترلی از چه موادی استفاده



قسمت، ابتدا به معیارهای عام در خصوص غربال‌گری، مشکلات و راه‌حل‌های تکنولوژی مخازن هوشمند پرداخته خواهد شد و در ادامه، به‌عنوان یک نمونه موردی، این موضوع در مخازن ماسه‌سنگی بررسی می‌گردد. در شکل ۲ فرایند کلی توسعه سیستم چاه هوشمند نشان داده شده است.

۱-۵-۰ پارامترهای اساسی در انتخاب چاه‌ها برای هوشمندسازی

پارامترهای اساسی که باید در به‌کارگیری مخزن هوشمند لحاظ شوند، به‌قرار زیر است:

۱-۵-۰-۱ مشخصات مخزن

- ضخامت، اندازه و وسعت مخزن
- گسلی بودن/نبودن مخزن
- خصوصیات سیال
- فشار مخزن
- مکانیزم‌های تولید
- نسبت تحرک
- درجه‌ی ناهمگونی
- شرایط دینامیک مخزن

ملاحظات:

■ مکان و نوع چاه در به‌کارگیری هوشمندی باید در نظر گرفته شود.

■ طول چاه و نوع تکمیل خصوصاً در چاه‌های افقی با توجه به میان‌شکن شدن سیالات ناخواسته و افت فشار بسیار حائز اهمیت است

■ ناحیه‌ی تخلیه چاه

■ ناهمگونی: در مخازن ناهمگون (مثلاً کانال‌های شنی)، سیستم چاه‌های هوشمند می‌تواند بسیار مفید باشد. تعداد شیرهای کنترلی به میزان ناهمگونی و رفتارهای ناهمگن بستگی دارد.

■ مخازن ناهمگون که نسبت تحرک (آب / نفت) بالایی دارند، برای سیستم چاه‌های هوشمند کاندید خوبی هستند چراکه در طی عمر خود دچار تولید سیالات ناخواسته می‌شوند.

۱-۵-۲ محدودیت‌های حفاری و طراحی چاه

- اندازه قطر چاه
- آسیب‌سازند
- حفاری انحرافی
- پایداری عملیاتی
- محدودیت‌های مکانیکی

ملاحظات:

■ طول چاه جهت طراحی تعداد و مکان شیرهای کنترلی

■ پایداری و ملزومات جداسازی ناحیه‌ای با توجه به کنترل جداگانه نواحی مختلف و افزایش پیچیدگی و هزینه

■ نوع سیستم تکمیل

■ خصوصیات سیستم حفاری و سیالات آن

۱-۵-۳ محدودیت‌های تولید

- محدودیت لوله‌های تولید (out flow)
- حفظ فشار مخزن
- پایش و اندازه‌گیری
- عمر چاه
- محدودیت‌های تأسیسات سطح‌الارضی

ملاحظات:

■ ملاحظات شرایط مخزن / سیال

■ محدودیت‌های تأسیسات سطح‌الارضی برای جداسازی آب و گاز که با توجه به میادین مختلف و استراتژی شرکت‌های مختلف، متفاوت است.

■ محدودیت‌های صادرات (ظرفیت لوله‌ها، کیفیت تولید...)

■ نرخ تولید بهینه- با توجه به سرشت و توانایی مخزن و بدون آسیب به سازند

■ نیازمندی‌های نمودارگیری آینده

■ مداخلات اندک

■ پیچیدگی و هزینه تجهیزات تکمیل

■ اندازه‌ی شیر کنترلی (در صورت نیاز)

■ درجه‌ی کنترل و یکپارچگی هیدرولیکی موردنیاز

۱-۵-۴ هزینه‌های توسعه و اقتصاد چاه

- انتخاب تجهیزات
- پیچیدگی سیستم
- تعمیر و نگهداری
- هزینه مداخله در تولید
- نوع چاه
- هزینه در برابر سود
- میزان سرمایه‌گذاری
- قیمت تولید (نفت، گاز و ...)

ملاحظات:

■ هزینه‌های سناریوهای مختلف حفاری و تکمیل چاه

■ هزینه مشکلات احتمالی تأسیسات سیستم چاه‌های هوشمند (زمان نصب اضافه، ضرر از دست دادن شیرهای کنترلی و یا سیستم کنترل و...)

■ سیستم چاه‌های هوشمند ضرورت مداخله را کاهش می‌دهد.

■ تعداد/اندازه تفکیک‌گرها و سکوی نفتی (سیستم چاه‌های هوشمند، تولید آب و گاز را کاهش می‌دهد. بنابراین، تفکیک‌گرها و سکوی نفتی کمتری موردنیاز خواهد بود.)

در ادامه، به‌عنوان یک مثال کاربردی، به مخازن ماسه‌سنگی پرداخته می‌شود که طی آن، خصوصیات مخزنی و زمین‌شناسی و کاربرد مخزن هوشمند در هر کدام از فرصت‌ها بررسی می‌گردد.

از مهمترین موارد قابل بررسی در مخازن فوق‌الذکر می‌توان به این موارد اشاره کرد:

الف- تعداد لایه‌های زیرسطحی

■ طراحی با افزایش تعداد لایه‌ها پیچیده‌تر می‌شود

■ سیستم‌های چاه هوشمند می‌تواند تولید آب/گاز را در هر ناحیه به‌طور جداگانه مدیریت کند.

■ تعداد نواحی می‌تواند پیشنهاد اولیه برای تعداد شیرهای کنترلی درون چاهی باشد که متعاقباً

با ملاحظات عملیاتی و هزینه‌های تغییر می‌یابد.

ب- تفاوت فشار/ نوع سیال در لایه‌ها

■ تفاوت فشار در نواحی مختلف می‌تواند مشکلات حفاری ایجاد نماید.

■ ایجاد جریان عرضی (cross flow) و هرزروی گل حین عملیات حفاری، از پدیده‌های شایع در لایه‌های با فشار متفاوت است.

■ مشکلات تمیزسازی در لایه‌های فشار پایین سیستم چاه‌های هوشمند با به کار بردن شیرهای کنترلی می‌تواند جریان را از لایه‌های فشار بالا کنترل کند و تولید را در لایه‌های کم فشار بهبود بخشد.

■ امکان‌پذیری به کارگیری بالابری خودکار گاز در جایی که فشار بالایی ندارد.

ج- سازگاری سیال

■ تولید رسوب، واکنس و... در نتیجه‌ی اختلاط سیال‌های لایه‌های مختلف با توجه به عدم سازگاری سیالات لایه‌ها

■ ضرورت تولید مجزا باید مورد بررسی قرار گیرد، زیرا در صورت عدم سازگاری سیالات و تشکیل رسوب، سبب از کارافتادگی تجهیزات هوشمند می‌شود. به‌عنوان مثال، در بعضی از میداین دریای شمال، رسوب $BaSO_4$ گزارش شده است.

■ بررسی بازدهی مواد شیمیایی مانند ممانعت‌کننده‌ها

د- ضخامت لایه‌ها

■ در مخازن همگن، افزایش ضخامت لایه‌ها سودمندی به کارگیری چاه‌های هوشمند را کاهش می‌دهد.

■ تأثیر و میزان سودمندی‌های در مخازن کم‌ضخامت محسوس‌تر است.

■ در مخازن ضخیم، چاه‌های چندشاخه، گزینه‌ی بهتری هستند. می‌توان از شیرهای کنترلی برای مدیریت تولید گاز/آب ناخواسته از شاخه‌ها استفاده کرد.

■ مدیریت مخازن نفتی کم‌ضخامت توسط سیستم چاه‌های هوشمند می‌تواند مانع تولید گاز/آب شود.

ه- نفوذپذیری بسیار متغیر در فواصل تکمیل

■ تولید بهینه از لایه‌هایی با نفوذپذیری پایین با استفاده از چاه‌های معمولی دشوار است.

■ مغزه و نمودارهای حین حفاری اطلاعاتی درباره‌ی تغییرات نفوذپذیری محلی می‌دهند.

■ تولید از مناطق با نفوذپذیری بالا را می‌توان با استفاده از شیرهای کنترلی متعادل کرد.

و- فاصله‌ی بین لایه‌ها

■ می‌تواند بر نقطه انحراف چاه (KOP) موثر باشد.

■ فاصله‌ی بین لایه‌ها، یک فاکتور مهم در انتخاب نوع چاه (معمولی، افقی، چاه‌های چندشاخه و یا چاه هوشمند) محسوب می‌گردد.

■ در مخازنی با انباشت‌های مجزا، چاه‌های چندشاخه ترجیح داده می‌شوند. با شیرهای کنترلی می‌توان تولید گاز/آب را از هر شاخه و یا درون شاخه‌ها مدیریت کرد.

نتیجه‌گیری

به کارگیری توسعه تکنولوژی هوشمند نیازمند توجه سیستماتیک و درک بیشتر فازهای اصلی الگوی هوشمندسازی است. این الگو شامل فازهای شناسایی، ارزیابی و انتخاب بوده که انجام درست هر فاز با استفاده از روش‌های خاص هر فاز می‌تواند منجر به نتیجه کلی بهتر در فرایند انتخاب چاه / میدان مناسب برای هوشمندسازی گردد. هر کدام از فازها، عملاً می‌تواند به‌عنوان پیش‌نیاز فاز بعدی مورد بررسی قرار گیرد به طوری که اگر فاز شناسایی ما را به این نتیجه رساند که فرصت‌های کامل هوشمندسازی در یک میدان خاص وجود ندارد، طبیعتاً این میدان یا چاه وارد فازهای بعدی جهت ارزیابی و انتخاب قرار نخواهد گرفت. در این مطالعه، تلاش شد که با یک نگاه کلی، فرایند چگونگی به کارگیری تکنولوژی مخزن هوشمند بررسی شود و در این باره، پارامترهای فنی مرتبط با موضوع با تفصیل بیشتر آورده شد. همچنین، فلوچارت کلی توسعه سیستم چاه‌های هوشمند برای مخازن ماسه‌ای تشریح گردید. ■

پانویس‌ها

¹Case-sensitive

²sensor

³Interval Control Valve

⁴packer

⁵intervention

منابع

[1] Aitokhuehi, I. (2004). Real Time Optimization of Smart Wells. Master of Science dissertation, Stanford University.
 [2] Behrouz T., Intelligent Well Application Assessment on ICOFCs Fields. Technical Report, Research Institute of Petroleum Industry, 2007
 [3] Al-Ghareeb, M. (2009). Monitoring and Control of Smart Wells. Master of Science dissertation, Stanford University.
 [4] Alhuthali, A. H., Datta-Gupta, A., Bevan, Y., Fontanilla, J. P. (2009).

Field Applications of Waterflood Optimization via Optimal Rate Control with Smart Wells. Paper presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium in Woodland, Texas, U.S.A., 24- February 2009.
 [5] Bieker; H.P. Slupphaug, O. Johansen, T.A. (2006). Real Time Production Optimization of Offshore Oil and Gas Production Systems: A Technology Survey." Paper presented at the SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition held in Amsterdam, The Netherlands, 11-13 April 2006.