

مروری بر فناوری جداسازی آب از نفت در ته چاه

محمدحسین سریشانی^۱، فروغ عاملی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

پیام‌نگار: ameli@iust.ac.ir

چکیده

فناوری جداسازی ته چاهی در دهه ۱۹۹۰ ظهور کرد که به وسیله آن جریان غنی از گاز و نفت در سطح تولید می‌شود، در حالی که جریان غنی از آب به سازندهای زیرین تزریق شده، هرگز به سطح منتقل نمی‌شود و در صورتی که به تولید آن نیاز باشد، می‌توان آن را به صورت مجزا تولید کرد. در صنعت این ابزار با عنوان جداسازهای آب و نفت^۱ و آب و گاز^۲ شناخته می‌شود. چرخه‌های آبی مایع- مایع جزء اصلی سامانه جداسازی آب و نفت ته چاهی است. در این مطالعه، بررسی جامعی در ارتباط با فناوری جداسازی ته چاهی ارائه و برتری‌ها، پیش‌نیازها و کاستی‌های این فناوری معرفی شده‌اند. این مطالعه همچنین داده‌هایی مفید از مطالعات انجام شده بر روی تعدادی از میدان‌ها و مناطق عملیاتی و شرکت‌های دارای این فناوری در اختیار محققان قرار می‌دهد. طبق بررسی‌های انجام شده در این مطالعه، نصب موفقیت‌آمیز سامانه DOWS از نظر فنی و اقتصادی زمانی امکان‌پذیر است که همه مؤلفه‌های مورد نیاز به‌طور دقیق ارزیابی شوند؛ در این صورت از هزینه‌های کنترل آب، تولید و پالایش آن و از حجم تسهیلات سرچاهی کاسته می‌شود که برای مناطق دریایی و دور از دسترس بسیار مناسب است. افزون بر این، فن DOWS برای جداسازی نفت‌های سنگین بسیار دشوار است؛ چرا که اختلاف چگالی بالایی بین آب و نفت در این حالت وجود خواهد داشت. نسبت آب به نفت باید بالا باشد به طوری که فاز غالب آب باشد. سازندگان جداسازهای چرخه آبی پیشنهاد می‌کنند که کسر آب بیش از ۷۵٪ باشد.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۰۶

شماره صفحات: ۶ تا ۱۷

کلیدواژه‌ها: جداسازی ته چاهی،

جداسازهای آب و نفت، چرخه آبی

۱. مقدمه

نفت، در ابتدا و قبل از هجوم و به تله‌افتادن نفت، حاوی آب بوده‌اند. در حین مهاجرت و رسیدن مواد هیدروکربوری به تله‌های نفتی، این مواد هیدروکربوری آب ذاتی مخزن را نیز با خود حمل کرده‌اند؛ بدین ترتیب سنگ‌های مخزن حاوی مواد هیدروکربوری و آب هستند. این آب می‌تواند ناشی از جریان آب از نواحی بالا و پایین

در سازندهای زیرزمینی، سیالاتی چون آب و نفت و گاز به سنگ‌ها هجوم می‌برند. می‌دانیم که سنگ‌های موجود در سازندهای مملو از

* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

1. Downhole Oil Water Separation (DOWS)

2. Downhole Oil Gas Separation (DOGS)

جداسازهای ته چاهی براساس متد جداسازی و ملاحظات طراحی آورده شده است. از جمله فواید این فناوری عبارت است از [۵و۶]:

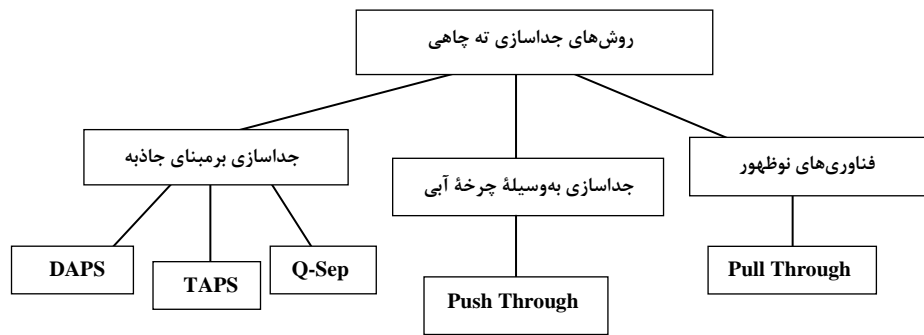
- کاهش خطرهای زیست محیطی نسبت به متدهای مرسوم، که از راه‌های زیر امکان پذیر است:
 - ❖ کاهش خطر آلودگی منابع آبی زیر زمینی در حین تولید (به واسطه نشستی آب از لوله جداری در حین تولید)
 - ❖ کاهش آلودگی‌های سطحی ناشی از نشستی آب آلوده به واسطه کاهش ۸۵ الی ۹۵ درصدی در حجم آب تولیدی
 - ❖ کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از نشستی از چاه‌های تزریقی آب شور
 - ❖ کاهش خطرات زیست محیطی مزمن به واسطه کاهش حجم آب تخلیه شده در دریا
 - ❖ کاهش انتشار CO_2
- بهبود اقتصاد میدان از طریق:
 - ❖ تسریع در تولید نفت (بهبود NPV)
 - ❖ تبدیل چاه تزریقی به چاه تولیدی
 - ❖ کاهش چاه‌های لازم برای توسعه میدان نفتی
 - ❖ تزریق آب برای ازدیاد برداشت با کمترین هزینه و کمتر شدن مشکلات تزریقی ناشی از ناسازگاری خواص آب تزریقی با آب سازندی
 - ❖ کاهش تقاضا برای جداسازی سطح الارضی (مخصوصاً در محیط‌هایی با کمبود فضا)
 - ❖ افزایش قابلیت در کنترل پدیده مخروطی شدن
 - ❖ کاهش در حجم و هزینه‌های مرتبط با استفاده از مواد شیمیایی (برای جلوگیری از هیدراته شدن، لخته شدن، خوردگی و ایجاد امولسیون)
 - ❖ کاهش هزینه‌های مرتبط با انرژی (برای پمپاژ و فراآوری آب مازاد همراه نفت و در نهایت تزریق مجدد آن)
 - ❖ کاهش هزینه‌های مرتبط با عملیات حفظ و نگهداری (تماس قطعات با آب کم‌شده، در نتیجه احتمال خوردگی کمتر می‌شود)
 - ❖ کاهش یا حذف تعمیر چاه‌های تزریقی
 - ❖ کاهش در هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به واسطه کاهش حفر چاه‌های تزریقی

سازند نفتی، داخل خود ناحیه نفتی یا ناشی از سیالات تزریقی یا سیالات افزودنی حاصل از عملیات تولیدی باشد. در عملیات بهره‌برداری از میدان‌های هیدروکربوری، آب مازاد به‌منظور حفظ فشار و رسیدن به سطوح بازیافتی بالاتر دوباره به مخزن تزریق می‌شود. هر دو آب سازندی و تزریقی به‌همراه مواد هیدروکربوری تولید و در سطح از فرآیندهایی برای جداسازی هیدروکربن‌ها از آب تولیدی استفاده می‌شود [۱و۲]. مشخصه‌های تأثیرگذار بر حجم آب تولیدی از چاه تأثیر عبارت است از:

- ۱) برای چاه حفر شده (۲) مکان چاه در مخزن (۳) نوع تکمیل چاه
- ۴) نوع و کیفیت تجهیزات مورد استفاده برای عملیات جداسازی و پالایش آب (۵) سیلاب‌زنی به‌منظور افزایش برداشت (۶) میزان آب در دسترس برای عملیات سیلاب‌زنی (۷) ارتباط بین لایه‌ها در سازند (۸) میزان استحکام مکانیکی [۳].

۲. جداسازی آب و نفت در ته چاه

فناوری جداسازی ته چاهی در طول دهه ۱۹۹۰ با هدف کاهش هزینه‌های فراآوری آب و تخلیه آن در سطح یا تزریق مجدد آن و افزایش ضریب بازیافت نفت از محبوبیت زیادی برخوردار شد. در این فناوری آب و نفت در چاه از هم جدا می‌شوند و کنترل حجم آب به‌وسیله جداسازی آن از نفت در ته چاه و تزریق همزمان آن به چاه انجام می‌شود. این سامانه قطعات مکانیکی زیادی دارد ولی اصلی‌ترین اجزاء آن یک سامانه جداسازی و حداقل یک پمپ برای فراآوری نفت به سطح و تزریق آب به ته سازند است. اخیراً دو نوع اساسی از سامانه جداسازی ته چاهی توسعه یافته است، در یک نوع از آن برای جداسازی مکانیکی از چرخه آبی استفاده می‌شود و در نوع دیگر از جداسازی بر مبنای گرانش که در چاه رخ می‌دهد، استفاده می‌شود. جداکننده‌های چرخه آبی در مقایسه با نوع ثقلی، ظرفیت حجمی بیشتری برای کنترل سیال دارند، در حالی که گران‌تر هستند. نوعی دیگر از سامانه جداسازی با عنوان جداسازی غشایی هم وجود دارد که البته به دلیل اینکه کارکرد دو سامانه قبلی از نظر فنی و اقتصادی اثبات شده، از این سامانه استقبال نشده است [۴]. رایج‌ترین کاربرد جداسازی ته چاهی آب و نفت، تزریق آب در مخزن به‌منظور بهبود برداشت (سیلاب‌زنی یا سیلاب‌زنی تناوبی آب و گاز (WAG)) در یک ناحیه تخلیه‌ای مشخص است که ممکن است در بالا یا پایین ناحیه تولیدی باشد. در شکل (۱) انواع مختلف



شکل ۱. انواع مختلف جداسازهای ته چاهی بر اساس سبک جداسازی و ملاحظات طراحی [۷].

۲-۱ کاستی‌های نصب سامانه DOWS

با وجود ویژگی‌های مثبت این فناوری، کاستی‌های این سامانه عبارت‌است از:

۱) فضای محدود چاه: چرخه‌های آبی که برای این منظور استفاده می‌شود، بسیار نازک و البته طویل‌اند. بنابراین کمترین قطر لوله جداری باید ۵/۵ اینچ باشد. این موجب می‌شود برخی از وسایل و تجهیزات در زیر زمین دچار لطمه و خوردگی شوند.

۲) موتور پمپ‌های ESP که در سامانه‌های جداسازی چرخه آبی قرار می‌گیرند، باید خنک شوند؛ در صورتی‌که سامانه پمپاژ و جداسازی، بالای ناحیه تولیدی باشد، به هدایت‌کننده جریان برای خنک‌سازی نیاز خواهد شد که به دلیل فضای محدود چاه ممکن نیست. بنابراین سامانه DOWS باید زیر ناحیه تولیدی و به منظور خنک‌سازی موتور نصب شود.

۳) بر اساس تجربه‌های گذشته، کارکرد این سامانه در مخازن کربناته نسبت به مخازن ماسه‌ای بیشتر است؛ بنابراین تأکید می‌شود که نصب در سازندهای ماسه‌ای صورت نگیرد، زیرا وجود شن و ماسه سبب خوردگی شدید پمپ‌ها و شیرها می‌شود.

۴) این سامانه فقط در چاه‌هایی که نسبت آب به نفت بالایی دارند، قابلیت نصب دارد.

۵) درجه API نفت باید بیش از ۱۲ باشد.

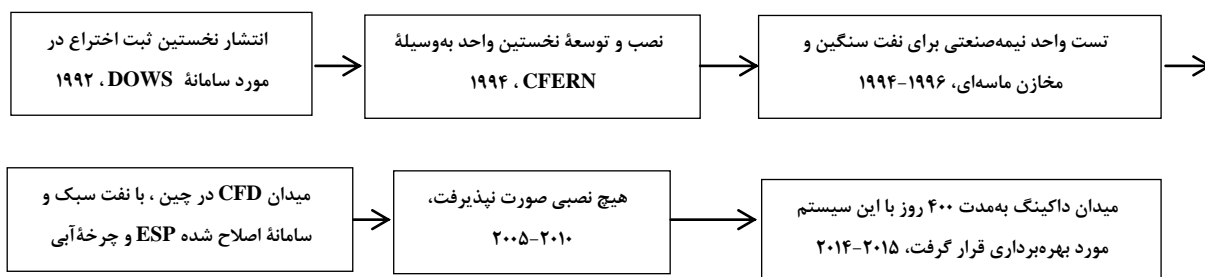
۶) کمترین اختلاف در گرانش مخصوص میان آب و نفت باید ۰/۰۵ باشد.

۷) محتوای نفت در آب تزریقی نباید از ۲۰۰-۱۰ ppm فراتر رود، زیرا باعث آسیب‌رساندن به ناحیه تزریقی خواهد شد.

۸) برای عملیات تحریک چاه نیاز است که پمپ‌ها از چاه خارج شود.

۹) ترجیحاً نباید این سامانه را در چاه‌های انحرافی به‌ویژه اشباع نفت پایین نصب کرد. محققان فناوری DOWS را بر اساس نوع سامانه جداساز و موقعیت نسبی سامانه جداساز و پمپ در چاه دسته‌بندی می‌کنند. شکل (۲) توسعه تدریجی این فناوری را نشان می‌دهد. همان‌سان که در این شکل روشن است، نخستین ثبت اختراع در مورد این فناوری در سال ۱۹۹۲ انجام شد و در سال ۱۹۹۴ نخستین نصب انجام گرفت. طی سال‌های ۱۹۹۴ تا ۱۹۹۶ واحد نیمه صنعتی برای تولید نفت سنگین و شن مورد استفاده قرار گرفت. سپس به دلیل ملاحظات اقتصادی تا سال ۲۰۱۰ هیچ نصبی انجام نشد. در همان سال در میدانی در چین فناوری ESP و چرخه آبی بر روی نفت سبک پیاده سازی شد. در سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۵ این فناوری در میدان داکینگ چین به مدت ۴۰۰ روز بهره‌برداری شد.

در شکل (۳) تعداد اختراعات ثبت شده در هر شرکت، دانشگاه و مؤسسه تحقیقاتی، با تمرکز بر کارهای تحقیقاتی و توسعه یافته در آمریکا آورده شده است. داده‌ها در بازه سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ جمع‌آوری شده‌اند [۴]. با توجه به شکل (۳) در زمینه جداسازی ته چاهی، فناوری‌هایی که بیشتر مورد استقبال قرار گرفته‌اند، عبارتند از جداکننده‌های چرخه آبی، ثقلی و گریزانه‌ای. ولی در بیشتر اوقات آنها را با فناوری‌هایی همچون مسدودکننده‌های مکانیکی (پکرها و پلاگ‌ها) و مواد شیمیایی ویژه انسداد (ژل‌های بسپاری) ترکیب می‌کنند تا تولید آب را کمینه کنند.

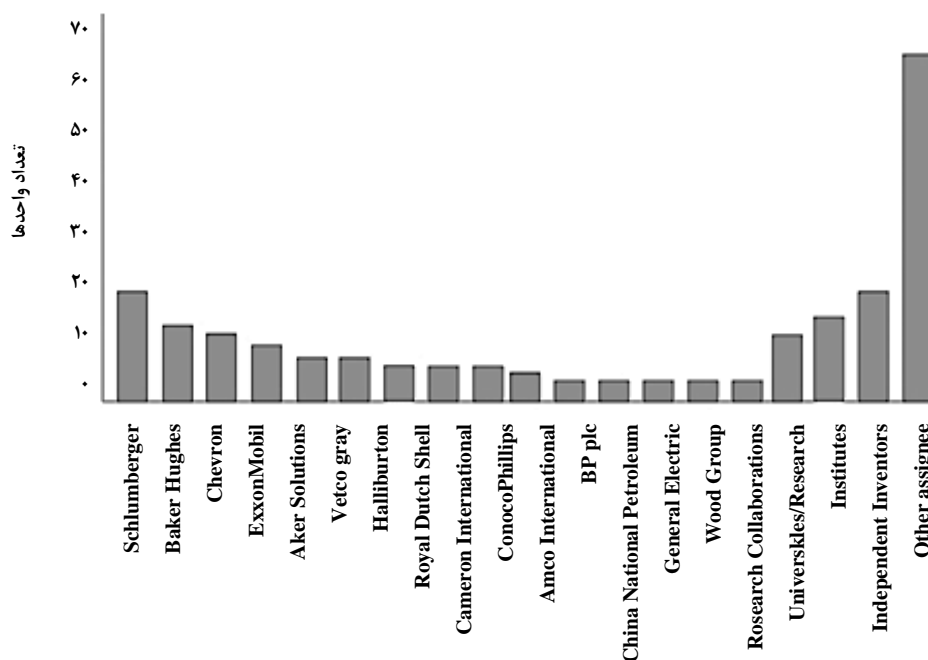


شکل ۲. توسعه تدریجی فناوری DOWS در طول زمان [۷].

الگوهای آزمایشی سامانه‌های جداسازی را با استفاده از انواع پمپ‌های ESP، PCP و RP سازماندهی کرد [۸]. حق بهره‌برداری از سامانه‌های جداسازی چرخه آبی پمپ ESP شرکت C-FER Technology آلبرتا بود؛ مطالعات اولیه این شرکت در اوایل دهه ۱۹۹۰ نشان داد که جداسازی ته چاهی آب و نفت به وسیله ترکیب پمپ‌های قدیمی چاه‌های نفتی با چرخه آبی میسر می‌شود. این شرکت با کمک گرفتن از شرکت‌های فعال دیگر در این عرصه، در قالب یک پروژه صنعتی مشترک، توسعه و آزمایش میدانی مجوزهایی برای بهره‌برداری داده بود.

۳. نگاهی به آمار شرکت‌های اصلی مخترع فناوری DOWS

نخستین توسعه‌دهنده جداسازهای چرخه آبی ته چاهی شرکت C-FER Technology آلبرتا بود؛ مطالعات اولیه این شرکت در اوایل دهه ۱۹۹۰ نشان داد که جداسازی ته چاهی آب و نفت به وسیله ترکیب پمپ‌های قدیمی چاه‌های نفتی با چرخه آبی میسر می‌شود. این شرکت با کمک گرفتن از شرکت‌های فعال دیگر در این عرصه، در قالب یک پروژه صنعتی مشترک، توسعه و آزمایش میدانی



شکل ۳. تعداد اختراعات ثبت‌شده از شرکت‌های نفتی در زمینه فناوری جداسازهای ته چاهی [۴].

صنعتی مشترک که متشکل از ۳۹ شرکت عملیاتی و تأمین‌کننده بود، توسعه داد. نتیجه این پروژه تشخیص اقتصادی بودن ترکیب پمپ ESP با چرخه آبی است. مجوز استفاده از آن به شرکت‌های Baker Hughes Inc. / Centrilift و Schlumberger / REDA داده شده است [۴].

۳-۲ شرکت Baker Hughes

جداکننده‌های ته‌چاهی چرخه آبی و ثقلی جزء محصولات ارائه شده به وسیله این شرکت است. از این فناوری در منطقه Bohai Bay کشور چین استفاده شده است. جزئیات این پروژه در مرجع [۱۱] موجود است. در این پروژه به منظور ارتقا عملکرد سامانه برای کمک به بازدهی جداسازی مواد شیمیایی تزریق شد [۱۱].

۳-۳ شرکت Halliburton

سامانه جدید کنترل آب این شرکت از نوعی بسیار برای جداسازی آب و نفت در مخزن و جلوگیری از جریان آب و افزایش جریان نفت به چاه استفاده می‌کند؛ بازیافت نفت و گاز بهبود یافته ناشی از کاهش آب، منجر به بهبود فراآوری طبیعی نفت و گاز می‌شود.

۳-۴ شرکت Chevron

در همکاری با شرکت Eriez Flotation، شرکت Chevron دستگاهی به اسم VOSCELL flotation column را ساخت. این سامانه بازدهی بالایی در جداسازی آب و نفت و در حجم کم در سکوها دریایی کاربرد دارد.

۳-۵ شرکت نفت ملی چین

کشور چین در سال ۲۰۱۰ یک عملیات جداسازی ته‌چاهی را در میدان دریایی Bohai Bay چین انجام داد. در این پروژه چاهی با ۹۷٪ درصد آب انتخاب و برای آن یک تکمیل ته‌چاهی جدید طراحی شد [۴]. خلاصه نتایج استفاده از این فناوری در هریک از شرکت‌های مذکور در جدول (۱) آورده شده است.

شرکت REDA سامانه جداسازی را با اسم AQWANOT روانه بازار کرد و شرکت Centrilift نام تجاری سامانه را Hydrosep گذاشت. سامانه Hedro Sep در سال ۱۹۹۸ حداقل در چهار چاه نصب شده بود، ولی شوربختانه آماری از نصب‌های آن‌ها در دست نیست. شرکت BMW Pump که در حال حاضر زیرمجموعه Weatherford است، با شرکت C-FER به منظور توسعه یک سامانه جداسازی چرخه آبی که از پمپ PCP بهره می‌برد، همکاری کرد. داده‌های طراحی مربوط به این سامانه در دسترس نیست، ولی پچی و همکاری‌اش در سال ۱۹۹۷ نشان دادند که از میانه سال ۱۹۹۷، ۴ مورد آزمایشی سامانه DOWS با PCP انجام شده بود. اطلاعاتی در ارتباط با یکی از نصب‌های انجام شده از این سامانه که از اکتبر ۹۷ تا مارس ۹۸ در حال کار بوده، در دسترس است، که در آن سامانه به دلیل بروز مشکل در لوله انتقال از چاه خارج شد. این سامانه تولید آب را ۷۵٪ کاهش داد، ولی بر تولید نفت تأثیری نداشت. متصدی خاطرنشان کرد که پروژه موفقیت‌آمیز بوده است، ولی اطلاعاتی در ارتباط با سود اقتصادی حاصل از آن منتشر نکرد [۹]. سوبی و متیوس [۱۰] در سال ۱۹۹۷ گزارشی در ارتباط با سامانه DOWS با پمپ PCP ارائه کردند؛ چاه به مدت سه سال به دلیل نبود ظرفیت برای کنترل آب در سطح بسته شده بود. هر دو سامانه پمپ یگانه و دوگانه در این چاه امتحان شد. پس از ۱۸ ماه میزان آب تولیدی به شدت کاهش یافت [۲].

۳-۱ شرکت C-FER Technologies

فناوری جداسازی ته‌چاهی ثبت شده به نام این شرکت ابزاری است که از چرخه آبی‌های مایع-مایع و نوعی از فراآوری مصنوعی به منظور جداسازی آب و نفت در ته چاه و تولید نفت (با کسر کمی از آب) و تزریق ۹۰٪ از آب تولیدی از راه همان چاه، استفاده می‌کند. این شرکت در سال ۱۹۹۴، ۱۸ مورد نصب از این فناوری را در غرب کانادا انجام داد. ۳ مورد آزمایشی و ۱۵ مورد دیگر با هدف ایجاد صرفه اقتصادی بود. در این نصب‌ها برای فراآوری از پمپ‌های PCP^۱، ESP^۲، RP^۳ و GLP^۴ استفاده شد. این شرکت در سال ۱۹۹۰ فناوری DOWS را توسط یک پروژه

1. Progressive Cavity Pump
2. Electric Submergible Pump
3. Rod Pump
4. Gas Lift Pump

جدول ۱. خلاصه نتایج استفاده از فناوری DOWS در شرکت‌های مطرح دنیا.

نتایج استفاده از فناوری DOWS	نام شرکت
<ul style="list-style-type: none"> افزایش ۱۰ الی ۲۰ درصدی در تولید نفت کاهش ۸۵ الی ۹۷ درصدی در تولید آب کاهش ۱۰ الی ۲۵ درصدی در هزینه‌های مربوطه کنترل آب میانگین طول عمر اجرایی در حدود ۸ ماه کاهش ۳۰٪ در انرژی لازم برای پمپاژ حجم مشابهی از سیال تولیدی در قیاس با سامانه‌های مرسوم اختلاف پایدار بین فشار تزریقی و تولیدی 	C-FER Technologies
<ul style="list-style-type: none"> بازدهی جداسازی زیر ۵۰۰ppm پایداری سامانه انعطاف عملیاتی 	Baker Hughes
<ul style="list-style-type: none"> جذب سطحی بر روی سطح سنگ انجام می‌گیرد. تراوایی نسبی آب حدود ۹۰ درصد کاهش یافته موجب کاهش خطر برای تراوایی نسبت به نفت می‌شود. 	Halliburton
<ul style="list-style-type: none"> با یک‌بار عبور سیال از این دستگاه، غلظت نفت در آب تولیدی به کمتر از ۲۰ppm می‌رسد. این دستگاه قادر به پالایش مجدد جریان‌های خروجی از دیگر جداکننده‌های نفت و آب به‌منظور رساندن محتوی آب به کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. 	Chevron
<ul style="list-style-type: none"> پمپ ESP بالایی بعد از ۴۹۱ روز به‌دلیل نفوذ ذرات خراب شد. پمپ ESP پایینی فشار مناسبی برای رساندن نفت به سطح داشت، ولی به‌دلیل کاستی در توزیع انرژی ناچار به خاموش کردن آن شدند. کاهش آب ۸۰۰۰ الی ۹۰۰۰ بشکه در روز رخ داد. تولید نفت ۵۰۰ بشکه در روز افزایش یافت. به‌منظور برنامه‌ریزی برای نصب‌های آتی مشخص گردید، چاهی مناسب برای نصب انتخاب شود، چرا که این سامانه در هر چاهی قابل استفاده نیست. شناخت از ناحیه تزریقی یا تخلیه‌ای و بررسی نحوه تغییر خصوصیات آن با زمان ضروری است. نصب صحیح سامانه جداسازی باید مدنظر قرار گیرد. طراحی صحیح سامانه تکمیل چاه بسیار حائز اهمیت است. 	شرکت نفت ملی چین

۴. بررسی اجزای سامانه DOWS (Push-Through)

براساس کاستی‌هایی که سامانه DOWS داشت، این سامانه با ساختاری متفاوت عرضه شد؛ هدف طراحی این سامانه کاستن پیچیدگی‌های مربوط به طراحی بود. به‌طور کلی یک سامانه DOWS دارای مؤلفه‌های زیر است که می‌توان به‌طور مجزا آن‌ها را مورد بررسی قرار داد [۱۲]:

(۱) نواحی تزریقی و تولیدی: هر چند برای این بخش از طراحی

کار خاصی نمی‌توان انجام داد، ولی ویژگی‌های این نواحی تأثیر بسیاری بر طراحی خواهند داشت. موقعیت نسبی این نواحی نوع سامانه انتخابی DOWS را برای نصب تعیین می‌کند. خواص ناحیه تولیدی تعیین می‌کند. خواص سیال، تعیین‌کننده بازده جداسازی است. دمای ته‌چاهی نوع سامانه ESP را تعیین می‌نماید. نواحی تزریقی نیز نقشی مهم در بخش تزریقی طراحی DOWS برعهده دارند. تزریق، در

سامانه DOWS، یگانه هدف از طراحی آن است. بنابراین بسیار مهم است که ناحیه تزریقی دارای تزریق پذیری مناسبی باشد و سیال دو ناحیه تولیدی و تزریقی با هم سازگار باشند. سایز پمپ ESP بسیار وابسته به تزریق پذیری سازند تزریقی است؛ هرچه شاخص تزریق پذیری کمتر باشد، مصرف انرژی پمپ ESP بیشتر خواهد شد. با افزایش مصرف انرژی پمپ ESP دوام آن کمتر می شود. همچنین فاصله بین این دو ناحیه و مجزاسازی مناسب این نواحی بر روی نوع پکر انتخابی تأثیرگذار خواهد بود.

۲) سامانه پمپ ESP : یکی دیگر از ارکان اصلی سامانه DOWS است؛ بسته به نوع کاربری، سامانه ESP درجه های پیچیدگی طراحی مختلفی خواهد داشت. سامانه DOWS را می توان با یک جداساز و یک پمپ طراحی و یا با دو پمپ مجزا که در دو طرف جداساز قرار دارند، طراحی نمود. طراحی دو سامانه مجزا برای تزریق و تولید برتری بیشتری دارد. کاستی این کار نیز این است که احتمال خرابی پمپ ESP دو برابر خواهد شد. بنابراین به کاربردن آن در چاه کمی پیچیده است. پکرها برای جداسازی نواحی مختلف از یکدیگر

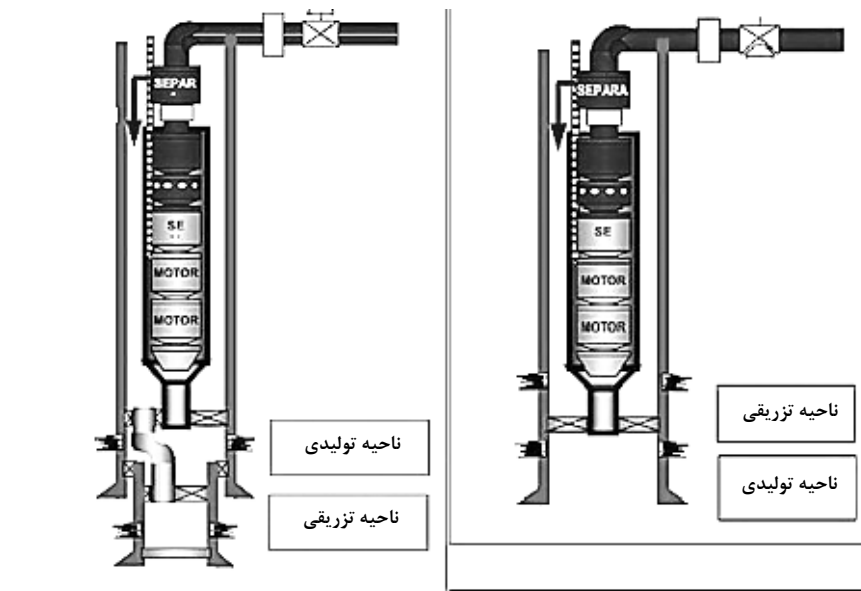
استفاده شده اند. در انتهای پمپ ESP، از استیونگر^۱ (نوعی لوله هدایت کننده) استفاده می شود تا رابطه میان ناحیه تولیدی از میان پکر (در حالتی که پمپ در بالای ناحیه تولیدی قرار گرفته باشد)، برقرار شود (شکل (۴)). در طراحی این سامانه، سیال باید به نحوی هدایت شود که موتور پمپ را خنک سازد و در صورتی که ناحیه تولیدی در زیر تشکیلات سامانه قرار داشت، به استفاده از نوعی پوشش نیاز است. سیال عبوری از پمپ با فشار وارد جداساز می شود. به وسیله احاطه کردن استیونگر^۲، پمپ ESP درون پوشش و با قراردادن پکرها در جایی مناسب، جریان های تولیدی و تزریقی از هم جدا خواهند شد [۱۳].

لوله خاصی برای انتقال جریان استفاده نشده است. استفاده از لوله های هدایت کننده، طراحی را به طرق زیر محدود می کند:

(۱) افت فشاری که لوله های نازک ایجاد می کنند، باعث افزایش انرژی مصرفی در سامانه خواهد شد.

(۲) نصب سامانه به طور خاص در چاه های انحرافی مشکل است.

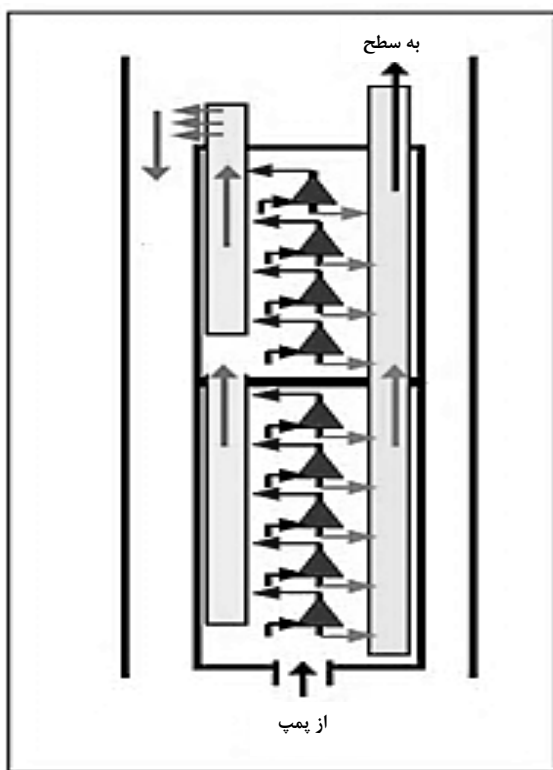
(۳) لوله هایی که برای تزریق استفاده می شوند، بیشتر اوقات به وسیله جامدات مسدود می شوند.



شکل ۴. سامانه push-through در حالتی که جداساز در بالای پمپ قرار دارد [۱۴].

جداساز و پمپاژ (ESP) متصل کرد. این سامانه قطعاً دوار ندارد و از این رو بسیار با دوام است. این سامانه کنترل پیشرفته قابلیت کنترل ۵ فشار، یک بده و یک دما را دارد.

(۵) پکرها: سامانه DOWS از مجموعه محافظ و پکر برای ایزوله کردن نواحی تولیدی و تزریقی استفاده می‌کند. انواع مختلفی از پکرها در صنعت وجود دارد که می‌توان از آن‌ها بدین منظور استفاده کرد. پکرها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که به راحتی به هدف اصلی که ایزوله‌سازی است، برسند. هرگونه نشتی در پکرها منجر به جریان چرخه‌ای بین نواحی تولیدی و تزریقی می‌شود، که این پدیده کارایی سامانه را ضعیف می‌کند.



شکل ۵. جداکننده چرخه آبی دو مرحله‌ای - سری [۱۲].

۵. داده‌های DOWS

اغلب سامانه‌های DOWS در آمریکای شمالی اجرا شده‌اند که اطلاعات آن به طور خلاصه در جدول (۲) آورده شده است.

نکته دیگر حائز در این سامانه این است که حتی در صورتی که موقعیت نسبی نواحی تولیدی و تزریقی جابه‌جا شود، از همان ساختار Push-Through می‌توان استفاده کرد؛ تنها با تغییر موقعیت پکرها می‌توان هر دو حالت را با یک ساختار مدیریت کرد.

(۳) جداکننده‌های چرخه آبی: چرخه آبی‌ها یکی دیگر از ارکان مهم در سامانه جداسازی ته چاهی به‌شمار می‌روند. برای افزایش نرخ بده تولیدی می‌توان آن‌ها را به‌طور موازی و یا به‌منظور افزایش بازدهی می‌توان آن‌ها را به‌صورت سری پشت‌سرهم قرارداد. چرخه آبی‌های تک‌لوله ظرفیتی در محدوده 2000-500 BFPD دارند. برای چاه‌هایی که بده بالایی دارند، چندین چرخه آبی را می‌توان با هم ترکیب نمود، به‌طوری که خروجی هر کدام وارد لوله^۱ شود (شکل (۵)). در حالت سری عمده عملیات جداسازی در مرحله اول رخ خواهد داد و در این مرحله به‌طور خاص از یک هسته‌یاب یا گرداب‌یاب استفاده می‌شود. کنترل فشارهای ورودی و خروجی از چرخه آبی، جدایش بین آب و نفت را کنترل می‌کند. به مرحله دوم، نفت‌زدایی گفته می‌شود. این مرحله به‌منظور پالایش بهتر آب خروجی از مرحله اول است. به‌طور کلی ۲٪ از جریان ورودی از خروجی نفت خارج می‌شود و ۹۸٪ مابقی از خروجی آب خارج می‌شود. جریان‌های جدا شده آب و نفت هریک از راه لوله‌ای مجزا به سمت لوله‌های تولیدی و تزریقی هدایت می‌شوند. در چرخه آبی افت فشار ایجاد خواهد شد که باید به نحوی جبران شود.

(۴) کنترل‌ها: تزریق ته چاهی یک موقعیت حساس و پویایی‌شناختی است. برای عملکرد مناسب سامانه، بازخورد قابل اتکایی بر روی مؤلفه‌های سامانه نیاز است. از این بازخورد برای کنترل سامانه استفاده می‌شود. سامانه باید به گونه ای طراحی شود که هرگونه تغییر در مؤلفه‌های مربوط به چاه (مثل تزریق‌پذیری) بدون نیاز به تغییر در سامانه قابل کنترل باشد. سامانه جداسازی چرخه آبی pull-through یا push-through از یک سامانه کنترل پیشرفته بهره می‌برد. این سامانه را می‌توان با اتصالات لوله‌ای استاندارد به مجموعه

1. Manifold

جدول ۲. اطلاعات مربوط به سامانه‌های

پایاده‌سازی شده DOWS.

کشورهای استفاده‌کننده از فناوری	کانادا (۳۴ مورد)، آمریکا (۱۴ مورد)، آمریکای لاتین (۶ مورد)، اروپا (۲ مورد) آسیا (۲ مورد)، خاورمیانه (۱ مورد)
نوع سازند مورد استفاده در فناوری DOWS	۲۴ مورد کربناته، ۳۰ مورد ماسه‌ای
نوع سازند تزریقی	سازند کربناته (۱۹ مورد)، سازندهای ماسه‌ای (۳۲ مورد)

۵-۱ آنالیز داده‌های DOWS

در جدول (۳) به عملکرد کیفی سامانه‌های نصب‌شده نمره‌دهی شده‌است. این نمره‌دهی براساس کیفیت عملکرد هر سامانه در زمینه افزایش تولید نفت، کاهش تولید آب و میزان طول عمر آن است. براساس معیارهای مشخص‌شده در هریک از زمینه‌ها یک نمره کیفی در نظر گرفته می‌شود.

نمره کیفی کل براساس ارزیابی هریک از نمره‌های معیارهای در نظر گرفته شده‌است. از آنجایی که برخی از داده‌های در دسترس تاریخ آغاز به کار یا پایان کارشان مشخص نیست، تعیین میزان طول عمرشان امکان پذیر نمی‌باشد. مشکل دیگر این‌است که داده‌ها عملکرد سامانه را قبل از نصب و بعد از آن نشان می‌دهند، درحالی که باید در طول زمان کارکرد سامانه نیز داده‌ها در دسترس باشد، چراکه در حین کارکرد سامانه، تولید آب و نفت با توجه به تغییر در مشخصه‌های مکانیکی سامانه پمپ، مثل نرخ پمپ و فشار آن تغییر می‌کند. بنابراین، این اعداد عملکردی نشان‌دهنده کارکرد طولانی‌مدت سامانه نخواهند بود.

جدول ۳. عملکرد کیفی سامانه‌های DOWS.

معیار / نمره کیفی	خوب	خنثی	ضعیف
افزایش در تولید نفت	> ۲۰٪	۰٪ - ۲۰٪	۰٪
کاهش در تولید آب	> ۳۰٪	۰٪ - ۳۰٪	-
طول عمر (ماه)	> ۳	۰ - ۳	-

گذارد [۱۵]. مطابق جدول (۴) مشخصه‌های دیگری نیز وجود دارند که بر موفقیت نصب این سامانه‌ها تأثیر می‌گذارند [۱۶]. مهمترین مشخصه این است که سازند تزریقی، تزریق پذیری بالایی داشته‌باشد. یک آزمایش مهم تزریق گام به گام به منظور تعیین بده و فشار تزریقی است که باعث انسداد یا شکاف خوردگی می‌شود. مقدار کمی نفت در آب تولیدی جدا شده ممکن است به دلیل نیروهای موینگی، منجر به انسداد حفره‌ها شود. بنابراین بازدهی جداسازی باید به حدی باشد که ذرات کلوییدی ۵ تا ۵۰ میکرومتری موجود در آب تزریقی کمینه شوند. مؤلفه مهم دیگر فاصله عمودی و مکانیکی مناسب بین نواحی تولیدی و تزریقی است. نصب DOWS باید در مخازنی انجام‌شود که حاوی مقادیر قابل قبولی از ذخیره نفتی باشد، به طوری که بتوان به سرعت هزینه‌های انجام‌شده را برگرداند و به سوددهی رسید.

۶. مطالعاتی میدانی [۱۸]

به‌عنوان یک مطالعه موردی، فناوری جداسازی آب از نفت در میدان‌های داکینگ و جیدانگ^۱ شرکت نفت چین (پترو چین) را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در میدان داکینگ، سه‌چاه از پمپ‌های اسکرو^۲ برای تزریق و سه‌چاه دیگر از پمپ گریزان^۳ غوطه‌ور^۳ به‌این منظور استفاده می‌شود. به‌وسیله این فناوری، تولید آب به‌طور میانگین ۷۰٪ کاهش یافت، در حالی که تولید نفت بدون تغییر ماند. تا ژوئن ۲۰۱۵ دوام این فناوری بیش از ۵۰۰ روز بود. چاه B2-D4-53 میدان داکینگ^۴ چاهی عمودی با لوله جداري به قطر ۵^{۱/۲} اینچ است؛ عمق حقیقی این چاه ۱۲۲۰ m و کسر آب آن ۹۷/۲٪ و تولید روزانه آن ۹۸/۶ m^۳/d بود که ۹۵/۸۴٪ آن مربوط به تولید آب و ۲/۷۶٪ آن مربوط به تولید نفت بود.

در ماه می سال ۲۰۱۳، تجهیزات جداسازی ته چاهی نصب شدند. بر این اساس، کسر آب تولیدی به ۸۹/۶٪ کاهش یافت و میزان تولید سیال به ۲۶/۵ m^۳/d رسید و همچنین تولید روزانه آب به میزان ۷۵٪ کاهش یافت. تولید نفت به ۲/۷۵ m^۳/d رسیده‌بود که کاهش ۰/۳۶ درصدی را نشان می‌دهد. از آنجایی که مصرف انرژی مسأله‌ای مهم است، با فرض اینکه تولیدپذیری مخزن ثابت بماند، مصرف کل

براساس نتایج داده‌های به‌دست‌آمده تنها با شناخت جنس سازندهای تولیدی/تزریقی نمی‌توان بر نرخ موفقیت یا عدم آن صحه

1. Daqing and Jidong
2. Screw Pump
3. Submergible Centrifugal Pump
4. Daqing

جدول ۴. داده‌های عملکردی DOWS و نمره‌دهی کیفی به آن [۱۷].

Lithology	Pre-DOWS Oil (bpd)	Post-DOWS Oil (bpd)	% Increase in Oil	Oil Rating*	Pre-DOWS Water (bpd)	Post-DOWS Water (bpd)	% Decrease in Water	Water Rating*	Trial Starting Date	Trial Ending Date	Longevity Rating*	Overall Performance Rating
Carbonate/ carbonate	19	24	26	Good	1,780	59	97	Good	Jul-94	Jan-95	Good	Good
Sandstone/ sandstone	44	100	127	Good	380	95	75	Good	Jul-95			Good
Sandstone/ sandstone	25	100	300	Good	820	160	80	Good	Aug-95			Good
Sandstone/ sandstone	38	37	-3	Poor	1,200	220	82	Good	Sep-95			Neutral
Sandstone/ sandstone	3	10	233	Good	184	126	32	Good	Oct-95			Good
Sandstone/ sandstone	21	17	-19	Poor	690				Dec-95			Poor
Sandstone/ sandstone	34	14	-59	Poor	979				Dec-95			Poor
Sandstone/ sandstone	9.4	16	70	Good	546				Jan-96			Neutral
Sandstone									Feb-96			Poor
Carbonate/ carbonate	13	164	1162	Good	428	239	44	Good	May-96			Good
Carbonate/ carbonate	6	39	550	Good	629	21	97	Good	May-96			Good
Carbonate/ carbonate	16	33	106	Good	252	139	45	Good	Jul-96	May-97	Good	Good
Carbonate/ carbonate	176	264	50	Good	3,648	264	93	Good	Jul-96			Good
Carbonate/ carbonate	113	277	145	Good	2,516	126	95	Good	Aug-96			Good
Carbonate/ unknown	6	6	0	Neutral	655	150	77	Good	Aug-96	Apr-97	Good	Good
Sandstone/ sandstone	45	32	-29	Poor	1,400	500	64	Good	Aug-96			Poor
Sandstone/ sandstone	7	16.5	136	Good	269	127	53	Good	Sep-96			Good
Carbonate/ carbonate	20	15	-25	Poor	220	190	14	Neutral	Jan-97			Poor
Sandstone	25	32	28	Good	250	25	90	Good	Feb-97			Good
Sandstone/ sandstone	5	10	100	Good	190	38	80	Good	Feb-97	Mar-97	Neutral	Good
Carbonate/ sandstone	88	50	-43	Poor	1,700	189	89	Good	Apr-97			Poor
Carbonate/ carbonate	75	84	12	Neutral	517	14	97	Good	May-97	Aug-97	Neutral	Good
Carbonate/ carbonate	27	26	-4	Poor	932	179	81	Good	May-97			Neutral
Sandstone/ sandstone	30	38	27	Good	470	61	87	Good	May-97	Nov-97	Good	Good
Sandstone/ sandstone	631	14	-98	Poor	7,060	1,153	84	Good	May-97	Jun-97	Neutral	Poor
Sandstone/ sandstone	76	0	-100	Poor	2,450	380	84	Good	May-97	Nov-97	Good	Poor
Carbonate/ carbonate	70	78	11	Neutral	4,000	320	92	Good	Jun-97			Good
Sandstone/ sandstone	8	10	25	Good	451	63	86	Good	Jun-97	Oct-97	Good	Good

به‌طور دقیق ارزیابی شوند.

(۲) جداسازی ته چاهی نسبت به جداسازی سطحی مرسوم بسیار اقتصادی‌تر است؛ زیرا از هزینه‌های کنترل آب، تولید و پالایش آن می‌کاهد. تجهیزات ته چاهی از حجم تسهیلات سر چاهی کم می‌کند که برای مناطق دریایی و دور از دسترس بسیار مناسب است.

(۳) بیشتر نصب‌های انجام‌شده موفق نبوده‌اند، به‌این‌دلیل که چاه مناسبی برای نصب انتخاب نشده بود. شرکت‌ها به‌جای آنکه چاه‌هایی را که احتمال موفقیتشان بالاتر باشد انتخاب کنند، بیشتر چاه‌هایی را که در اواخر عمر تولیدی خود بودند، به‌عنوان کاندید انتخاب کرده‌بودند.

(۴) جداسازی برای نفت‌های سنگین بسیار دشوار است؛ زیرا اختلاف چگالی بالایی میان آب و نفت در این حالت وجود دارد. کمترین اختلاف در چگالی باید API2 باشد. اگر قطره‌های نفت بسیار ریز باشند، قطره‌های کوچک بیشتر تحت تأثیر نیروهای گرانشی قرار خواهند گرفت که بدین شکل جدایش به تأخیر خواهد افتاد.

(۵) نسبت آب به نفت باید بالا باشد؛ به‌طوری‌که فاز غالب آب باشد. اصولاً نسبت آب به نفت باید بیشتر از ۵۰٪ باشد. سازندگان جداسازهای چرخه‌آبی پیشنهاد می‌کنند که کسر آب بیش از ۷۵٪ باشد.

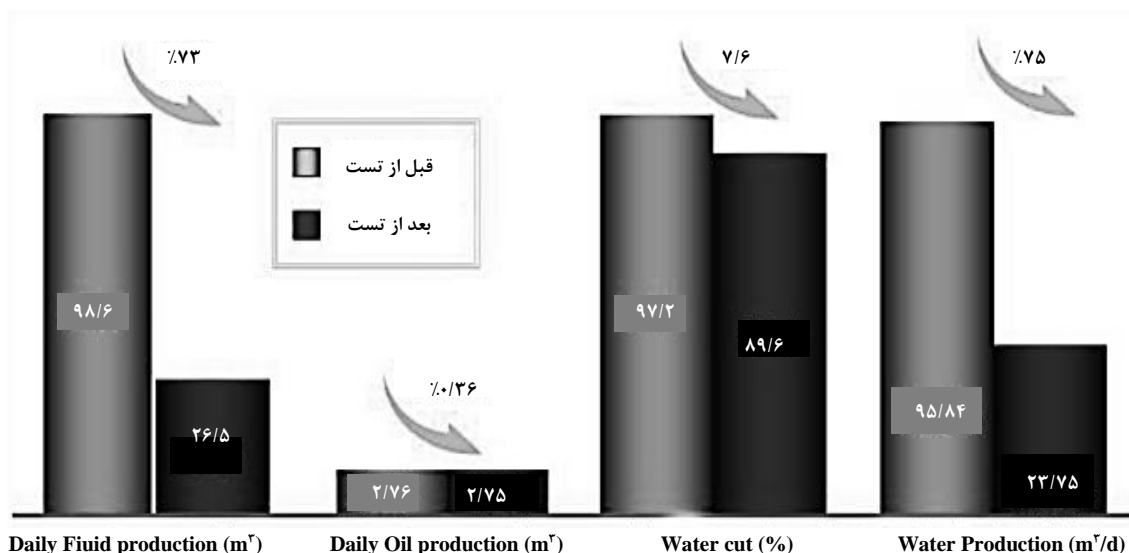
انرژی برای تولید مرسوم $22/42 \text{ kWh/m}^3$ بود، در حالی‌که بعد از نصب سامانه داوز این مقدار به $4/68 \text{ kWh/m}^3$ کاهش یافت. همان‌گونه که مشخص است، مصرف انرژی سامانه داوز ۲۱/۸٪ حالت مرسوم است. به‌علاوه با استفاده از این فن، فضای مورد نیاز برای پالایش و گندزدایی آب تولیدی کمتر می‌شود (شکل (۶)).

چاه L102X3 میدان جیدانگ چاهی شیب‌دار است که قطر لوله جداری آن ۷ اینچ است. عمق حقیقی این چاه $2/480 \text{ m}$ است و چاه در عمق $1/877 \text{ m}$ بیشترین شیب را به اندازه $47/2$ درجه دارد. تجهیزات جداسازی آب از نفت ته چاهی در عمق 950 m در بازه‌ای عمودی نصب شد. با کسر آبی در حدود $99/5$ ٪، چاه بسته‌شده بود. طبق نتایج، قبل از نصب، تولید روزانه چاه در حدود $253 \text{ m}^3/\text{d}$ و تولید نفت آن $1/26 \text{ m}^3/\text{d}$ بود. به‌محض نصب سامانه DOWS در اکتبر ۲۰۱۳ تولید سیال در سطح $79/4$ ٪ کاهش یافت و به $52 \text{ m}^3/\text{d}$ رسید و تولید روزانه نفت با $6/9$ ٪ افزایش به $1/35 \text{ m}^3/\text{d}$ رسید. در کل با توجه به این نتایج، تولید به‌طور چشمگیری بهبودیافت.

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه‌شده در این مقاله می‌توان چنین نتیجه‌گرفت که:

(۱) نصب موفقیت‌آمیز سامانه DOWS از نظر فنی و اقتصادی زمانی امکان‌پذیر است که همه مؤلفه‌های مورد نیاز



شکل ۶. عملکرد چاه B2-D4-53 میدان داکینگ چین [۱۹].

- [1] Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., Abidin, Z. Z. "Review of technologies for oil and gas produced water treatment", *J. Hazard. Mater.* 170, pp. 551-530, (2009).
- [2] De, A. K., Pal, S., Sivaramakrishnan, S., "System and method for a centrifugal downhole oil-water separator", U.S. Patent Application 15/476,406, (2018).
- [3] Reynolds, R. R. and Kiker, R. D. "Produced water and associated issues." Oklahoma Geological Survey, (2003).
- [4] Chachula, R. C., Solanki, S. C., U.S. Patent No. 6,189,613. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, (2001).
- [5] Schrenkel, P. J., "Joint Industry Development of the Downhole Oil Water Separation System-Field Case Study", Society of Petroleum Engineers, (1997).
- [6] Roth, B. A., Busfar, W. A., "Downhole oil/water separation system for improved injectivity and reservoir recovery", United States patent US, 10,253,610, (2019).
- [7] Muktadir G, Amro M. D., Schramm A., "Review and applicability of downhole separation technology". In SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, (2016).
- [8] Matthews C. M., Chachula, R., Peachey, B. R., Solanki, S. C., "Application of downhole oil/water separation systems in the alliance field", In SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference, Society of Petroleum Engineers, (1996).
- [9] Browning, B., "faxed data sheet and personal communication between Browning", Tri Link Resources Ltd. Calgary, Alberta, and J. Veil, Argonne National Laboratory, Washington, DC, May., (1998).
- [10] Sobie, S, Matthews, C. T., "Application Experience with Downhole Oil/Water Separation Systems", in Southeast Saskatchewan. In Canadian Section Society of Petroleum Engineers/Petroleum Society of CIM One-Day Conference of Horizontal Well Technology, (1997).
- [11] Dellarole, E., Tealdi, S., Ciandri, P., Di Renzo, D., Maliardi, A., Del Gaudio, L., Pedretti, M., "A New Downhole Oil-Water Separation System", In Offshore Mediterranean Conference and Exhibition ,Offshore Mediterranean Conference, (2015).
- [12] Denney, D., "Downhole oil/water separation systems in high-volume/high-horsepower application", *J. pet. tech.* 56, pp.48-49, (2004).
- [13] Li, F., Li, X., Zou, X., Duan, Z., Liao, T., Lu, X., Ren, Y., "The First Successful Deployment of Downhole Oil-Water Separation Technology in South China Sea: Lessons Learned and Way Ahead.", In Offshore Technology Conference, Asia, (2018).
- [14] Bowers, B. E., Brownlee, R. F., Schrenkel, P. J., "Development of a Downhole Oil/Water Separation and Reinjection System for Offshore Application", (1998).
- [15] Alhanati F., Zahacy, T., Peachey, B., "Sharing the Risk in DHOWS Technology Development", In a meeting of the International Downhole Processing Group, Milan, Italy, (2002).
- [16] Veil, J. A., Langhus, B. G., Belieu, S., "Feasibility evaluation of downhole oil/water separator (DOWS) technology", United States, (1999).
- [17] Veil, J. A., Quinn, J., "Performance of downhole separation technology and its relationship to geologic conditions", In SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference Society of Petroleum Engineers ,(2005).
- [18] Yang, G., He, L., Feng, L., Yong, Z., Bo Y., Haoyu, L., "Application of DOWS (Downhole Oil Water Separation) Technology Used in High Water-Cut Oilfield: Case Study", In SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, (2015).