

Evaluation of matrix acidizing job in a multi-layered gas-condensate carbonate reservoir using well test analysis combined with production logging interpretation

Roya Geravand^{1*}, Ali Nakhaee², Mojgan Abbasi³

1- Department of Petroleum Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Iran

2- Department of Petroleum Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Iran / Institute of Petroleum Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

3- Institute of Petroleum Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

Keywords: Well-test analysis, Production logging, Matrix-acidizing, Gas-condensate carbonate reservoirs

1- Introduction

When the flow efficiency in a heterogeneous carbonate reservoir decreases due to formation damage, production engineers try to improve the well's productivity through proper remediation and stimulation. Acid injection into the damaged formation should be performed below the formation fracture gradient known as matrix acidizing (Huner and Pshtiwan, 2018). However, performing matrix acidizing in long slanted wells drilled in multilayer carbonate reservoirs is difficult. Thus, to ascertain the uniform acid dispersion and skin removal in such reservoirs, proper acid diversion will be critical in matrix-acidizing jobs. In this paper, the main objective is to evaluate the performance of matrix acidizing for each reservoir layer in a gas-condensate carbonate reservoir by using the results of two sets of diagnosing data, including production logging data, well test data, and surface well-test data, which had been performed before and after stimulation job in the subject well.

Furthermore, to analyze the wells test data, only periods with constant rates are usually used in wells test analysis because the measured pressure response corresponds to the fluctuated or variable rates. The deconvolution technique offers a solution to overcome this issue through converting the whole test periods into a constant-rate pressure drawdown (Ilk et al., 2005; Gringarten, 2008; Liu et al. 2017), which has been used in this study as well to use the data of the whole test (drawdown and buildup). The pressure deconvolution model is given by this well-known convolution integral (Ecrin 4.30 tutorial):

$$p_i - p(t) = \int_0^t q(\tau) - p'_u(t) d\tau \quad (1)$$

Where $p(t)$ and $q(t)$ are the observed pressure and rate respectively and, p_i is the initial reservoir pressure. The deconvolved curve $p_u(t)$ corresponds to the constant-rate pressure response.

2- Methodology

This paper used Ecrin-Saphir and Emeraude to interpret well-testing and production logging data, respectively. The data were taken from a slanted well in a giant gas-condensate carbonate reservoir in the Persian Gulf. Two sets of diagnoses using PLT data, pressure transient data, and surface well testing have been performed in the well, before and after matrix acidizing job.

Usually, surface well testing is performed as a common practice to evaluate the performance of acid treatment job, which allows engineers to calculate the improvement of wellhead flowing pressure (WHFP) and total productivity index (PI) using a wellbore performance relationship (WPR). However, the case would be complicated when evaluating stimulation job efficiency in a multi-layered reservoir is the target. As a result, it is necessary to conduct the single-layer well-testing job to achieve each reservoir layer properties, including skin

* Corresponding author: rgeravand@ut.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2020.34456.2144

Received 2020-07-26

Accepted 2020-10-23

factor (S), kh product, and initial reservoir pressure (P_i), which would be very time consuming costly. Hence, to meet those requirements, the production logging (PL) combined with commingled pressure transient data has also been carried out in the subject well before and after the acidizing job. Then, the PL interpretation outputs and Selective Inflow Performance (SIP) analysis results (production/injection contribution and average reservoir pressure of each layer, respectively) were used as the inputs for PTA, which enabled us to conduct a thorough multi-layer analysis. In conjunction with other complementary data, the PTA-PLT interpretation results provided the ability to investigate the effectiveness of matrix-acidizing treatment or the quality of acid placement for each layer. Besides the pressure-derivative method, the variable-rate deconvolution approach was also applied for PTA to achieve much more reliable results, better understand reservoir behavior, and identify possible boundary-dominated effects in the subject.

3- Results and discussion

According to pre and post-acid diagnosis results, PI and WHFP for each layer (three-reservoir layer) improved very well. However, the bottommost layer with higher average reservoir pressure has been influenced significantly. After acid treatment, the Productivity Index for Layer 3 had enormous improvement by fifteen folds. However, it increased double in the other two reservoir layers, as plotted in Fig. 1. Considering deconvolution analysis results, it increased the range of pressure data available for PTA, which helped to see the effects of boundary dominated flow regime and two-radial-flow stabilization with different kh and skin effects post-acidizing deconvolved derivative. However, it did not observe a Log-log pressure derivative.

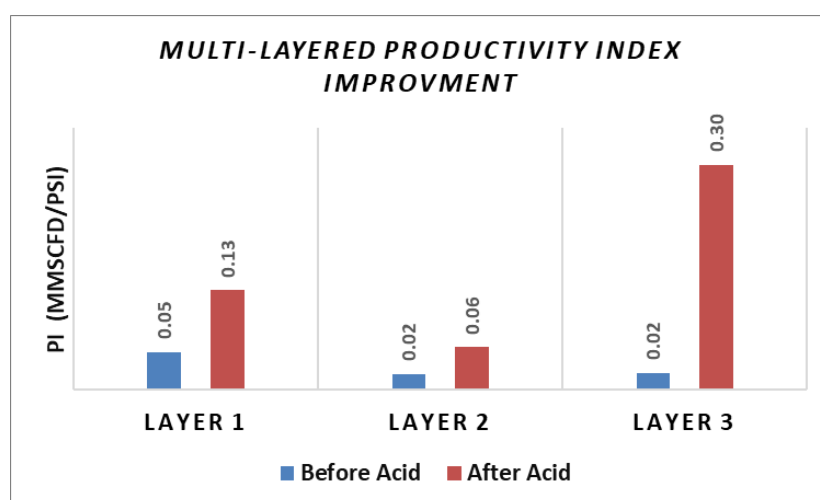


Fig. 1. Multi-layered Productivity Index (PI) results from Selective Inflow Performance analysis (Before and after matrix-acidizing job).

3- Conclusions

1. The results indicated that after the acid treatment job, the WHFP was improved around 623 psi at a constant rate and the total PI increased by three folds. Furthermore, the PI of the bottom-most layer improved by a factor of 15, and the other two layers by a factor of 2.8 approximately. Hence, it demonstrated that the treatment job has successively improved well's performance.
2. Acid has done an excellent job overall with the well's production improvement; however, most acid-treated Layer 3 has the highest pressure.
3. Conducting integrated acid treatment evaluation in a multi-layered carbonate reservoir using PL interpretation outputs, SIP analysis and, PTA at the same time saved a large amount of cost and time to obtain each layer parameters through performing single-layer wells test analysis.
4. Among other benefits of the deconvolution method, the deconvolved derivative provided us with time extension /more data range for interpretation, around 31 and 62 hours for pre and post-acid PTA, respectively. Meanwhile, the pre and post-acid build-up duration were only around 14 and 17 hours.

5. Combining different data sources for interpretation helped to achieve more confidence in findings, and it suggested that acid job needs to be improved from diverters and gels application point of view to allow other shallow layers to contribute to flow that can be an outstanding lesson learned.

References

- Ecrin 4.30. Deconvolution process, Software Tutorial, 2015. Kappa Engineering, France.
- Gringarten, A.C., 2008. From straight lines to deconvolution: The evolution of the state-of-the-art in well test analysis, SPE Reservoir Evaluation & Engineering 11(1), 41-62.
- Huner, K.H., Pshtiwan, T.M.J., 2018. Matrix Acidizing of Carbonate Formations: A Case Study. International Journal of Engineering and Techniques 4(2), 851-858.
- ILK, D., Valko, P.P., Blasingame, T.A., 2005. Deconvolution of variable rate reservoir performance data using b-splines, M.Sc Dissertation, Texas A&M University.
- Liu, W., Liu, Y., Han, G., Zhang, J., Wan, Y., 2017. An improved deconvolution algorithm using B-splines for well-test data analysis in petroleum engineering. Journal of Petroleum Science and Engineering 149, 306-314.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Geravand, R., Nakhaee, A., Abbasi, M., 2022. Evaluation of matrix acidizing job in a multi-layered giant gas-condensate carbonate reservoir using well test analysis combined with production logging interpretation. Adv. Appl. Geol. 11(4), 838- 855.

DOI: 10.22055/AAG.2020.34456.2144

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16259.html?lang=en

ارزیابی عملکرد عملیات اسیدکاری ماتریسی در یک مخزن گاز میعانی کربناته چندلایه با استفاده از تلفیق نتایج چاه آزمایی و نمودار نگار تولید

رویا گراوند*

گروه مهندسی نفت، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، ایران

علی نخعی

گروه مهندسی نفت، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، ایران/ انستیتو مهندسی نفت، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مژگان عباسی

انستیتو مهندسی نفت، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۲

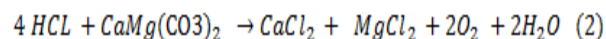
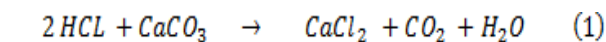
*rgeravand@ut.ac.ir

چکیده

اسیدکاری ماتریسی یکی از مهمترین اقدامات برای افزایش و نگهداشت بهره‌دهی طولانی مدت چاه است. اسیدکاری ماتریسی چاه‌های انحرافی عمیق در مخازن هتروژن / ناهمگن بسیار چالش‌برانگیز است و بررسی میزان کارایی این عملیات اهمیت بسزایی دارد. این مطالعه ارزیابی عملکرد اسیدکاری ماتریسی و بهبود قابلیت انتقال سیال چاه در یک مخزن گاز میعانی کربناته چندلایه را با استفاده از تفسیر داده‌های آزمایشات سرچاهی، تحلیل چاه‌آزمایی دی‌کانولوشن / آنالیز فشار گذرا مرسوم و بکارگیری نتایج تفسیر نمودار نگار تولید ارائه می‌کند. این ارزیابی می‌تواند برای بهینه‌سازی استراتژی عملیات اسیدکاری در چاه‌های اطراف، طراحی و همچنین اجرای عملیات اصلاحی مناسب در چاه‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه، نتایج تفسیر داده‌های آزمایشات سرچاهی حاکی از موفقیت‌آمیز بودن عملیات تحریک چاه می‌باشد، بطوریکه شاخص بهره‌دهی کل حدود سه برابر و فشار جریانی سرچاهی حدود ۶۲۳ پام افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این، میزان انداخت فشار نیز به حدود یک سوم (۱/۳) کاهش یافت. تفسیر نمودارهای تولید و تحلیل چاه‌آزمایی در مخزن چندلایه مورد مطالعه نشان داد عملیات تحریک چاه، عمدتاً عمیق‌ترین لایه مخزنی با بالاترین فشار را تحت تاثیر قرار داده است. بنابراین، ضریب پوسته لایه‌های مخزنی مختلف بطور یکنواخت برطرف نگردیده است. این مهم بایستی در طراحی عملیات‌های اسیدکاری آتی، در سایر چاه‌های اطراف / مشابه مورد توجه قرار گیرد به نحوی که هدایت اسید در مخزن به سمت فواصل مخزنی که کمتر تحت تاثیر قرار گرفته‌اند نیز کنترل گردد.

کلمات کلیدی: چاه‌آزمایی، نمودارگیری تولید، اسیدکاری ماتریسی، مخازن گاز میعانی کربناته

مقدمه



اجرای اسیدکاری ماتریسی در چاه‌های انحرافی طویل در مخازن کربناته ضخیم لایه بسیار مشکل است. زیرا حجم زیادی از اسید برای این چاه‌ها لازم است و تخلیه کردن^۱ این حجم زیاد اسید چالش‌برانگیز است. علاوه بر این، لایه‌های مخزنی ضخیم این مخازن ناهمگن دارای ظرفیت جریانی (محصول kh^2)، ضریب پوسته و فشار متوسط مخزنی^۳ متفاوتی هستند. بنابراین جهت رفع اثر پوسته و توزیع یکنواخت^۴ اسید در این مخازن، هدایت / انحراف مناسب اسید یک پارامتر کلیدی در

سنگ‌های کربناته بسیار ناهمگن هستند و مشخصه‌سازی مخزن در آنها خیلی پیچیده است. وقتی که کارایی جریان یک چاه در یک مخزن کربناته به دلیل آسیب سازندی کاهش می‌یابد، مهندسين بهره‌برداری تلاش می‌کنند با بکارگیری عملیات اصلاحی مناسب و تحریک چاه، بهره‌دهی چاه را بهبود دهند. این اقدام باعث از بین بردن اثر پوسته ناحیه نزدیک دیواره چاه و عبور از آسیب سازندی با ایجاد کرمچاله می‌باشد. تزریق اسید به داخل سازند آسیب دیده بایستی زیر گردایان شکستگی سازند اجرا گردد که به اسیدکاری ماتریسی معروف می‌باشد (Huner and Pshtiwani, 2018). به طور معمول اسید کلریدریک (HCL) برای تحریک سازندهای کربناته بکار می‌رود (Guo et al., 2007). معادله ۱ و ۲ تشکیل سنگ‌های کربناته و نحوه واکنش آنها با اسید کلریدریک را نشان می‌دهد (Curtis et al., 1992):

- 1- Offloading
- 2- Permeability-thickness
- 3- Average reservoir pressure
- 1- Uniform acid dispersion

عملیات اسیدکاری، لازم است کارایی تحریک چاه از نقطه نظر عملکرد جریانی چاه^۳، برطرف شدن ضریب پوسته، بهبود تولید چاه و غیره بررسی گردد. یک اقدام متداول در صنعت نفت جهت ارزیابی عملیات اسیدکاری، بررسی دبی جریانی و فشار سرچاهی بعد از اسیدکاری است. بدین منظور، آزمایشات سرچاهی به عنوان یک روش مرسوم برای ارزیابی عملکرد عملیات اسیدکاری استفاده می‌شوند. مهندسين با این روش بهبود فشار جریانی سرچاهی (WHFP) و شاخص بهره‌دهی کل را با بکارگیری نمودارهای WPR^۴ محاسبه می‌کنند. با این وجود، ارزیابی کارایی عملیات اسیدکاری در یک مخزن چندلایه بسیار پیچیده است. در نتیجه برای دستیابی به خواص هر کدام از لایه‌های مخزنی از جمله اثر پوسته، ظرفیت جریانی و فشار اولیه مخزن بایستی عملیات چاه‌آزمایی تک لایه در چاه اجرا گردد که زمان و هزینه زیادی را در بر خواهد داشت. در این مطالعه، جهت نیل به این هدف، بدون اجرای عملیات چاه‌آزمایی تک‌لایه و صرف هزینه‌های گزاف ناشی از آن، دو مجموعه کامل از اطلاعات برداشت شده قبل و بعد از اسیدکاری در چاه هدف، مورد آنالیز و تفسیر قرار می‌گیرد. با استفاده از نتایج تفسیر نمودارگیری تولید، آنالیز SIP و بکارگیری خروجی‌های آنها به عنوان ورودی در آنالیز تست فشار گذرا بهم‌آمیخته، امکان ایجاد آنالیز چاه-آزمایی چندلایه و دستیابی به پارامترهای تک‌تک لایه‌ها از جمله بهبود دبی جریانی، ضریب پوسته و فشار هر کدام از لایه‌های مخزنی/ارزیابی عملکرد اسیدکاری در تک‌تک لایه‌های مخزن فراهم می‌گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند باعث شناخت رفتار مخزنی لایه‌های مختلف گردیده و به بهینه‌سازی استراتژی اسیدکاری و بهینه کردن انحراف اسید در چاه‌های آتی میدان، به منظور بهره‌دهی طولانی مدت چاه^۵ کمک کند. بطوریکه با بهبود روش‌های انحراف اسید، از بین بردن یکنواخت ضریب پوسته و در نتیجه تخلیه یکنواخت زون‌های مختلف مخزن اتفاق افتد. علاوه بر این، نتایج بدست آمده کمک می‌کند در طی طول عمر تولید چاه‌های مختلف میدان، صیانت از مخزن یا روش اصلاحی مناسب برای بهبود تولید چاه انتخاب گردد. در این مطالعه، ابتدا ابزارها و روش کار استفاده شده در این پژوهش ارائه می‌شود. سپس عملیات اسیدکاری ماتریسی و نتایج تفسیر دو مجموعه از آزمایشات سرچاهی، آنالیز فشار گذرا و تفسیر نمودارگیری تولید که قبل و بعد از عملیات اسیدکاری در چاه برداشت شده بودند مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در انتها، به خلاصه یافته‌های تحقیق و نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

روش کار

در این مقاله از نرم‌افزارهای Ecrin-Saphir و Emeraude برای تفسیر داده‌های چاه‌آزمایی و نمودارهای تولید استفاده شد. این داده‌ها از یک مخزن گاز میعانی کربناته در خلیج فارس اخذ گردیده است. اولین قدم برای برنامه‌ریزی عملیات تحریک چاه، تشخیص مساله و سپس طراحی مواد و دستورالعمل مناسب برای اجرای عملیات اصلاحی مورد

موفقیت عملیات اسیدکاری می‌باشد. در مطالعات پیشین، محققین برای ارزیابی عملکرد عملیات‌های اسیدکاری، روش‌های مختلفی را ارائه نموده‌اند. Ziauddin و Robert (۲۰۰۳)، روشی برای طراحی، بهینه‌سازی اجرا و ارزیابی عملکرد عملیات اسیدکاری ماتریسی در مخازن ماسه‌سنگی ارائه نمودند. ارزیابی آنها بر اساس تخمین ضریب پوسته در زمان واقعی با استفاده از فشار ته‌چاهی و نرخ تزریق بود. اکسون موبیل با توسعه و یکپارچه‌سازی تکنولوژی‌های مورد تقاضا یک رویکرد چندرشته‌ای برای طراحی، اجرا و ارزیابی اسیدکاری ماتریسی در مخازن کربناته ناممکن ارائه نمود (Abou-Sayed et al., 2005). این روش بطور متوالی در چندین میدان کربناته بزرگ اجرایی گردید. بر اساس مطالعه Poe (۲۰۰۶)، شلومبرژر با استفاده از عملکرد تولید بهم‌آمیخته (Commingle) و نتایج نمودارگیری تولید، یک روش مدیریت مخزن برای بهبود تولید چاه در مخازن چند لایه ارائه داد. براساس مطالعه Shuchart و همکاران (۲۰۰۹)، اکسون موبیل و راس گاز Ras Gas جهت ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی استراتژی تحریک چاه برای چاه‌های آتی مخازن لایه‌های خوف^۱ در میدان شمالی قطر، یک روش یکپارچه ارائه کردند. آنها با استفاده از نتایج تست ساخت فشار بهم‌آمیخته^۲ یا تست تمام لایه‌ها با هم، kh کل و ضریب پوسته کل مخزن را تخمین زدند. اما با این روش، دستیابی به پارامترهای چاه/مخزن تک‌تک لایه‌ها مقدور نبود. Hong-Wei و Guo-Feng (۲۰۱۶)، با استفاده از چاه-آزمایی مرسوم و نمودارگیری تولید، روشی برای تخمین پارامترهای چاه و مخزن به صورت مجزا در هر کدام از لایه‌های مخازن چندلایه پیشنهاد دادند. کاربرد این روش بطور موفقیت‌آمیزی در چندین مثال میدانی تست گردید. Geravand و همکاران (۲۰۲۰) جهت مشخصه‌سازی یک مخزن گاز میعانی کربناته، مطالعه یکپارچه مخزن با استفاده از تحلیل چاه‌آزمایی دی‌کانولوشن و تفسیر داده‌های نمودارگیری را ارائه نمودند. در مجموع، مطالعات خیلی کمی از تلفیق نمودارهای تولید و تحلیل چاه‌آزمایی برای ارزیابی عملیات اسیدکاری استفاده کرده‌اند. ترکیب نتایج آزمایشات سرچاهی، تفسیر نمودارهای تولید و آنالیز داده‌های چاه-آزمایی (با استفاده از هر دو روش مشتق فشار و دی‌کانولوشن) برای بررسی عملکرد عملیات اسیدکاری مخازن کربناته ضخیم‌لایه که در این مطالعه ارائه می‌شود، یک مطالعه جدید و نو می‌باشد که با جلوگیری از صرف هزینه‌های سنگین برای اجرای عملیات چاه‌آزمایی در تک‌تک لایه‌های مخزنی، امکان دستیابی به پارامترهای مخزن/چاه در تک‌تک لایه‌ها و در نتیجه ارزیابی نحوه عملکرد اسیدکاری در هر کدام از لایه‌های مخزنی را میسر می‌سازد.

در این مقاله، هدف اصلی ارزیابی عملکرد اسیدکاری ماتریسی در مخازن کربناته گاز میعانی چندلایه با استفاده از نتایج دو مجموعه از داده‌های مخزن / چاه شامل نمودارهای تولید، داده‌های چاه‌آزمایی و داده‌های آزمایش سرچاهی است که قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی در یک چاه انحرافی / زاویه‌دار برداشت گردیده است. بعد از اجرای هر نوع

4- Well flow performance

5- Wellhead performance relationship

6- Long-term well deliverability

2- Khuff layer reservoirs

3- Commingle build-up test

کاهش آسیب سازند و افزایش تولید چاه می‌باشد. سنگ‌شناسی اصلی مخزن از نوع کربناته (آهک، دولومیت و درصد بسیار کمی انیدریت) است و سیال مخزن گاز میعانی می‌باشد. با توجه به خواص سنگ و سیال مخزن و مشخصات چاه مورد مطالعه، اسیدکلریدریک ۷۰ گالن بر فوت با غلظت ۲۸ درصد وزنی و ۷۰ گالن بر فوت و منحرف‌کننده ویسکوالاستیک^۴ (VDA) با غلظت ۱۵ درصد وزنی برای عملیات اسیدکاری ماتریسی در این چاه طراحی و اجرا شده است. عامل منحرف‌کننده ویسکوالاستیک، به عنوان منحرف‌کننده شیمیایی برای جلوگیری از هرزروی اسید در نواحی نامطلوب^۵ بکار رفته است.

برای دستیابی به خواص هر کدام از لایه‌های مخزنی از جمله اثر پوسته، ظرفیت جریان و فشار اولیه مخزن (بدون انجام عملیات چاه-آزمایی تک لایه در چاه و جلوگیری از صرف زمان و هزینه‌های گزاف)، داده‌های نمودارگیری تولید به همراه تست فشار گذرا بهم‌آمیخته قبل و بعد از عملیات اسیدکاری در چاه مورد مطالعه برداشت گردیده است. پس از تفسیر داده‌های نمودار نگار تولید، خروجی‌های تفسیر نمودارگیری تولید و نتایج آنالیز^۶ SIP (سهم مشارکت هر کدام از لایه‌ها در تولید و تزریق و همچنین فشار متوسط هر لایه مخزنی) به عنوان ورودی‌های آنالیز تست فشار گذرا استفاده شدند که امکان انجام آنالیز چندلایه^۷ را فراهم نمود. در نهایت، خواص هر لایه مخزنی شامل ضریب پوسته، ظرفیت جریان و فشار اولیه هر لایه محاسبه گردید. نتایج تفسیر نمودارهای تولید و آنالیز تست فشار گذرا (PTA-PLT) به همراه سایر داده‌های تکمیلی ما را قادر نمود بتوانیم کارایی عملیات اسیدکاری ماتریسی یا کیفیت اسیدکاری^۸ هر لایه را بطور مجزا بررسی کنیم. به عبارت دیگر، دستیابی به پارامترهای مخزنی / چاه برای هر لایه از طریق تلفیق نتایج آنالیز و تفسیر داده‌های قبل و بعد از عملیات اسیدکاری باعث شد بتوان کیفیت عملکرد عملیات اسیدکاری ماتریسی در هر لایه مخزنی را بطور مجزا ارزیابی نمود (نمودار / فلوچارت شکل ۱). علاوه بر روش مشتق فشار، جهت کسب نتایج قابل اعتمادتر، درک بهتر رفتار مخزن و تشخیص اثرات مرزی احتمالی در چاه مورد مطالعه، تکنیک دی‌کانولوشن دبی متغیر نیز برای تحلیل چاه‌آزمایی استفاده شد.

نیاز است. بعد از تکمیل عملیات اسیدکاری، لازم است کارایی آن بررسی گردد زیرا این کار به بهینه‌سازی دستورالعمل سایر عملیات‌های تحریک چاه آتی و همچنین کاهش هزینه و زمان نیز کمک می‌کند.

در این مطالعه آنالیز داده‌های چاه‌آزمایی با استفاده از هر دو روش مشتق فشار و دی‌کانولوشن انجام شد. مدل‌های توسعه داده شده برای آنالیز تست فشار گذرا براساس شرایط مرزی داخلی ثابت هستند. درحالی‌که ثابت نگه داشتن دبی جریانی چاه در طی عملیات چاه‌آزمایی، کار آسانی نمی‌باشد. بنابراین، تنها دوره‌های تست ساخت فشار در آنالیز چاه‌آزمایی استفاده می‌شوند. زیرا پاسخ فشار اندازه‌گیری شده منطبق بر دبی‌های متغیر می‌باشد (Gringarten, 2008; Liu et al., 2017). تکنیک دی‌کانولوشن کل فواصل زمانی تست (تست‌های ساخت فشار و انداخت فشار^۱) را به یک تک تست انداخت فشار دبی ثابت تبدیل می‌کند و داده‌های بیشتری را برای تفسیر در دسترس قرار می‌دهد (Ilk et al., 2005, Gringarten, 2008). بر اساس تحقیقات انجام شده، تاکنون تنها سه الگوریتم دی‌کانولوشن پایدار در برابر خطا توسط Von Schroeter و همکاران (۲۰۰۲)، Levitan (۲۰۰۵) و ILK و همکاران (۲۰۰۵) توسعه یافته است. این سه الگوریتم به اندازه کافی پایدار هستند و دی‌کانولوشن را تبدیل به یک ابزار کاربردی برای آنالیز داده‌های تولید و چاه‌آزمایی نموده است (Onur et al., 2008). Gringarten در سال ۲۰۱۰ استفاده کاربردی از دی‌کانولوشن را در چاه‌آزمایی ارائه نمود زیرا تا قبل از آن زمان مهندسين به ندرت از این روش در تحلیل چاه‌آزمایی استفاده می‌کردند. مدل دی‌کانولوشن فشار/دبی با استفاده از انتگرال معروف کانولوشن در معادله ذیل ارائه می‌گردد (Ilk, 2005, Ecrin 4.30 tutorial 2015; Liu et al., 2017):

$$p_i - p(t) = \int_0^t q(t - \tau) - p'_u(t) d\tau \quad (3)$$

در معادله فوق، $p(t)$ و $q(t)$ به ترتیب برابر فشار اندازه‌گیری شده و دبی جریانی معادل آن می‌باشد. فشار اولیه مخزن^۲ نیز با نماد p_0 نشان داده شده است، نمودار دی‌کانوالو شده $p_u(t)$ برابر پاسخ فشار تست انداخت فشار دبی واحد / ثابت^۳ می‌باشد.

در این مطالعه، چاه هدف (چاه A) انحرافی بوده و با لوله آستری ۷ اینچ در عمق حدود ۱۲۰۰۰ فوت تکمیل شده بود. این چاه تولیدی به صورت تک فاز گاز تولید می‌کند. انتخاب مناسب چاه برای اسیدکاری بر اساس تاریخچه تولید، شاخص بهره‌دهی چاه و خصوصیات مخزنی آن انجام می‌شود. دو مجموعه کامل از داده‌های نمودارگیری تولید، آنالیز فشار گذرا و آزمایشات سرچاهی، قبل و بعد از اسیدکاری در چاه هدف برداشت گردیده است. تلفیق انواع مختلف داده‌ها می‌تواند به مشخصه‌سازی رفتار مخزن و عملکرد چاه جهت طراحی بهینه عملیات اسیدکاری چاه کمک کند که عملیات بسیار پرهزینه‌ای مخصوصاً در میدان فراساحلی مورد مطالعه می‌باشد. هدف اصلی عملیات اسیدکاری

4- Viscoelastic Diverting Agent (VDA)

5- Undesired regions

6- Selective Inflow Performance

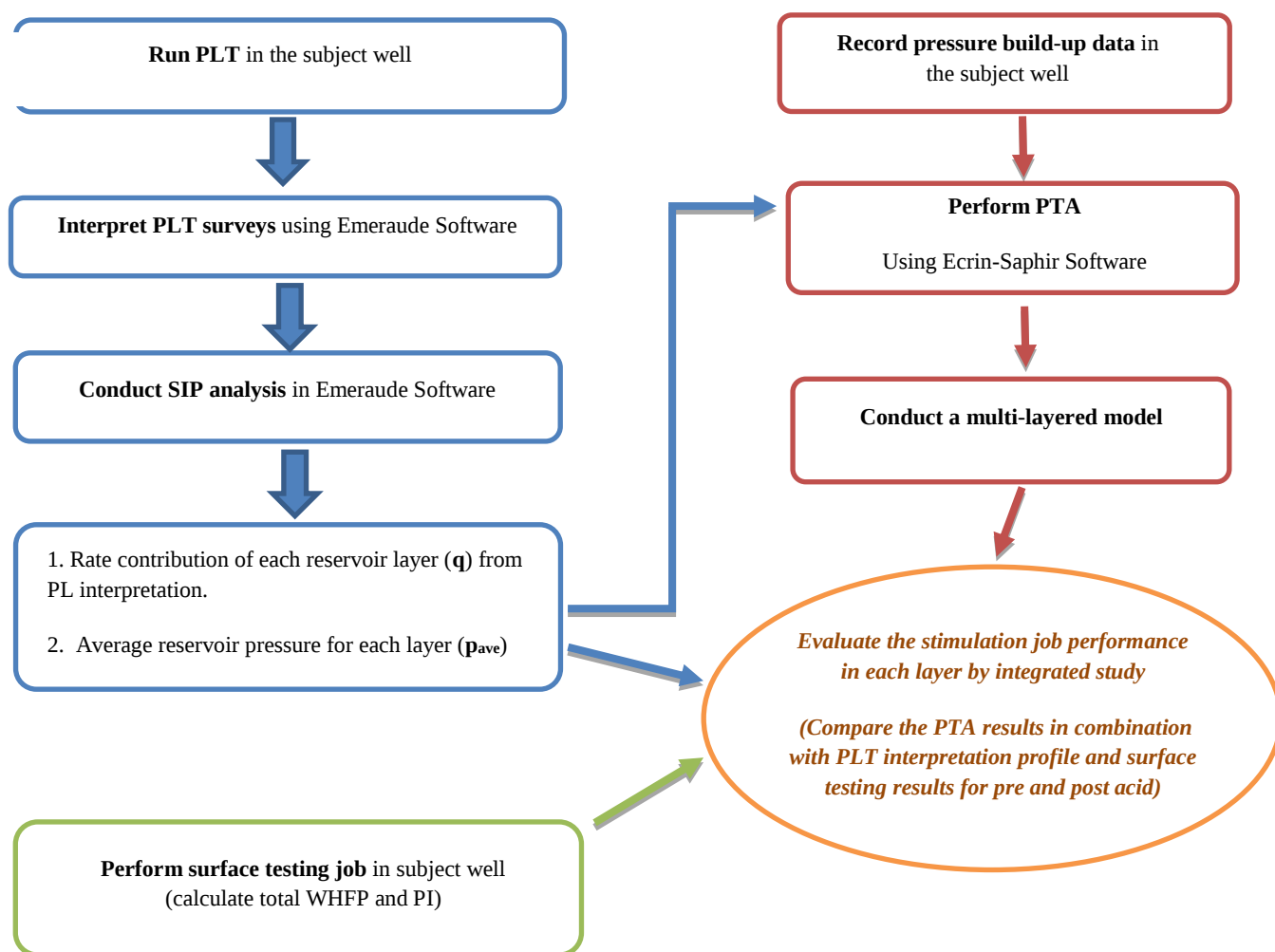
7- Multi-layer analysis

8- Acid placement

1- Drawdown and buildup

2- Reservoir initial pressure

3-Unit /constant rate drawdown pressure response



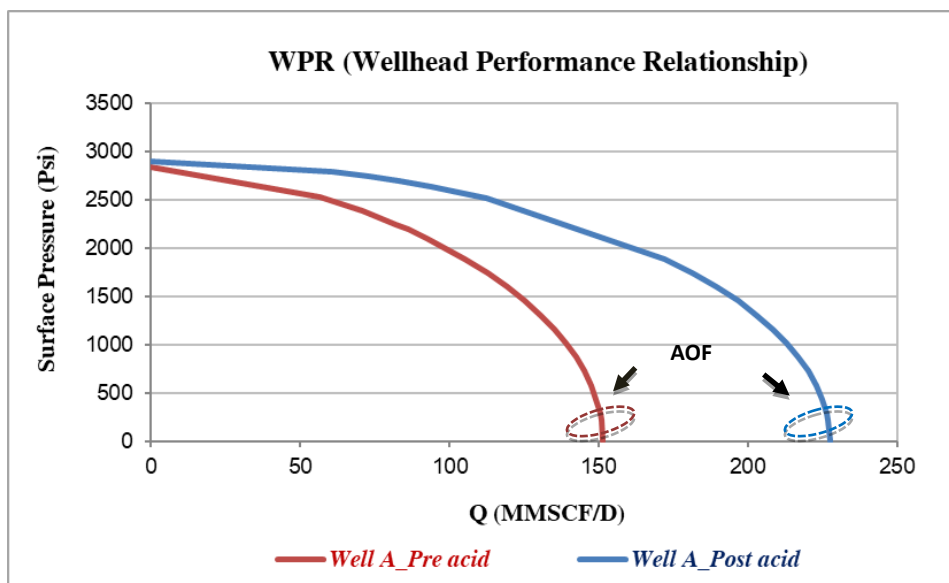
شکل ۱- مراحل ارزیابی عملکرد تحریک چاه در یک مخزن چندلایه با استفاده از تلفیق نتایج داده‌های قبل و بعد از عملیات اسیدکاری شامل آزمایشات سرچاهی، تفسیر نمودارهای تولید و آنالیز تست فشار گذار (PLT-PTA) در چاه هدف.

Fig. 1. The workflow of evaluation acid treatment performance in a multi-layered reservoir using PLT-PTA-surface testing data gathering and interpretation from well A, pre and post acidizing jobs.

پارامترهای چاه بعد از تحریک چاه، بیانگر عملکرد موفقیت‌آمیز عملیات اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف می‌باشد. میزان بهبود یا تغییرات پارامترهای مختلف چاه در اثر عملیات اسیدکاری ماتریسی شامل ^{1}AOF ، فشار جریان سرچاهی، انداخت فشار و شاخص بهره‌دهی کل، بطور خلاصه در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

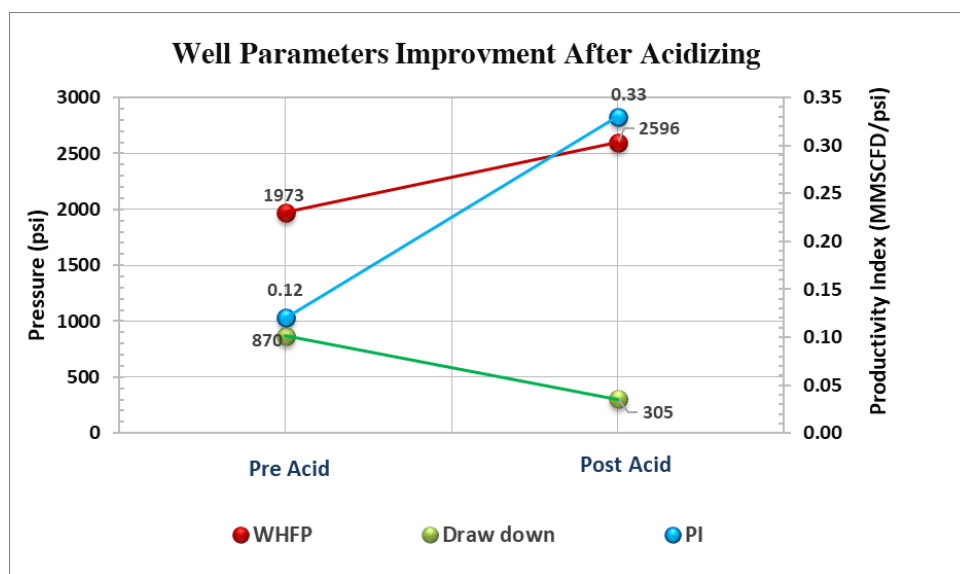
بحث و بررسی نتایج آنالیز اطلاعات قبل و بعد از اسیدکاری نتایج آزمایشات سرچاهی

آنالیز نمودار عملکرد سر چاه (WPR) حاصل از داده‌های آزمایشات سرچاهی نشان داد که بعد از اجرای عملیات اسیدکاری ماتریسی، فشار جریان سرچاهی حدود ۶۲۳ پام (۴۳ بار) در دبی ثابت ۱۰۰ میلیون فوت مکعب در روز (م.ف.ر) افزایش یافت (شکل ۲). شاخص بهره‌دهی کل در چاه نیز حدود سه برابر افزایش پیدا کرد. همانطوریکه در شکل ۳ ملاحظه می‌شود میزان انداخت فشار به حدود ۱/۳ کاهش یافت. بنابراین، تغییرات



شکل ۲- مقایسه نمودارهای عملکرد سرچاه، قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف.

Fig. 2. The comparison of WPR (before and after matrix-acidizing) according to surface well-testing.



شکل ۳- پارامترهای چاه شامل فشار جریان سرچاهی، میزان انداخت فشار و شاخص بهره‌دهی در دبی ثابت ۱۰۰ م.ف.م. بر اساس نتایج تفسیر داده‌های آزمایشات سرچاهی قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی.

Fig. 3. Well parameters including WHFP, drawdown, and total PI calculations at the constant flow rate 100 MMSCFD based on surface well-testing results (before and after stimulation job).

جدول ۱- بهبود پارامترهای مختلف چاه بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی، در دبی ثابت ۱۰۰ م.ف.م.

Table 1. The improvement of well parameters at the constant rate 100 MMSCFD, after stimulation.

Well Status	AOF (MMSCFD)	WHFP (Psi)	Drawdown (Psi)	Total PI (MMSCFD/psi)
Pre-acid	151	1973	870	0.12
Post-acid	228	2596	305	0.33

نتایج نمودارگیری تولید

برای محاسبه خواص مخزن / چاه و همچنین بررسی نحوه عملکرد عملیات تحریک چاه در هر لایه مخزنی، بایستی نمودارگیری تولید و تست فشار گذرا در چاه هدف رانده شود.

رشته ابزار نمودارگیری تولید شامل سنسورهای مختلفی از جمله جریان سنج، جریان سنج کمکی، پرتو گاما، دی الکتریک، CCL، قطرسنج، متمرکز کننده، چگالی، دمای کوارتز، فشارسنج کواتز می باشد. آنالیز فشار گذرا قبل از اسیدکاری شامل دو حالت جریانی و یک شرایط استاتیک در سرعت کابل های مختلف می باشد (شکل ۴). نتایج تفسیر نمودارهای تولید در حالت بسته در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس قرائت ابزارهای تشخیص سیال (چگالی و دی الکتریک)، ستون آب راکد کوچکی در انتهای چاه مشاهده می شود. با این وجود، در سطح/سرچاه هیچگونه تولید آبی دیده نشد. جریان متقاطع یا حرکت عمودی سیال بین لایه ها فقط در طی حالت بسته مشاهده گردید. جهت جریان متقاطع از سمت پایین ترین لایه با فشار متوسط بالاتر به سمت بخش بالای لایه ۲ و لایه ۱ با فشار متوسط پایین تر می باشد (شکل ۵).

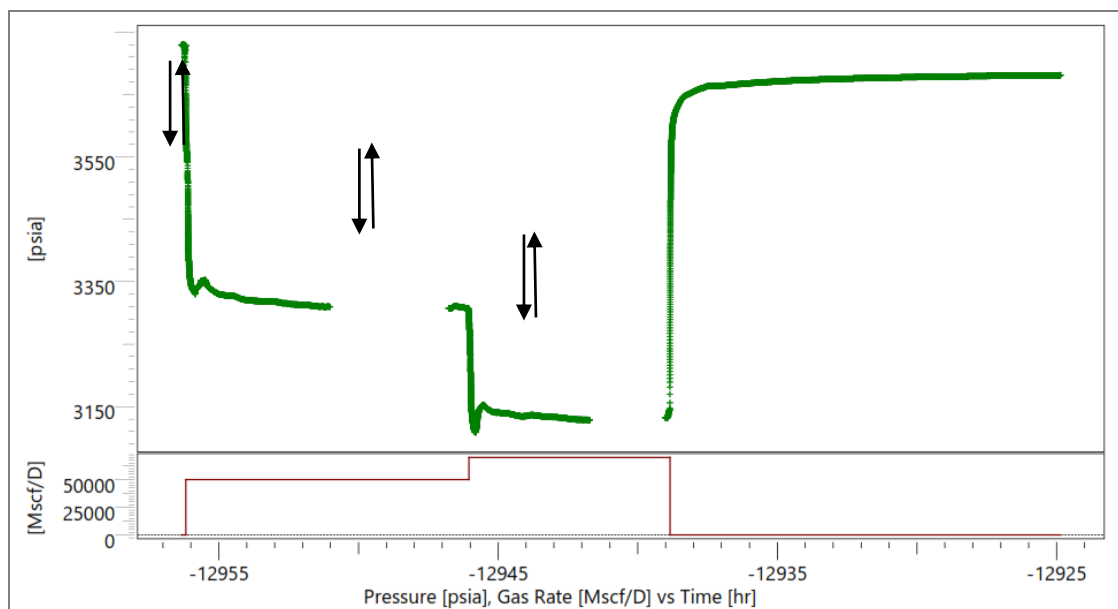
براساس ارزیابی نمودارهای پتروفیزیکی چاه (نوترون، چگالی، مقاومت، صوتی، پرتوگاما، اسپکترومتری گاما و قطریاب)، لایه های مخزنی مورد مطالعه تخلخل، تراوایی و اشباع آب متفاوتی نسبت به هم دارند اگرچه همه این لایه ها از سنگ های کربناته تشکیل شده اند. جریان متقاطع رو به بالا می تواند بیانگر این نکته باشد که فشار متوسط مخزن زیر عمق ۳۵۶۰ متری (دو بازه مشبک کاری انتهای چاه)، بالاتر از فشار متوسط مخزن بالای عمق ۳۴۵۰ متری (لایه ۱ و ۲) است. علاوه بر این،

بازه های مشبک کاری وسط لایه ۲ در عمق حدود ۳۵۶۰-۳۴۵۰ متری در طی حالت های جریانی و بسته، هیچگونه مشارکتی در تولید/تزریق ندارند.

نتایج حاصل از تفسیر در دو حالت جریانی کمینه و متوسط نشان می دهد عمده سهم مشارکت تولید/تزریق مربوط به سه زون، بخش بالای هر سه لایه مخزنی فوق الذکر می باشد. علاوه بر این، پایین ترین لایه مخزنی بیشترین سهم مشارکت را بر عهده دارد، سپس لایه شماره ۱ و لایه شماره ۲ به ترتیب بیشتر در تولید/تزریق سهیم هستند. در نهایت، بخش انتهایی لایه ۲ حداقل مشارکت را در تولید ایفا می کند.

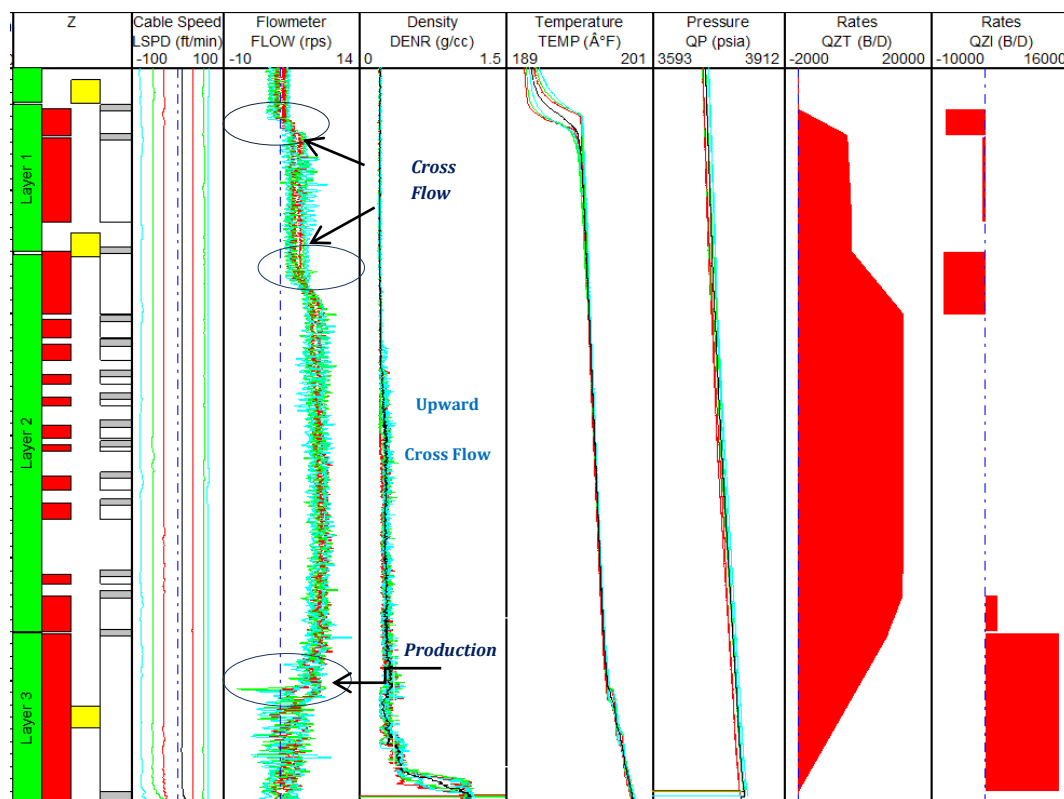
نمودارهای تولید بعد از عملیات اسیدکاری در حالت بسته (pass) های رو به بالا و رو به پایین نمودارگیری در شرایطی که چاه بسته است ثبت می گردند) و سه حالت جریانی (کمینه، متوسط و بیشینه) در شرایط جریانی پایدار و با سرعت های مختلف کابل نمودارگیری در چاه رانده شدند. پس از تست های انداخت فشار چندگانه، داده های فشار گذرا در طی تست ساخت فشار در چاه ثبت گردیدند (شکل ۶).

بر اساس نتایج نمودارگیری تولید بعد از اسیدکاری، جریان متقاطع علاوه بر شرایط استاتیک/بسته در هر سه حالت جریانی نیز دیده شد. اگرچه نرخ جریان متقاطع با افزایش اندازه کاهنده ها کاهش می یافت. مشابه نمودارگیری تولید قبل از اسیدکاری، جهت جریان متقاطع رو به بالا است و فواصل بالای هر سه لایه مخزنی مشارکت کننده های اصلی در تولید/تزریق بودند. بیشترین سهم مشارکت مربوط به لایه ۳ بود، درحالی که بخش وسط لایه ۲ (قبل و بعد از اسیدکاری) هیچگونه مشارکتی در تولید نداشت (شکل ۷).



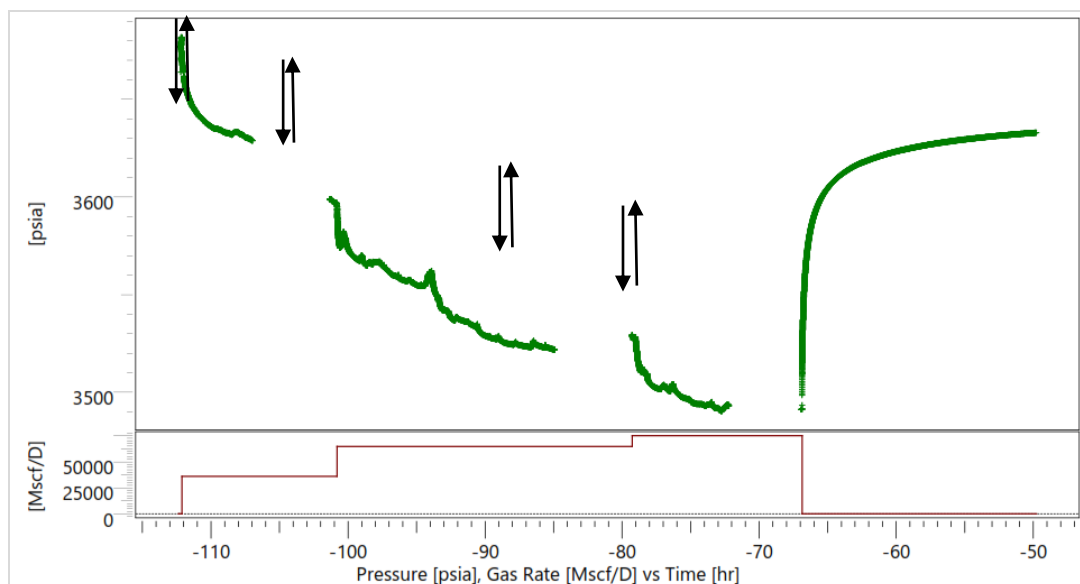
شکل ۴- نمودار تاریخچه فشار برای تست فشار گذرا قبل از عملیات اسیدکاری.

Fig. 4. The pressure history plot for pre-acidizing PTA in well A.



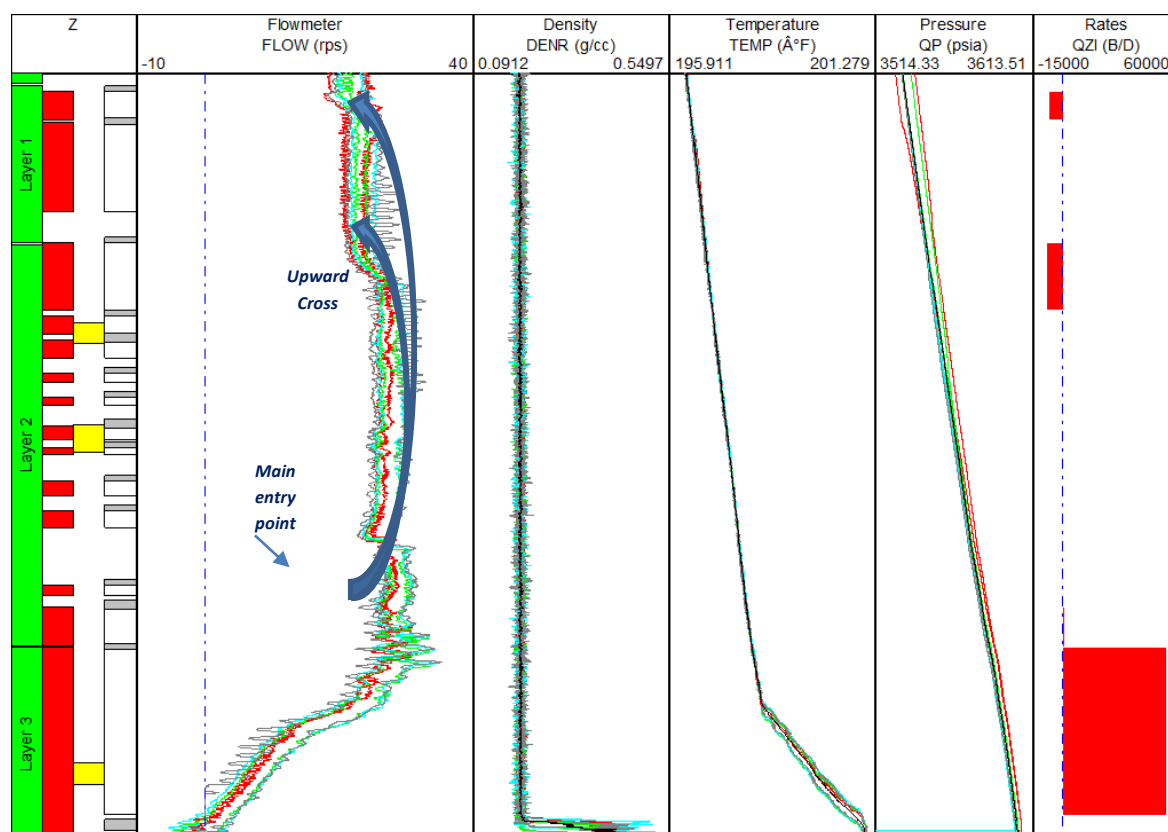
شکل ۵- میزان سهم مشارکت هر سه لایه مخزنی در تولید/تزریق و جریان متقاطع رو به بالا در شرایط بسته (نمودارگیری تولید قبل از اسیدکاری ماتریسی در چاه).

Fig. 5. The rate contribution of three reservoir layers and upward cross flow in shut-in condition (pre-acidizing PLT plot for well A).



شکل ۶- نمودار تاریخچه فشار برای تست فشار گذرا بعد از عملیات اسیدکاری.

Fig. 6. The pressure history plot for post-acid diagnosis.



شکل ۷- سهم مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید/تزریق و جریان متقاطع رو به بالا از سمت پایین‌ترین لایه به سمت بخش ابتدای دو لایه دیگر در دبی جریان متوسط (نتایج تفسیر نمودارهای تولید بعد از اسیدکاری در چاه هدف).

Fig. 7. The rate contribution of three reservoir layers and the upward cross flow from the bottommost layer to the upper layers in moderate flow (post-acidizing PLT plot in well A).

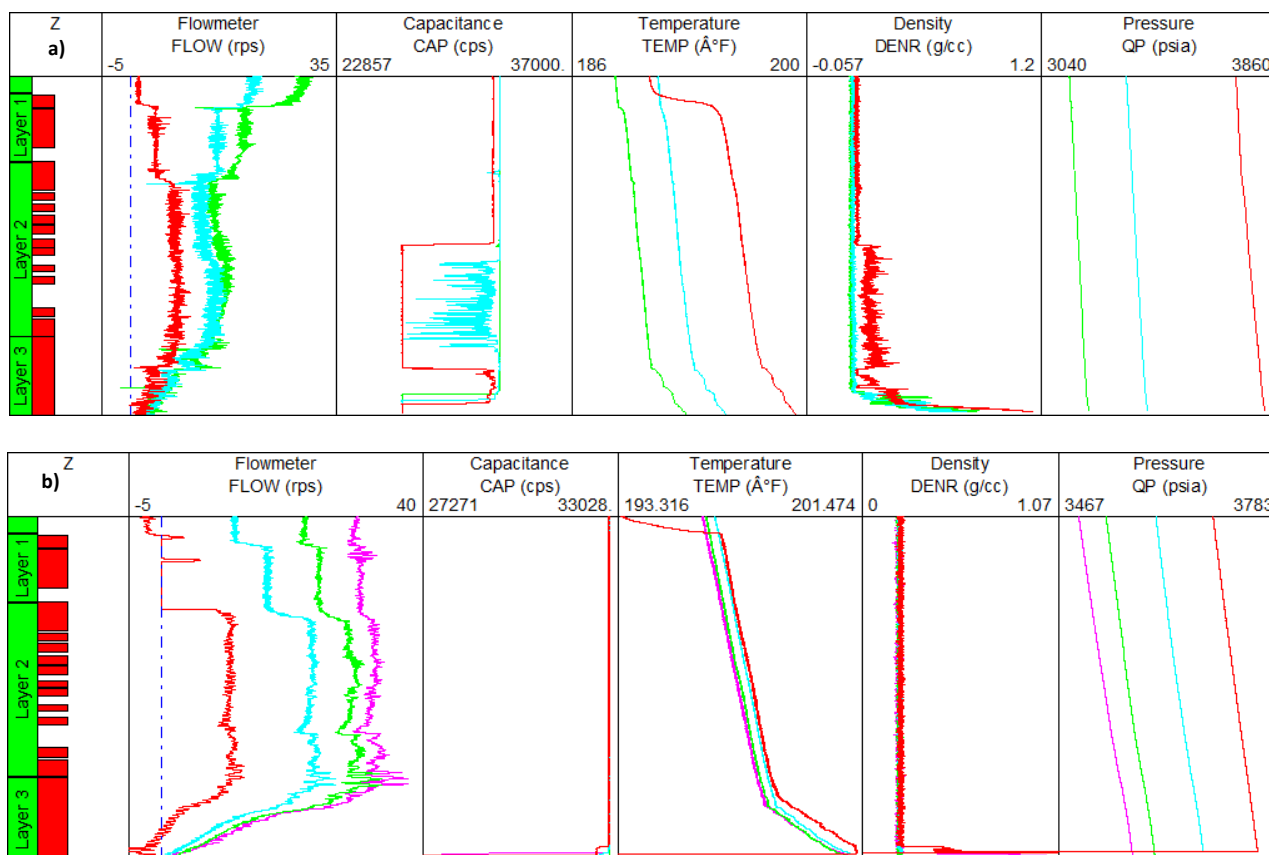
اسیدکاری ماتریسی باعث بهبود بسیار خوب پتانسیل کل چاه شده است اما انحراف اسید، اثر پوسته در زون‌های مختلف را بطور یکنواختی برطرف نکرده است.

سهم مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید / تزریق (مقدار دبی جریان و درصد مشارکت) در تمام حالت‌های جریانی و بسته نمودارهای تولید قبل و بعد از اسیدکاری در شکل‌های شماره ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. نمودارهای تولید قبل از عملیات تحریک چاه، میزان مشارکت لایه ۱ و ۲ در تولید، با افزایش دبی جریانی افزایش می‌یابد درحالی‌که لایه ۳ روند عکس دارد. بعد از اسیدکاری، سهم مشارکت لایه ۳ در تولید به شدت افزایش پیدا می‌کند اما لایه‌های ۱ و ۲ در تمام حالت‌های جریانی و بسته به عنوان زون دزد عمل می‌کنند.

مقایسه مقادیر دبی‌های جریانی درون‌چاهی برای هر لایه مخزنی در طی تمام حالت‌های جریانی و بسته نمودارهای تولید، قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه در جدول شماره ۲ ارائه شده است. این نتایج تاثیر عملکرد اسیدکاری ماتریسی روی میزان سهم مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید/تزریق را نشان می‌دهد.

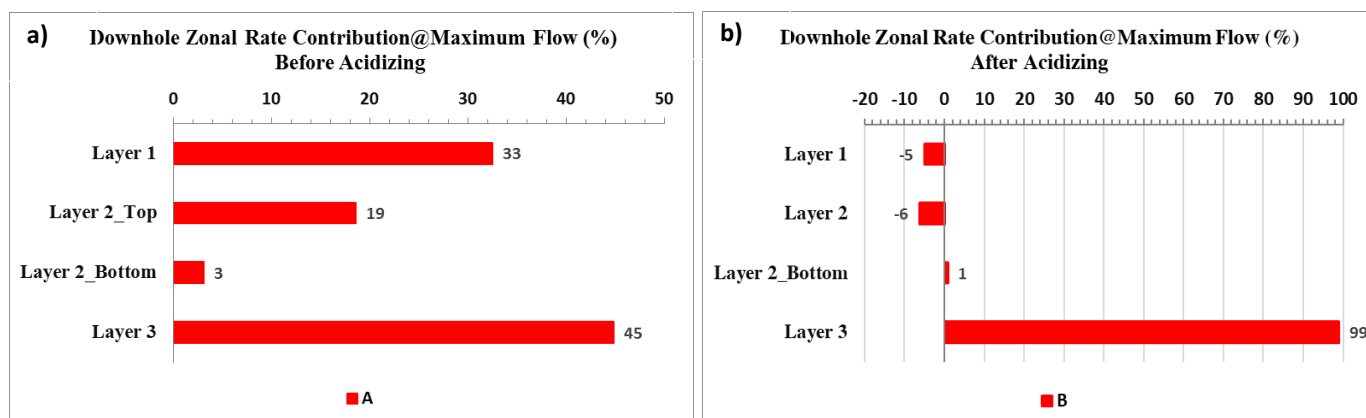
شکل شماره ۸ مقایسه بین تمام حالت‌های جریانی و بسته نمودارگیری تولید، قبل و بعد از اسیدکاری را نشان می‌دهد که بیانگر کارایی عملیات اسیدکاری است. مشاهده جریان متقاطع حتی در حالت جریانی پیشینه، در نمودارهای تولید بعد از اسیدکاری نشان می‌دهد که پتانسیل لایه‌های با تولید بالا احیا شده است. با این وجود، عملیات اسیدکاری ماتریسی پایین‌ترین لایه را بیشتر تحت تاثیر قرار داده است. بنابراین، ارتباط بهتری بین لایه مخزنی شماره ۳ و چاه برقرار شده است. علاوه بر این، اختلاف فشار بین سکانس‌های جریانی و بسته بعد از عملیات تحریک چاه کاهش یافته است (ستون آخر شکل ۸). همانطوریکه ملاحظه می‌شود بخش بزرگی از لایه ۲ در تولید مشارکتی ندارد.

بر اساس نتایج تفسیر داده‌های نمودارگیری تولید در دبی جریانی پیشینه (قبل و بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی)، میزان سهم مشارکت درون‌چاهی زون‌های چند لایه در شکل شماره ۹ (الف و ب) نشان داده شده است. بعد از عملیات تحریک چاه، میزان مشارکت لایه ۳ در تولید به حدود ۹۹ درصد افزایش یافته است. بنابراین، اگرچه



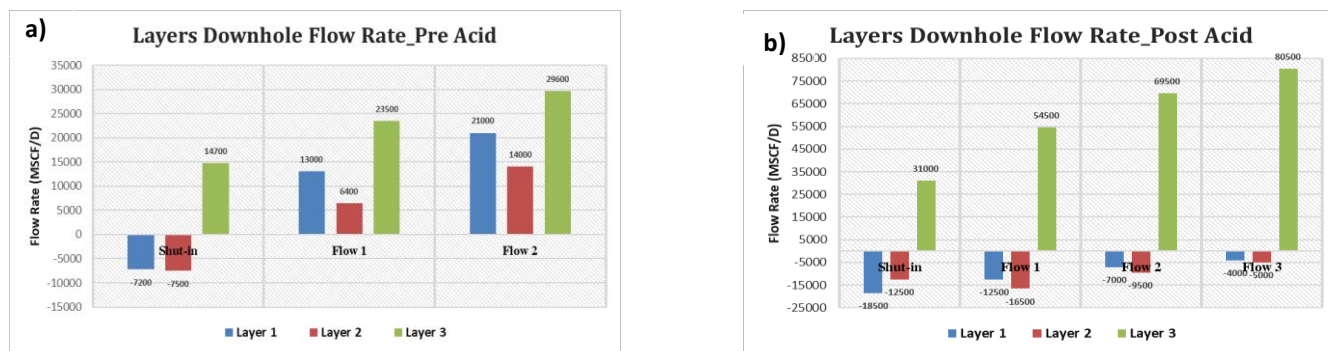
شکل ۸- مقایسه بین تمام حالت‌های جریان و بسته نمودارگیری تولید، قبل از اسیدکاری (a) و بعد از اسیدکاری (b). رنگ قرمز (حالت بسته)، رنگ آبی (جریان کمینه)، رنگ سبز (جریان متوسط) و رنگ صورتی (جریان بیشینه).

Fig. 8. Comparison of all shut-in and flowing surveys from PL, both pre- and post- acidizing jobs (fig a and fig b, respectively). Red color (shut-in), blue color (minimum flow), green color (moderate flow), and pink color (maximum flow).



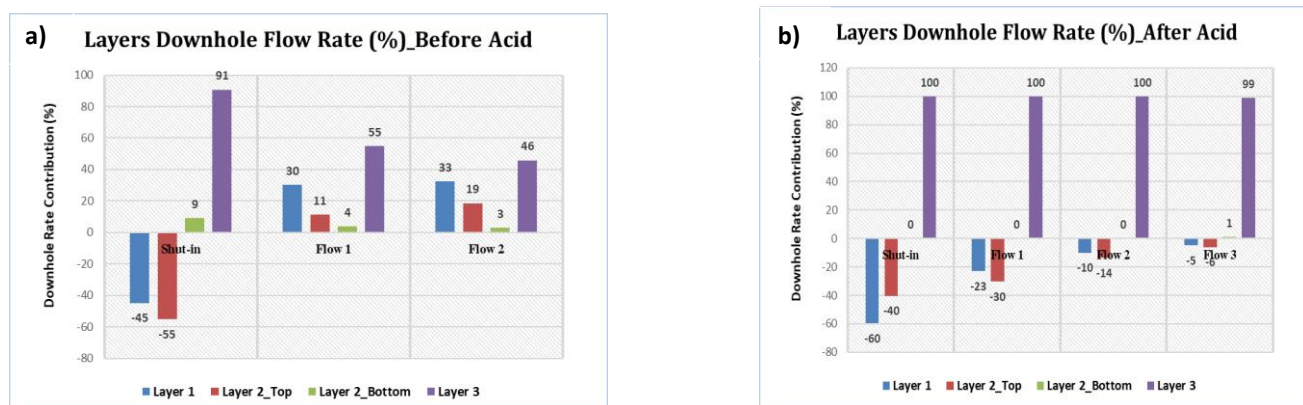
شکل ۹- میزان سهم مشارکت درون چاهی زون‌های مخزنی چند لایه بر اساس نتایج تفسیر داده‌های نمودارگیری تولید در دبی جریان بیشینه، قبل از عملیات اسیدکاری (a) و بعد از عملیات اسیدکاری (b).

Fig. 9. Multi-layered downhole zonal contribution based on PLT maximum flow rate (before and after matrix-acidizing job).



شکل ۱۰- دبی جریان‌های هر کدام از لایه‌های مخزنی در تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته نمودارهای تولید، قبل از عملیات اسیدکاری (a) و بعد از عملیات اسیدکاری (b).

Fig. 10. Downhole flow rate of each reservoir layer during shut-in and flowing conditions (before and after matrix-acidizing job).



شکل ۱۱- درصد مشارکت هر کدام از لایه‌های مخزنی در تولید/تزریق در تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته نمودارهای تولید، قبل از عملیات اسیدکاری (a) و بعد از عملیات اسیدکاری (b).

Fig. 11. Down hole flow rate Contribution (%) for each reservoir layer during shut-in and flowing conditions (before and after matrix-acidizing job).

جدول ۲- دبی جریان‌ی درون چاهی برای هر لایه مخزنی بطور مجزا در طی تمام حالت‌های جریان‌ی و بسته نمودارهای تولید (قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه).

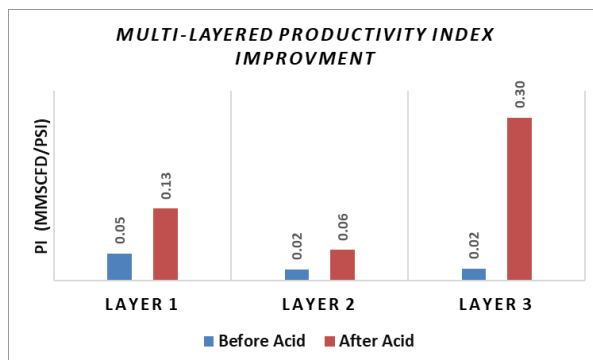
Table 2. The comparison results of downhole flowrate for each individual reservoir layer during shut-in and all flowing conditions, before and after stimulation job.

PL Survey	Layer 1 Flowrate (MSCFD)		Layer 2 Flowrate (MSCFD)		Layer 3 Flowrate (MSCFD)	
	Pre-acid	Post-acid	Pre-acid	Post-acid	Pre-acid	Post-acid
Shut-in	-7200	-18500	-7500	-12500	14700	31000
Flow 1	13000	-12500	6400	-16500	23500	54500
Flow 2	21000	-7000	14000	-9500	29600	69500
Flow 3	-	-4000	-	-5000	-	80500

نمودار نقاط ایستا اندازه‌گیری شده^۱ در طی حالت‌های جریان‌ی نمودارگیری تولید نشان می‌دهد بعد از اسیدکاری ماتریسی، فشار ته چاهی^۲ (BHP) / گرادیان فشاری در امتداد مقطع مخزن بهبود یافته است (شکل ۱۳).

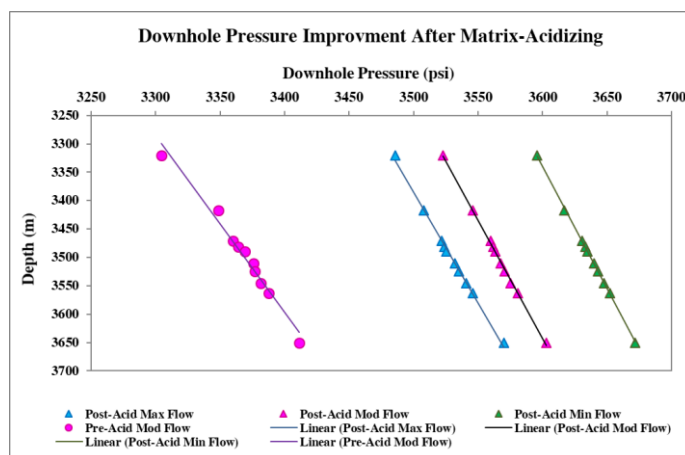
بعد از عملیات تحریک چاه، شاخص بهره‌دهی لایه ۳ حدود ۱۵ برابر افزایش یافت که مقدار بسیار قابل توجهی می‌باشد. اگرچه، این شاخص در دو لایه دیگر تقریباً دو برابر بهبود یافت (شکل ۱۲).

1-Stationary measurements
2- Bottom hole pressure



شکل ۱۲- تغییرات شاخص بهره‌دهی لایه‌های مخزنی حاصل از نتایج آنالیز SIP (قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه).

Fig. 12. Multi-layered Productivity Index (PI) from Selective Inflow Performance analysis (Before and after matrix-acidizing).



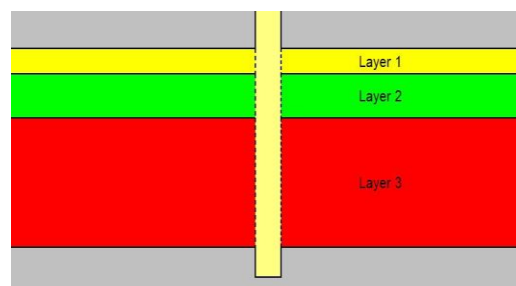
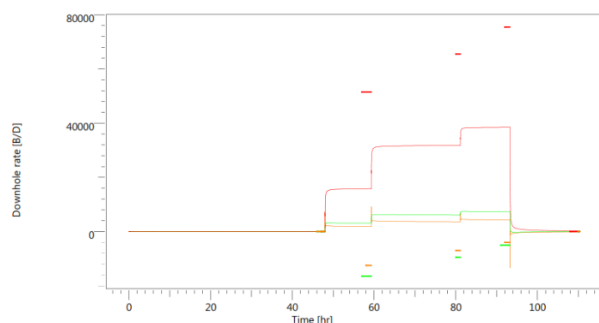
شکل ۱۳- بهبود فشار ته چاهی بر اساس نتایج اندازه‌گیری نقاط ایستا در طی حالت‌های جریان‌ی نمودارگیری تولید (قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه).

Fig. 13. The down hole pressure improvement based on Stationary measurement points from PLT in Flowing conditions (Before and after matrix-acidizing job).

لایه مخزنی به عنوان ورودی برای آنالیز تست فشار گذرا مورد استفاده قرار گرفت. اختلاف فشار بین لایه ۳ و دو لایه مخزنی دیگر (لایه ۱ و بخش ابتدای لایه ۲) باعث شد مدل مخزنی سه لایه برای آنالیز فشار گذرا در نظر گرفته شود (شکل ۱۴).

نتایج آنالیز فشار گذرا

همانطوریکه در نمودار تاریخچه تست قبل از عملیات اسیدکاری در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، دو تست انداخت فشار و یک تست ساخت فشار به منظور برداشت داده‌های PLT-PTA در چاه هدف ثبت گردید. سپس بعد از تفسیر نمودارهای تولید، دبی جریان‌ی و فشار متوسط هر کدام از سه



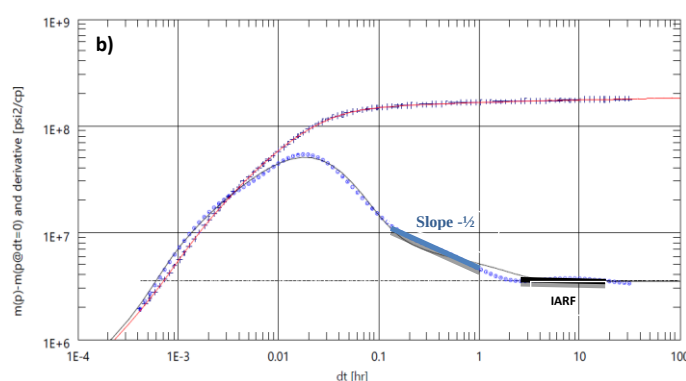
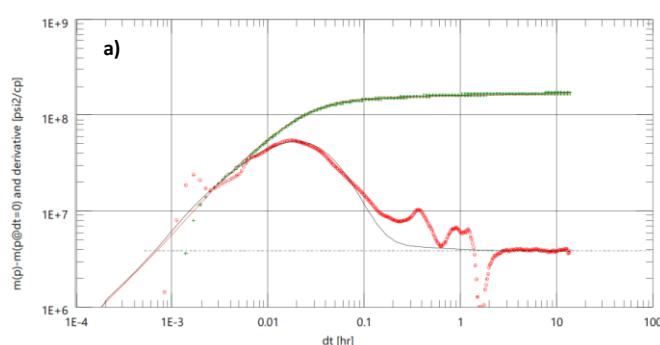
شکل ۱۴- دبی جریان‌ی درون‌چاهی (بشکه بر روز) برای مدل مخزن سه لایه^۱ در آنالیز تست فشار گذرا، Ecrin-Saphir.

Fig. 14. Downhole flow rates (B/D) for three-layer reservoir model in PTA, Ecrin-Saphir.

آنالیز تست فشار گذار بعد از اسیدکاری، جدایش بین نمودار افت فشار و مشتق افت فشار کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش ضریب پوسته کل بعد از انجام تحریک چاه است. بر اساس نتایج آنالیز چندلایه، ضریب پوسته برای پایین‌ترین لایه (لایه ۳) کاملاً منفی شد. به عبارت دیگر، عملیات اسیدکاری این لایه را بسیار بیشتر از سایر لایه‌های مخزن تحت تاثیر قرار داده است (شکل b۱۶). علاوه بر این، نتایج تحلیل چاه‌آزمایی در تلفیق با نتایج تفسیر نمودارهای تولید و آنالیز *SIP* نشان داد که بعد از اسیدکاری ماتریسی، فشار جریانیه ته‌چاهی (*BHFP*) لایه مذکور نیز بهبود بسیار خوبی داشته است.

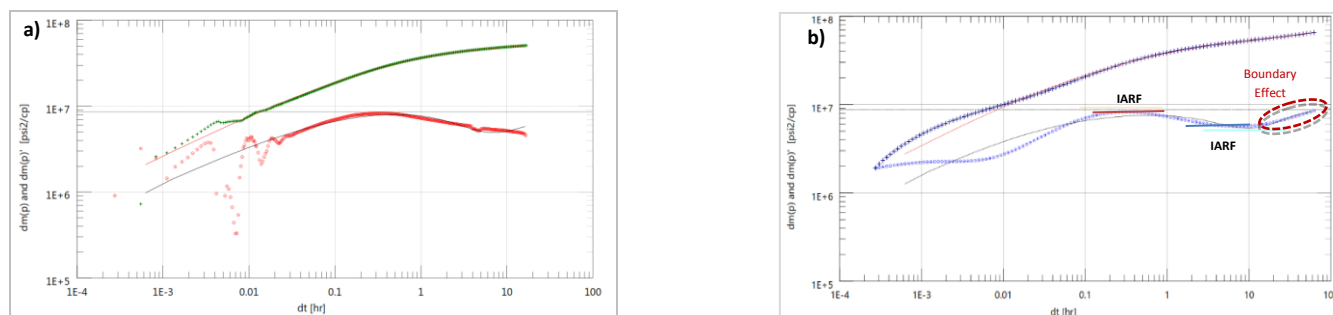
آنالیز دی‌کانولوشن داده‌های چاه‌آزمایی بعد از اسیدکاری باعث شد محدوده داده‌های در دسترس برای تفسیر از ۱۷ ساعت به ۶۲ ساعت افزایش پیدا کند (شکل b۱۶). در نتیجه اثر رژیم جریانی مرزی و دو جریان شعاعی با محصول *kh* و ضریب پوسته مختلف روی نمودارمشتق فشار دی‌کانوالو شده قابل مشاهده گردید. اگرچه موارد مذکور روی نمودار لگاریتمی مشتق فشار دیده نشد. شیب منفی $1/2$ که عمدتاً مربوط به نفوذ جزئی می‌شود روی هیچکدام از منحنی‌های مشتق فشار و مشتق فشار دی‌کانوالو شده مربوط به داده‌های چاه‌آزمایی بعد از اسیدکاری مشاهده نگردید. بنابراین، محرز گردید در زمان تکمیل چاه، تمامی زون‌های مخزنی دارای پتانسیل بالا به درستی مشبک‌کاری گردیده‌اند. مشاهده شیب منفی $1/2$ روی نمودارهای مشتق فشار قبل از اسیدکاری ناشی از اثر ضریب پوسته بالا است که می‌تواند عمدتاً بخاطر پدیده‌های ناشی از تولید، همانند مواد رادیواکتیو ایجادشده بصورت طبیعی (*NORM*) باشد. مقایسه بین پرتو گاما نمودارهای حفره باز و حفره بسته (نمودارهای پتروفیزیکی و نمودار تولید به ترتیب) وجود پدیده *NORM* را تایید نمود.

نمودار مشتق فشار نشان می‌دهد که داده‌های فشار تحت تاثیر توزیع فازی در چاه قرار گرفته‌اند (شکل a۱۵). علاوه بر این، آنومالی فشار روی نمودارهای مشتق فشار در حدود ۳۰ دقیقه از تست ساخت فشار دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از جریان متقاطع بین لایه‌ها باشد. همچنین بعد از ۵۰ و ۱۵۰ دقیقه از گذشت تست ساخت فشار، رژیم جریانی جریان شعاعی چندگانه (*IARF*) روی نمودار مشتق فشار دیده می‌شود که رفتار سیستم چند لایه را تایید می‌نماید. جدایش زیاد بین نمودارهای افت فشار و مشتق افت فشار بیانگر ضریب پوسته کل خیلی مثبت برای همه لایه‌ها می‌باشد، اگرچه بیشترین ضریب پوسته مربوط به لایه ۳ می‌شود. تکنیک دی‌کانولوشن نیز برای آنالیز فشار گذرا انجام شد که شعاع بررسی را افزایش داده و اطلاعات بیشتری را برای آنالیز فراهم نمود. در واقع، این رویکرد کل داده‌های تاریخچه فشار شامل دوره‌ها جریانی و بسته را به عنوان تولید در دبی ثابت در نظر می‌گیرد. بنابراین، محدوده داده‌ها را افزایش داده است بطوریکه طول مدت حدود ۱۴ ساعت تست ساخت فشار قبل از اسیدکاری، به ۳۱ ساعت افزایش یافت. در نتیجه دبی متغییر اصلاح شده و جریان کروی با شیب $1/2$ - در زمان‌های ابتدایی قابل مشاهده شد (شکل b۱۵). اثر شیب منفی $1/2$ روی منحنی مشتق فشار، نتایج نمودارهای تولید / ورود جزئی به داخل زون‌های مجزا را تایید نمود. قابل ذکر است که هر دو روش مشتق فشار و دی‌کانولوشن اثر انبارش چاه را نشان می‌دهند که در طی زمان‌های اولیه با خط راست شیب واحد روی نمودارهای لگاریتمی قابل مشاهده است. علاوه بر این، ضریب پوسته بالا نیز روی هر دو شکل نمودارهای لگاریتمی مشتق فشار و مشتق فشار دی‌کانوالو شده مشخص است. بطور کلی نتایج تحلیل داده‌های قبل از اسیدکاری شامل شاخص بهره‌دهی پایین و ضریب پوسته مثبت نشان داد که جهت بهبود عملکرد چاه، بایستی عملیات اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف اجرا شود. در



شکل ۱۵- آنالیز فشار گذرا قبل از اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف، (a) نمودار لگاریتمی فشار و مشتق فشار و (b) اثر جریان کروی با شیب منفی $1/2$ روی نمودار مشتق فشار دی‌کانوالو شده.

Fig. 15. Pre-acidizing PTA in well A: (a) The pressure and pressure derivative log-log plot, and (b) The boundary dominated effect on deconvolved derivative.

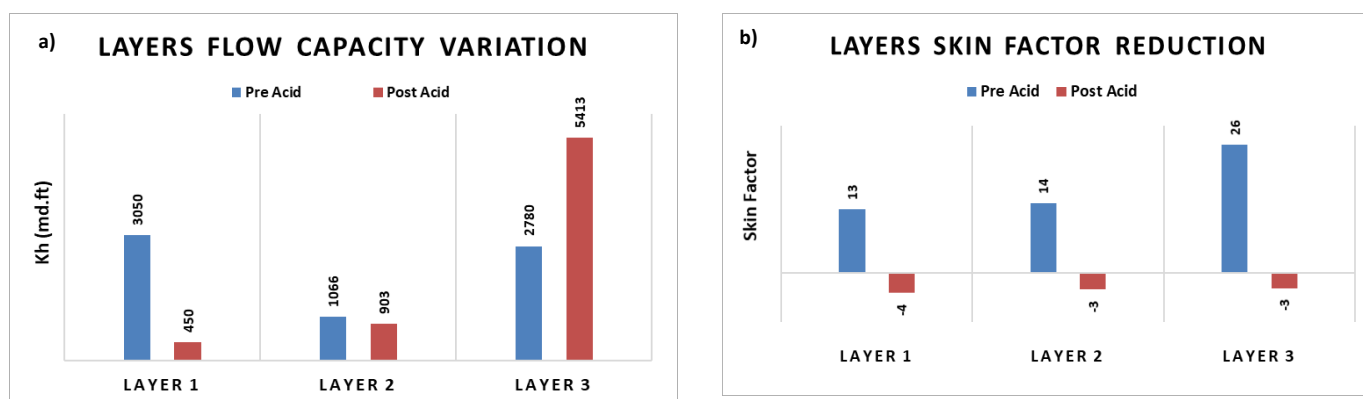


شکل ۱۶- آنالیز فشار گذرا از اسیدکاری ماتریسی در چاه هدف: (a) منحنی‌های افت فشار و مشتق افت فشار، (b) مشاهده دو جریان شعاعی روی نمودار مشتق فشار دی‌کانوالو شده.

Fig. 16. Post-acidizing PTA in well A: (a) The pressure and pressure derivative plot, and (b) Two radial composite zone on deconvolved derivative.

کل بعد از اسیدکاری ماتریسی چاه حدود ۲٫۹ برابر افزایش یافت. علاوه بر این، در دبی ثابت ۱۰۰ م.ف.م.ر. فشار جریان سرچاهی (WHFP) حدود ۶۲۳ پام افزایش پیدا کرد. بطور کلی، استفاده از انواع داده‌ها و روش‌های مختلف تحلیل اطلاعات این امکان را فراهم نمود به نتایج قابل اطمینان‌تری دست یابیم. اگرچه نتایج آنالیز فشار گذرا بعد از اسیدکاری به دلیل ناپدید شدن فشار جریان و نرخ جریان متقاطع زیاد بین لایه‌ها عدم قطعیت‌هایی در بر داشت.

بر اساس نتایج تحلیل اطلاعات قبل و بعد از اسیدکاری، شاخص بهره‌دهی و فشار جریانی چاه برای هر لایه مخزن به خوبی بهبود پیدا کرده است. با این وجود، پایین‌ترین لایه با داشتن بالاترین فشار متوسط مخزن به میزان قابل توجهی تحت تاثیر اسیدکاری قرار گرفته است. بعد از تحریک چاه، ضریب پوسته برای لایه مخزنی فشار بالا به شدت کاهش یافته و ظرفیت جریانی (محصول kh) آن بهبود بسیار خوبی یافته است (شکل ۱۷).



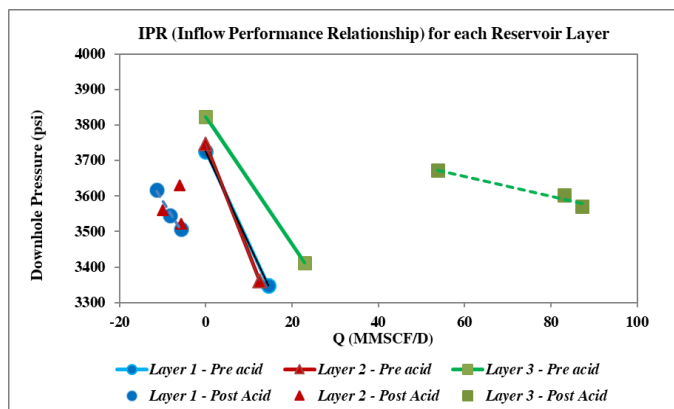
شکل ۱۷- ظرفیت جریانی (a) و ضریب پوسته (b) لایه‌های مخزنی مختلف (قبل و بعد از عملیات اسیدکاری).

Fig. 17. The kh product and skin factor effect results for different reservoir layers, before and after matrix-acidizing job.

پایین‌ترین لایه در مقایسه با دو لایه دیگر، بسیار بیشتر تحت تاثیر تحریک چاه قرار گرفته است. علاوه بر این، دبی منفی لایه ۱ و ۲ بیانگر اثر جریان متقاطع در این دو لایه است که فشار مخزنی پایین‌تری نسبت به لایه ۳ دارند.

آنالیز SIP

نمودار عملکرد مخزن (IPR) برای هر لایه، با استفاده از آنالیز SIP قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی محاسبه گردید (شکل ۱۸). فشار جریانی ته‌چاهی و سهم مشارکت دبی هر کدام از لایه‌های مخزنی از نتایج تفسیر نمودارهای تولید بدست آمد. نتایج SIP نشان داد که



شکل ۱۸- نمودار عملکرد مخزن برای لایه‌های مختلف، نتایج آنالیز SIP قبل و بعد از اسیدکاری ماتریسی.

Fig. 18. Multi-layered IPR using Selective Inflow Performance analysis (before and after matrix-acidizing job).

نتیجه‌گیری

این نتایج بیانگر این است که عملکرد چاه در اثر عملیات اسیدکاری بطور موفقیت‌آمیزی افزایش یافته است.

عملیات تحریک چاه باعث بهبود چشمگیر شاخص بهره‌دهی کل گردیده است. اگرچه لایه ۳ با بالاترین فشار، بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته است.

به احتمال زیاد کمبود کنترل اسید نیز روی جریان متقاطع تاثیرگذار بوده است که توسط نمودارهای تولید بعد از اسیدکاری تایید گردید. بنابراین، اسیدکاری لایه به لایه^۲ می‌تواند روش مناسب‌تری برای تحریک چاه در این نوع مخازن باشد.

ارزیابی عملیات اسیدکاری در یک مخزن کربناته چندلایه با استفاده از ترکیب نتایج تفسیر نمودارهای تولید، آنالیز SIP، آنالیز تست فشار گذرا بطور همزمان، به دلیل جلوگیری از انجام چاه‌آزمایی تک‌لایه جهت محاسبه پارامترهای هر لایه بصورت مجزا، باعث صرفه‌جویی هزینه و زمان بسیار زیادی گردید.

تلفیق انواع مختلف داده‌های برداشت شده برای تفسیر، کمک کرد یافته‌های قطعی‌تری بدست آید. پیشنهاد می‌گردد برای رفع یکنواخت اثر پوسته یا تخلیه یکنواخت زون‌ها، انحراف مواد شیمیایی/اسیدکاری بطور موثرتری اجرا شود. همچنین نتایج حاکی از این است که طراحی و اجرای عملیات تحریک چاه در چاه‌های مشابه بایستی بهینه‌سازی گردد.

نتایج نشان می‌دهد طراحی‌های اسیدکاری چاه‌های مشابه/آتی، بایستی از نقطه نظر منحرف‌کننده‌ها و کاربرد ژل‌ها^۳ بهبود پیدا کند. بطوریکه لایه‌های کم‌عمق‌تر نیز بیشتر تحت تاثیر قرار گیرند و مشارکت بهتری در تولید پیدا کنند. حل این مسئله / هدایت بهینه اسید و از بین بردن یکنواخت اثر پوسته در تک‌تک لایه‌های مخزن، می‌تواند درس‌آموخته بسیار ارزشمندی محسوب گردد.

در این مطالعه، یک روش جدید و مقرون به صرفه برای بررسی میزان کارایی عملیات اسیدکاری ماتریسی در تک‌تک لایه‌های مخزنی یک چاه انحرافی عمیق در یک گاز میعانی کربناته با استفاده از ترکیب نتایج آزمایشات سرچاهی، تحلیل چاه‌آزمایی و تفسیر نمودارهای تولید معرفی گردیده است. در واقع این ارزیابی بدون اجرای آزمایشات ساق مته تک‌لایه^۱ و صرف هزینه‌های سنگین ناشی از آن، مخصوصاً در مخزن فراساحلی مورد مطالعه، با بکارگیری تحلیل کلیه داده‌های برداشت شده قبل و بعد از عملیات اسیدکاری در چاه هدف انجام شده است. داده‌های چاه‌آزمایی علاوه بر روش مشتق فشار، با روش دی‌کانولوشن نیز آنالیز گردیدند که این مهم نیز تاکنون به صورت کاربردی در تحلیل چاه-آزمایی این مخزن، مورد استفاده قرار نگرفته بود. اهم نتایج بدست آمده از این مطالعه به صورت ذیل می‌باشد:

○ بعد از تحریک چاه، جریان متقاطع در تمام حالت‌های جریانی و حالت استاتیک نمودارگیری تولید مشاهده گردید بطوریکه بخش عمده تولید مربوط به پایین‌ترین لایه مخزن با بالاترین مقدار فشار ته‌چاهی اختصاص داشت. دو لایه دیگر به عنوان زون دزد مشارکت نمودند.

○ در بین مزایای روش دی‌کانولوشن، مشتق فشار دی‌کانوالو شده محدوده بیشتری از اطلاعات را برای تفسیر فراهم نمود و زمان آزمایشات ساخت فشار قبل و بعد از اسیدکاری حدود ۱۴ و ۱۷ ساعت بود که به ترتیب به ۳۱ و ۶۲ ساعت افزایش یافت.

○ بعد از عملیات اسیدکاری ماتریسی، فشار جریانی سرچاهی حدود ۶۲۳ پام در دبی ثابت ۱۰۰ م.ف.م.ر بهبود یافت. شاخص بهره-دهی کل حدود سه برابر، شاخص بهره‌دهی پایین‌ترین لایه حدود ۱۵ برابر و برای دو لایه دیگر حدود ۲.۸ برابر افزایش پیدا کرد.

2- Isolated acidizing

3- Diverters and gels application

1- Single layer Drill Stem Test (DST)

منابع

- Abou-Sayed, I.S., Shuchart, C.E., Gong, M., 2005. Well stimulation technology for thick carbonate reservoirs. International Petroleum Technology Conference IPTC-10647-MS.
- Curtis, C., Jacques, M., Ron, T., 1992. Trends in matrix acidizing. Schlumberger Oilfield Review.
- Geravand, R., Foroozesh, J., Nakhaee, A., Abbasi, M., 2020. Integrated reservoir study using well-test deconvolution analysis and well-logging data in a gas condensate carbonate reservoir. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering 863(1), p. 012009.
- Gringarten, A.C., 2008. From straight lines to deconvolution: The evolution of the state of the art in well test analysis. SPE Reservoir Evaluation and Engineering 11(01), 41-62.
- Gringarten, A.C., 2010. Practical use of well test deconvolution, SPE Annual Technical Conference and Exhibition SPE-134534-MS.
- Guo, B., Lyons, W.C., Ghalambor, A., 2007. Petroleum Production Engineering; A Computer-Assisted Approach. Gulf Professional Publishing. p. 247.
- Hong-Wei, S., Guo-Feng, Y., 2016. Multiple Flow Rate Well Testing with Production Logging in Determining Production Formation Dynamics Parameter. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 24(21), 7629-7639.
- Huner, K.H., Pshtiwan, T.M.J., 2018. Matrix Acidizing of Carbonate Formations: A Case Study. International Journal of Engineering and Techniques 4(2), 851-858.
- ILK, D., Valko, P.P., Blasingame, T.A., 2005. Deconvolution of Variable Rate Reservoir Performance Data Using B-Splines. MSc. Dissertation. Texas A&M University, Texas.
- Kappa, 2015. Ecrin 4.30. Deconvolution process, Software Tutorial, France.
- Levitan, M., 2005. Practical Application of Pressure/Rate Deconvolution to Analysis of Real Well Tests. SPE Annual Technical Conference and Exhibition SPE-84290-PA 8(2), 113-121.
- Liu, W., Liu, Y., Han, G., Zhang, J., Wan, Y., 2017. An improved deconvolution algorithm using B-splines for well-test data analysis in petroleum engineering. Journal of Petroleum Science and Engineering 149, 306-314.
- Onur, M., Cinar, M., ILK, D., Valko, P.P., Blasingame, T.A., Hegeman, P.S., 2008. An investigation of recent deconvolution methods for well-test data analysis. SPE Journal 13(2), 226-247.
- Poe Jr, B.D., 2006. Production optimization methodology for multilayer commingled reservoirs using commingled reservoir production performance data and production logging information. U.S. patent 7,062,420.
- Shuchart, C. E., Jackson, S., Mendez-Santiago, J., Choi, N. H., Montgomery, J. K., Khemakhem, A. S., Wang, Z., 2009. Effective Stimulation of Very Thick, Layered Carbonate Reservoirs Without the Use of Mechanical Isolation. International Petroleum Technology Conference 13621-MS.
- Von Schroeter, T., Hollaender, F., Gringarten, A.C., 2002. Analysis of well test data from permanent downhole gauges by deconvolution. SPE Annual Technical Conference and Exhibition SPE-77688-MS.
- Ziauddin, M., Robert, J., 2003. Method of optimizing the design, stimulation and evaluation of matrix treatment in a reservoir. U.S. Patent No. 6,668,922.

