

(تاریخ دریافت ۸۴/۱/۳۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۵/۶/۱۱، تاریخ تصویب ۸۵/۱۰/۳۰)

با توجه به اطلاعات دبی چاه بر حسب زمان می توان اطلاعاتی در مورد تولید چاه در آینده و ویژگیهای مخزن بدست آورد. با حل تحلیلی معادله جریان در محیط متخلخل و یک سری معادلات تجربی منحنی های دقیقی ارائه شده که با استفاده از آنها علاوه بر پیش بینی تولید میتوان برخی از خواص مخزن از جمله نفوذپذیری، ضریب آسیب چاه، مساحت تخلیه چاه و نفت درجا مخزن را بدست آورد. نمودارهای افت دبی مخازن کربناته که از حل تحلیلی بدست آمده در خیلی از موارد از روند کاهش دبی مخازن کربناته واقعی پیروی نمیکند. برای بررسی این موضوع در این مقاله در ابتدا با استفاده از یک نرم افزار شبیه سازی یک مخزن ناهمگون (شکافدار) مدل سازی شد و نشان داده شد با استفاده از نمودارهای Fetkovich که برای مخازن همگون ارائه شده است می توان تخمین خوبی از نفوذ پذیری مخازن واقعی و غیر همگن بدست آورد. همچنین با استفاده از داده های واقعی یک مخزن کربناته ایران، نفوذ پذیری مخزن تعیین شد و نتایج آن با نتایج چاه آزمایشی مقایسه گردید و نشان داده شد روش Fetkovich برای مخازن کربناته واقعی هم کاربرد دارد.

واژه های کلیدی: نمودارهای افت دبی - نمودار الگو - مخازن شکافدار - مخازن شکافدار - نمودار الگو
Fetkovich - خواص مخزن - تراوایی

نمودارها علاوه بر تعیین ذخیره مخزن میتوان برخی از خواص مخزن و نفت درجا مخزن را نیز بدست آورد. روشی که توسط Fetkovich ارائه شد یک روش تئوری است که از حل تحلیلی معادلات جریان در محیط متخلخل بدست آمد. بنابراین برای استفاده از این روش چاه تولیدی و مخزن باید در شرایط خاصی باشند. از جمله اینکه فشار ته چاه ثابت باشد و روی چاه عملیات اسید کاری صورت نگرفته باشد همچنین چاه در آن مدت نباید بسته شده باشد و مخزن باید همگن باشد و آبده نداشته باشد.

از طرف دیگر معادلات جریان در مخازن ناهمگون کاملاً متفاوت از مخازن همگن است و نمودارهای افت دبی آنها نیز متفاوت است. بنابراین این سوال که آیا میتوان از نمودارهای Fetkovich برای مخازن ناهمگونی مانند مخازن کربناته و شکافدار استفاده کرد موضوع این مقاله می باشد.

همچنین با توجه به شرایط بیان شده برای استفاده از نمودارهای افت دبی و اینکه به یقین می توان گفت هیچ

با توجه به اطلاعات دبی یک چاه بر حسب زمان اطلاعات بسیار مفیدی می توان در مورد تولید چاه در آینده و ویژگیهای مخزن بدست آورد [۱،۲،۵،۸،۱۴]. از اطلاعات دبی یک چاه قبلاً فقط برای پیش بینی دبی آینده چاه استفاده می شد به این نحو که نمودار لگاریتم دبی بر حسب زمان را رسم می کردند و از آن خط راست عبور می دادند. بعدها با حل تحلیلی معادله جریان (نفوذ) در محیط متخلخل و یک سری معادلات تجربی منحنی های دقیق تری ارائه شد که با استفاده از آنها علاوه بر پیش بینی تولید می توان برخی از خواص مخزن از جمله نفوذپذیری، ضریب آسیب چاه، مساحت تخلیه چاه و نفت درجا مخزن را بدست آورد. در سال ۱۹۷۶، Fetkovich [۲] نمودارهای افت دبی را با استفاده از حل تحلیلی معادله جریان بدست آورد. وی با استفاده از ترکیب معادلات افت دبی Arps [۱] و معادلات تحلیلی یک سری نمودار الگو جدید ارائه داد. ویژگی این نمودارها این است که دوره های گذرا و شبه پایدار عمر مخزن در این نمودارها نشان داده شده است. همچنین با استفاده از این

مخزنی را نمی توان یافت که تمام این شرایط را با هم داشته باشد. بنا براین این سوال مطرح می شود که آیا نمودارهای افت دبی از لحاظ عملی واقعاً کاربرد دارند؟ برای پاسخ به سوال اول و همچنین جهت اطمینان از نتایج بدست آمده از تحلیل نمودارهای افت دبی، ابتدا یک مدل مخزن شکافدار که مصداق یک مخزن غیر همگن است، ساخته شد و سپس چند چاه بر روی آن در نظر گرفته شد و از چاهها در فشار ثابت تولید شد. منحنی های افت دبی برای این مخزن فرضی که اغلب اطلاعات آن از یک مخزن واقعی گرفته شده بود مورد بررسی قرار گرفت و با نمودارهای Fetkovich مقایسه گردید.

همچنین جهت پاسخ به سوال دوم، از داده های واقعی میدان چشمه خوش که یک مخزن کربناته با خواص بسیار غیر یکنواخت است استفاده گردید و بررسی شد که نمودارهای افت دبی تا چه میزان کاربرد دارند.

همانگونه که بیان شد تعیین خواص مخازن ناهمگن (شکافدار) با استفاده از نمودارهای افت دبی که از حل تحلیلی معادله جریان بدست آمده به دو دلیل راه گشا نمی باشد. اول اینکه نمودارهای الگو اینگونه مخازن به دلیل مجهول بودن پارامترهایی که از مشخصه های ناهمگنی مخزن است (از جمله $\bar{\alpha}$ و ω)، بسیار زیاد است. و دوم اینکه در بسیاری از موارد روندی که از حل معادلات پیش بینی شده است در عمل در مخازن واقعی و کربناته مشاهده نمی شود. بلکه نمودار افت دبی آنها شبیه مخازن همگن است. بنابراین این ایده مطرح است که بتوان از همان روشهایی که برای بدست آوردن ویژگیهای مخازن همگن استفاده شد بهره برد. از آنجاییکه اطلاعات نمودارهای افت دبی با فرض ثابت بودن فشار ته چاه برای مخازن به ندرت وجود دارد جهت به وجود آوردن این نمودارها با استفاده از نرم افزار IMEX [6] یک مدل غیر همگن (تخلخل دوگانه) ساخته شد و سپس چند چاه بر روی آن در نظر گرفته شد و از چاهها در فشار ثابت تولید شد. تمام شرایط و اطلاعات در این مدل به نحوی در نظر گرفته شده است تا به مخزن واقعی نزدیک باشد.

در این مدل، مخزن به صورت مکعب مستطیل در نظر گرفته شد. که طول و عرض آن 15000 ft و ضخامت آن

400ft فرض گردید. این مدل در جهت x و y به 30 گرید و در جهت z به 3 لایه تقسیم بندی شد. نفوذ پذیری شکاف و ماتریس در جهت افقی در این مدل به ترتیب برابر 20 md و 0.206 md و در جهت قائم 2 و 0.206 میلی داری در نظر گرفته شد. همچنین عرض شکاف (Fracture Spacing) در جهت x و y به ترتیب برابر 10 ft و در جهت z برابر 5 ft فرض شد. فشار اولیه مخزن 4640 psi و فشار حباب اولیه آن 1000 psi فرض شده است. همچنین آب همزاد مخزن برابر 0.1 است.

چاه شماره 1 در گرید $k=1$: $j=4$: $i=4$ و از عمق 3317 ft تا 3416.79 ft تکمیل شد و با فشار ثابت 1000 psi تولید میکند. در حالیکه چاه شماره 2 در گرید $k=2$: $j=10$: $i=25$ و از عمق 3480 ft تا 3574ft تکمیل شد و با فشار ثابت 2000 psi تولید میکند و بالاخره چاه شماره 3 در گرید $k=3$: $j=14$: $i=19$ و از عمق 3627 ft تا 3707 ft تکمیل شد و با فشار ثابت 500 psi تولید میکند و ضریب پوسته آن برابر 5 فرض گردیده است.

تولید از چاهها به مدت 5 سال انجام گردیده است. حال با استفاده از نمودار الگو Fetkovich به تحلیل داده های دبی بر حسب زمان پرداخته میشود.

در ابتدا نمودار دبی بر حسب زمان را برای چاههای مختلف در مقیاس Log-Log رسم می کنیم. سپس داده هایی که مربوط به دوره گذرا می باشد را تعیین می کنیم به این صورت که : تا زمانی که تقعر نمودار به سمت بالا است داده ها مربوط به دوره گذرا می باشد و از آن به بعد دوره تخلیه مخزن شروع می شود. سپس با استفاده از روش انطباق نموداری¹ و معادله (1) و (2)، نفوذپذیری مخزن و ضریب آسیب چاه را تعیین می کنیم.

$$k = \frac{141.2\mu B_o}{(p_i - p_{wf})h} \times \left(\frac{q}{q_{Dd}}\right)_{MP} \times [Ln(r_{eD}) - 3/4] \quad (1)$$

که μ ویسکوزیته نفت (cp)، B_o ضریب حجمی سازند (resbbl/STB)، p_i فشار اولیه مخزن (psi)، p_{wf} فشار جریانی ته چاه، h ضخامت سازند، k نفوذ پذیری مخزن (md)، q دبی تولیدی (STB/day)، q_{Dd} دبی بی بعد و r_{eD} شعاع بی بعد است.

دادهای تولید چاه شماره 1 نشان می دهد که از تاریخ 1990/12/31 تا 1991/2/28 دوره گذرا بوده.

۷ به ترتیب روزانه حدوداً ۱۷۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۱۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ بشکه تولید میکنند. نتایج زمین شناسی پتروفیزیکی بیانگر ناهمگونی شدید در مخزن چشمه خوش است که بیشتر از جنس کربناته و قسمتهایی از آن ماسه ای می باشد. همچنین این مخزن دارای آبد است.

هر چند این مخزن شرایطی را که برای استفاده از نمودارهای افت دبی ذکر شد را ندارد اما نشان داده میشود که با استفاده از دوره هایی که دبی چاه کاهش می یابد میتوان تخمین مناسبی برای تراوایی مخزن بدست آورد. بنابراین ابتدا باید برای هر چاه بازه زمانی که در آن دبی کاهش یافته تعیین شود. سپس داده هایی را که از محدوده خارج است را حذف کرده و سعی میشود داده ها بصورت صاف^۲ درآیند. همچنین تمام زمانها را از زمان ابتدایی که دبی شروع به کاهش کرده را کم کنیم و نمودار دبی بر حسب زمان را در کاغذ Log-Log رسم میگرد و با استفاده از نمودار الگو Fetkovich پارامتر kh بدست می آید. برای محاسبه kh نیاز به معلوم بودن P_i ، P_{wf} ، μ و B_o میباشد. که عبارت است از فشاراستاتیک مخزن در زمانی که دبی چاه مربوطه شروع به کاهش کرده است. همچنین P_{wf} فشار ته چاه است ولی از آنجاییکه فشار ته چاه ثابت نمی باشد باید از آن میانگین گرفت. هر دو پارامتر را با استفاده از نمودار فشار هر چاه بر حسب تولید تجمعی بدست می آوریم. پارامترهای μ و B_o را در فشار میانگین P_i و P_{wf} محاسبه میشود.

تحلیل دبی چاه شماره ۲ به شرح ذیل است:

الف - چاه ۲

شکل (۱) نمودار دبی- زمان این چاه را از تاریخ ۱۳۶۹/۲ تا ۱۳۷۳/۸ نشان میدهد. همچنین شکل (۲) نمودار منطبق شده این چاه را با نمودار الگو نشان می دهد.

تولید تجمعی در تاریخ ۱۳۶۹/۲ = 7 MMSTB

تولید تجمعی در تاریخ ۱۳۷۳/۸ = 27 MMSTB

فشار در تاریخ ۱۳۶۹/۲ = 5550 psi

فشار در تاریخ ۱۳۷۳/۸ = 5420 psi

$B_o = 1.385 RB / STB$ و $\mu = 0.6 cp$

$P_{wf} = 5485 psi$ و $P_i = 5550 psi$

نتایج حاصل از این انطباق به صورت زیر است :

$$q_{MP} = 38104 \text{ STB/Day } r_{eD} = 1E + 005$$

$$t_{MP} = 1.712 \text{ Day}, (q_{Dd})_{MP} = 1.166$$

$$(t_{Dd})_{MP} = 0.000776$$

اطلاعات خواص سیال (B_o و μ_o) را در فشار میانگین که متوسط فشار ته چاه و فشار اولیه می باشد مورد استفاده قرار می گیرد زیرا μ و B_o وابستگی شدید به فشار دارند.

$$\mu @ 2820 \text{ psi} = 0.1163$$

$$C_i = 1.54E - 5 \quad B_o @ 2820 \text{ psi} = 1.3434$$

بنا بر این با استفاده از معادله (۱) و (۲) $k = 21.3 \text{ md}$ بدست می آید. همچنین نتایج تراوایی برای چاه ۲ و ۳ به ترتیب $k = 16.5 \text{ md}$ و $k = 25.13 \text{ md}$ محاسبه شد.

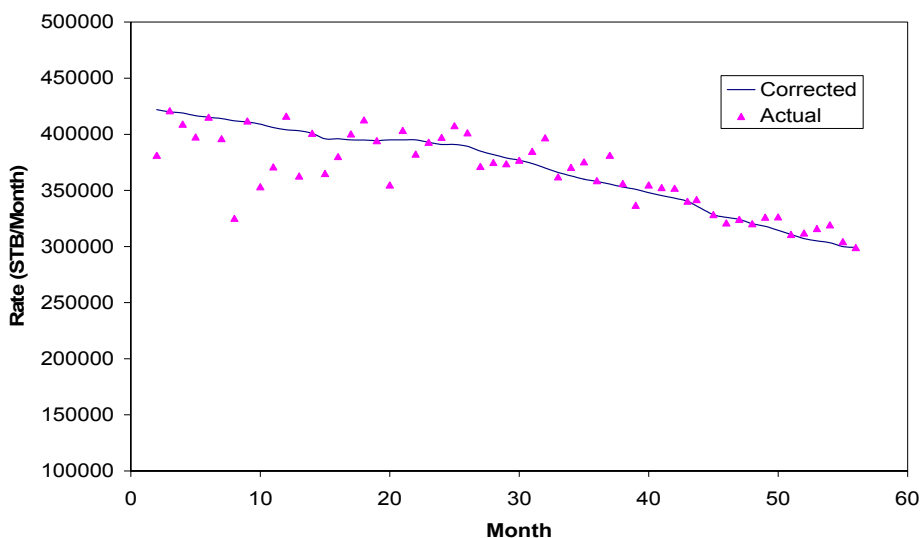
با مقایسه نتایج تراوایی بدست آمده از سه چاه می توان دریافت با وجود کم بودن تعداد داده ها در دوره گذرا، استفاده از نمودار Fetkovich برای مخازن شکافدار تخمین خوبی از میزان نفوذ پذیری مخزن که در مدل برابر ۲۰ میلی داری فرض شد می دهد. به طوریکه میانگین نتایج تراوایی سه چاه (۲۱ میلی داری) تخمین بسیا خوبی از تراوایی مخزن است.

نتایج حاصل از تحلیل دادههای تولید در دوره گذرا به شرح زیر است :

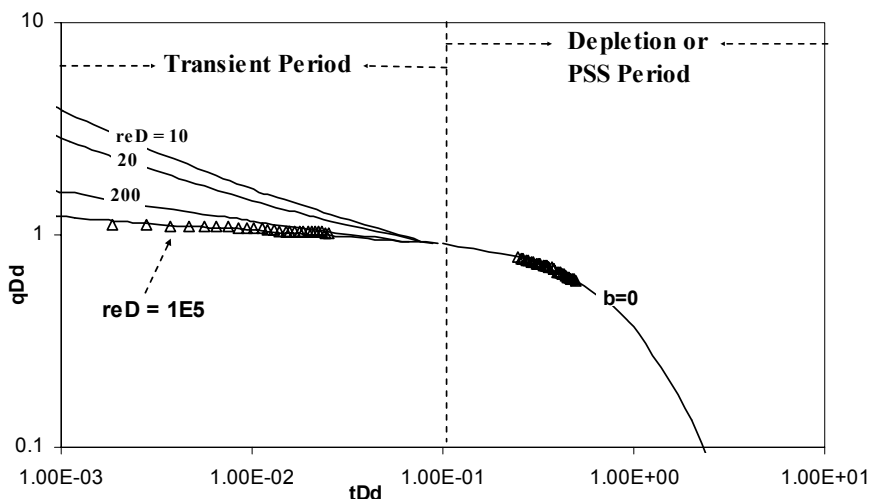
- در مجموع می توان گفت نفوذ پذیری بدست آمده از این روش در صورت انطباق مناسب با نمودار الگو قابل اعتماد است.

- در فرمول محاسبه k پارامترهای خواص سیال (B_o و μ_o) دخیل هستند که این دو پارامتر وابستگی شدید به فشار دارد. بنابراین محاسبه k نسبت به پارامترهای B_o و μ_o بسیار حساس است. بنابراین بهتر است که خواص سیال را در فشار میانگین (میانگین فشار ته چاه و فشار اولیه) در معادله (۱) قرار دهیم.

مخزن چشمه خوش یکی از مخازن غربی ایران است که تاکنون ۷ حلقه چاه در این میدان حفاری شده که چاه شماره ۱ و ۴ و ۳ تولید ندارند. چاه شماره ۲، ۵، ۶ و



.(/ /) :



. :

ب - چاه ۵

شکل (۳) نمودار دبی-زمان چاه ۵ و شکل (۴) نمودار منطبق شده این چاه را با نمودار الگو نشان می دهد. نتایج بدست آمده از این چاه به صورت زیر است :

تولید انباشتی در $1369/1 = 6 \text{ MMSTB}$

تولید انباشتی در $1372/12 = 25 \text{ MMSTB}$

فشار در $1369/1 = 5550 \text{ psi}$

فشار در $1372/12 = 5415 \text{ psi}$

$P_i = 5550 \text{ psi}$ $B_o = 1.385 \text{ RB/STB}$ و $\mu = 1.1 \text{ cp}$

و $P_{wf} = 5482 \text{ psi}$

نتایج انطباق دوره گذرا چاه ۵ با نمودار الگو به شرح ذیل است :

نتایج حاصل از انطباق نمودار دبی این چاه با نمودار الگو در دوره گذرا به شرح ذیل است :

$$q_{MP} = 422000 \text{ STB/ Month } r_{eD} = 1E + 005$$

$$t_{MP} = 2 \text{ Month } \cdot (q_{Dd})_{MP} = 1.113$$

$$(t_{Dd})_{MP} = 0.00186$$

$$kh = \frac{141.2 \times 0.6 \times 1.385}{5550 - 5485} \times (422000/1.113) \times (\ln(1E + 5) - 0.75) / 30.4$$

$$kh = 242324 \text{ md-ft}$$

درصد است. هر چند چاههای این میدان شرایطی که برای استفاده از نمودارهای کاهش دبی بیان شد را ندارند اما با استفاده از نمودارهای الگو Fetkovich تقریب خوبی از پارامتر kh مخزن بدست آوردیم.

$$q_{MP} = 495596 \text{ STB / Month} \cdot r_{eD} = 1000$$

$$t_{MP} = 3 \text{ Month} \cdot (q_{Dd})_{MP} = 1.48$$

$$(t_{Dd})_{MP} = 0.0005$$

$$kh = 213712 \text{ md - ft}$$

ج - چاه ۶

همچنین شکل (۵) نمودار دبی-زمان چاه ۶ و شکل (۶) نمودار منطبق شده این چاه را با نمودار الگو نشان می دهد. نتایج بدست آمده از این چاه به صورت زیر است :

تاریخ ۱۳۶۸/۱۱ تا ۱۳۷۳/۱۰ نشان میدهد.

تولید انباشتی در ۱۳۶۸/۱۱ = 2 MMSTB

تولید انباشتی در ۱۳۷۳/۱۰ = 20 MMSTB

فشار در ۱۳۶۸/۱۱ = 5640 psi

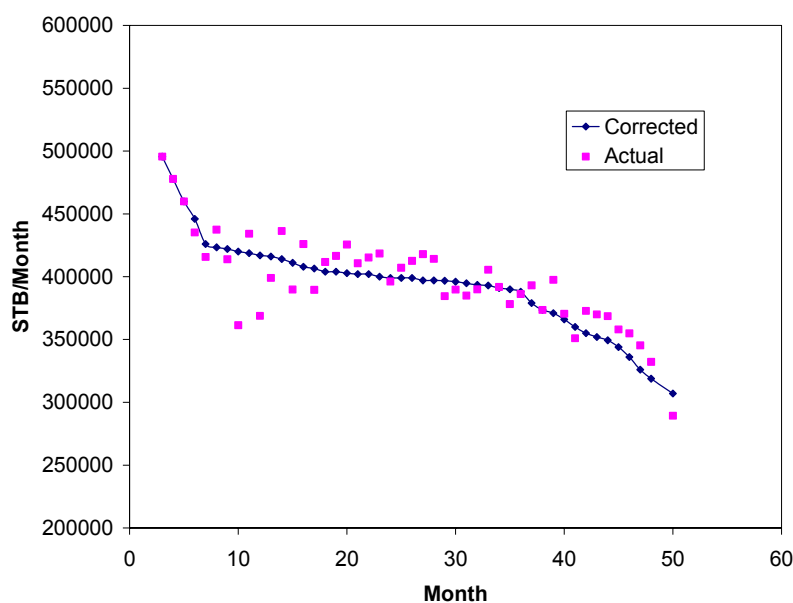
فشار در ۱۳۷۳/۱۰ = 5470 psi

$P_i = 5640 \text{ psi}$ $B_o = 1.33 \text{ RB / STB}$ و $\mu = 0.63 \text{ cp}$

$P_{wf} = 5555 \text{ psi}$ و

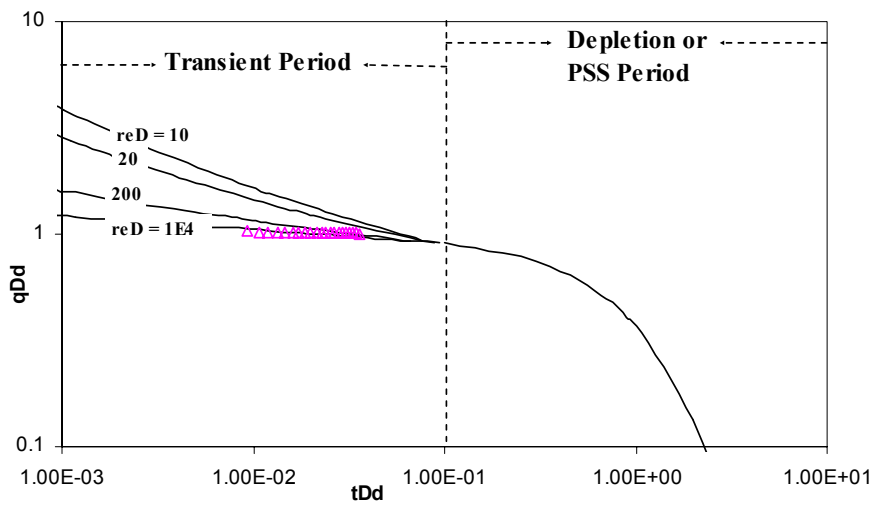
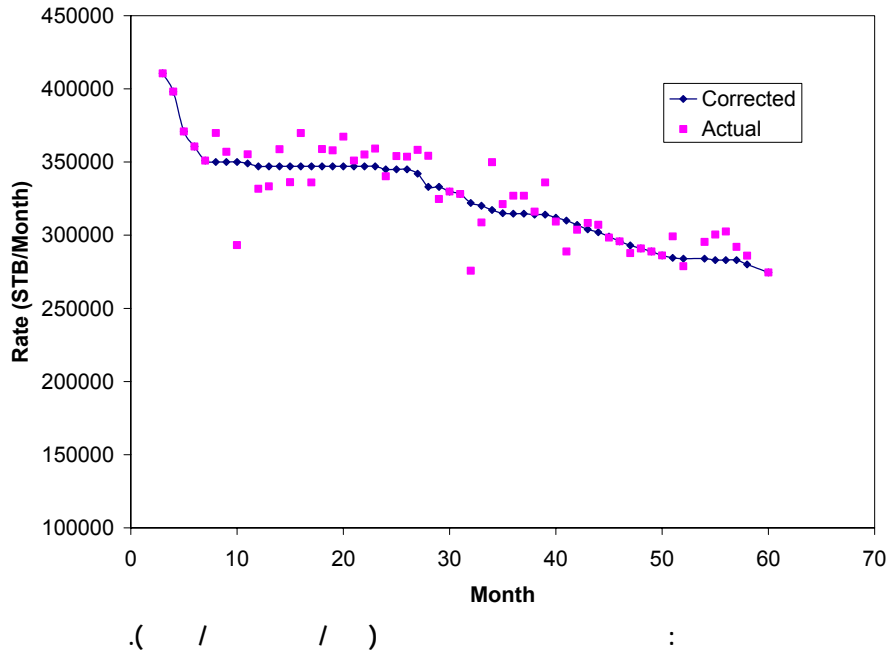
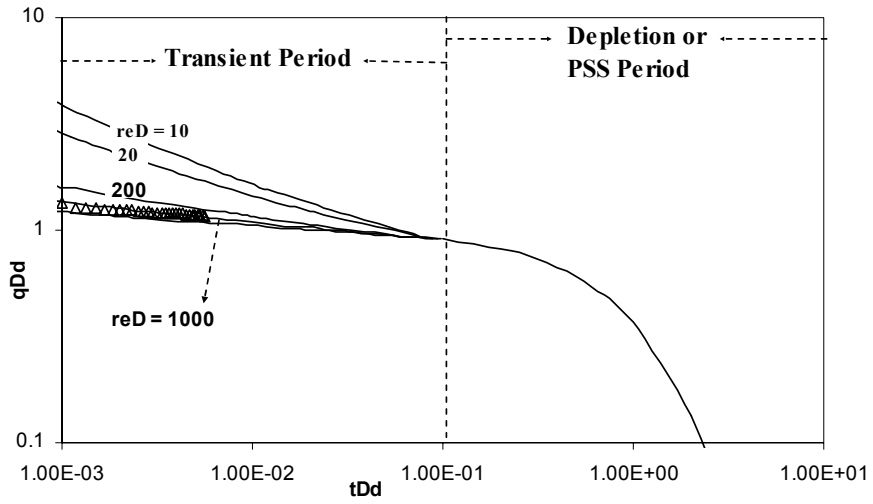
$$kh = 168166 \text{ md - ft}$$

جدول (۱) نشان دهنده مقایسه نتایج چاه آزمایشی و تحلیل افت دبی است. همانطور که در جدول مشاهده می شود در صد خطا چاه شماره ۲ برابر ۰/۰۳ درصد، خطای چاه های شماره ۵ و ۶ به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۲



(/ /) .

:



Well.No	PI Test	Decline Curve Analysis	Error%
	kh (md-ft)		
W2	242250	242324	0.030547
W5	213000	213712	0.334272
W6	168126	168166	0.023792

$$r_{eD} = \frac{r_e}{r_w} = \text{شعاع بی بعد مخزن}$$

$$r_w = \text{شعاع دهانه چاه، ft}$$

$$r_e = \text{شعاع تخلیه چاه، ft}$$

$$t = \text{زمان، Day}$$

$$t_D = \frac{0.00633k}{\phi\mu C_t r_w^2} t = \text{زمان بی بعد}$$

$$t_{Dd} = D_i \times t = \text{زمان بی بعد که Fetkovich}$$

$$\phi = \text{درصد تخلخل مخزن}$$

$$\mu = \text{ویسکوزیته سیال مخزن، cp}$$

$$B_o = \text{ضریب حجمی سازند، res bbl/STB}$$

$$D = -(\Delta q / q) / \Delta t = \text{نرخ کاهش دبی، Day}^{-1}$$

$$D_i = \text{نرخ کاهش دبی اولیه، Day}^{-1}$$

$$h = \text{ضخامت مخزن، ft}$$

$$k = \text{نفوذ پذیری مخزن، md}$$

$$p_i = \text{فشار اولیه مخزن، psi}$$

$$p_{wf} = \text{فشار جریانیه ته چاه، psi}$$

$$q_{Dd} = \frac{q(t)}{q_i} = \text{دبی بی بعد که توسط Fetkovich تعریف شد}$$

- 1 - Arps, (1940). "Analysis of decline curve." *Trans., AIME*, Vol. 160, PP.228-247.
- 2 - Fetkovich, M. J. (1980). "Decline curve analysis using type curve." *J. Pet. Tech.*, PP.1065-1077.
- 3 - Slider, H. C. (1983). *World Wide Practical Petroleum Reservoir Engineering Methods*.
- 4 - Ehlig-Economides, C. A. (1976). *Well Test Analysis For Wells Produced at a Constant Pressure*, PhD dissertation, Stanford U., Stanford, CA.
- 5 - Noel D. Rietman, (1996). "Determining permeability, skin effect and drainage area from the inverted decline curve (IDC)." *Maxus Energy Corporation*, SPE 29464.
- 6 - *Computer Modeling Group (CMG) Software*, Version 2002.
- 7 - Blasingame, T. A. and Lee, W. J. (1986). *Properties of Homogeneous Reservoirs, Naturally Fractured Reservoirs, and Hydraulically Fractured Reservoirs From Decline Curve Analysis*, Texas A&M U, SPE15018.
- 8 - Da Prat, G. and Hebert, C. L. (1981). *Decline Curve Analysis Using Type Curve for Two-Porosity Systems*, SPEJ (354-362).
- 9 - Katsunori, F. (1989). *Rate Decline Analysis for Naturally Fractured Reservoirs*, M.S Thesis, Stanford U.
- 10 - Gentry, R. W. (1972). "Decline curve analysis." *Petroleum Technology*.
- 11 - Fetkovich, M. J. (1971). "A simplified approach to water influx calculations—finite aquifer systems." *J. Pet. Tech.*, PP. 814-823.

-
- 12 - Ramey, H. J. Jr. and Cobb, W. M. (1971). "A general pressure buildup theory for a well in a closed drainage area." *J. Pet. Tech.*, PP.1493-1504.
- 13 - Abdelhafidh, F. Sonatrach. and Djebbar, T. (2001). *Application of Decline-Curve Analysis Technique in Oil Reservoir Using A Universal Fitting Equation*, U. of Oklahoma, SPE 70036.
- 14 - Fetkovich, M. J., et al. (1987). *Decline Curve Analysis Using Type Curve - Case Histories*, SPEFE. PP. 637-656.

1 - Curve Matching

2 - Smooth
