



اهمیت و نحوه کاربرد

نمودارهای تولیدی (Production Logs)

در تعیین دبی تولیدی بهینه از یک چاه

علی شکوهی^۱، علی رضا قزوینی^۲، سید حسین مصطفوی^۳

چکیده

نمودار نگار تولید (PL) مجموعه نمودارها بی است که می توان از آن برای ارزیابی و تعیین تولید بهینه از مخزن در هر زمانی از عمر چاههای تزریقی و تولیدی که به روش حفره باز یا لوله جداری تکمیل شده اند؛ استفاده کرد. هنگام بررسی روشهای تعیین دبی بهینه از یک چاه، اهمیت کاربرد این نمودارها، در تشخیص چگونگی رفتار سیال در چاه، مشخصات سازند و مشکلات مکانیکی چاه به دلیل عدم اطمینان نتایج حاصل از اندازه گیریهای سطح الارضی بیش از پیش نمایان می گرد. هدف از نگارش این مقاله بررسی اهمیت و نحوه کاربرد نمودارهای تولیدی در تعیین دبی بهینه از یک چاه است که ابتدا به موارد کاربرد و اهمیت استفاده از PL به دلیل عدم دقت و اشکالات روشهای اندازه گیری در سطح اشاره می کنیم و سپس با معرفی ابزار مورد استفاده در این مجموعه، به چگونگی محاسبه دبی تولیدی بهینه، دبی هر فاز در شرایط چند فازی و تعیین درصد مشارکت هر لایه در تولید که اهمیت بسیاری در بررسی عملکرد یک چاه دارد می پردازیم.

کلمات کلیدی: نمودارهای تولیدی، دبی تولیدی بهینه، سرعت سیال، دبی هر فاز، جریان دو فازی، پس ماند و سرعت لغزشی.

مقدمه

یکی از وظایف بسیار مهم مهندسان نفت در بررسی نحوه عملکرد یک چاه، محاسبه دبی واقعی چاههای نفت و گاز در زمان تولید و در زمان انجام عملیاتهای مختلف تعمیر و تکمیل است. برای تعیین این دبی، معمولاً از روشهای اندازه گیری در سطح استفاده می شود که طی زمان تولید و با بروز مشکلاتی از قبیل تولید گاز و آب بیش از حد و یا مشکلات ایجاد شده در تکمیل چاه، از دقت و صحت این روشها کاسته می گردد. از طرفی محاسبه دبی نفت و مقدار تولید سیالات دیگر در این شرایط برای بررسی و رفع مشکل چاه بسیار ضروریست. حال بابه کار بردن همزمان مجموعه ای از ابزارها بنام

Production Logging Tools (PLT) مقادیر دبی هر سیال، سطوح تماس، محل ورود آب و گاز و سایر خصوصیات جریانی سیالات درون چاه تعیین و محاسبه می گردد. این عوامل استفاده از PLT را امری اجتناب ناپذیر می سازد.

مهمترین کاربردهای مجموعه نمودارهای تولیدی عبارتند از:

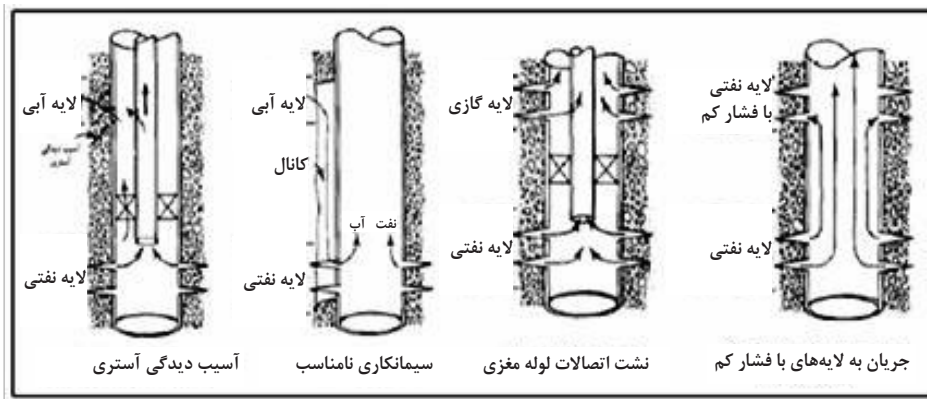
- تشخیص مشکلات مکانیکی چاه شامل نشستی آستری، لوله مغزی، لوله جداری و مجرابند و یا خوردگی آنها. (شکل ۱)
- تجزیه و تحلیل عملکرد یک چاه (مؤثر بودن ارتباط چاه با مخزن) از قبیل: تشخیص حرکت غیر عادی سیالات بین لایهها، ارزیابی بازدهی تکمیل چاههای تولیدی و تزریقی که خود

۱- کارشناس ارشد مهندسی نفت، شرکت مدیریت اکتشاف

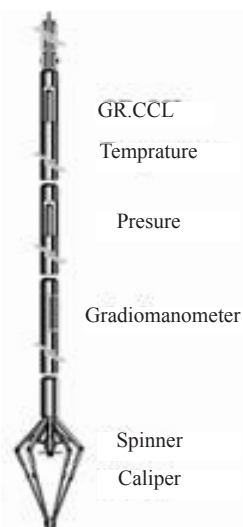
۲- کارشناس مهندسی نفت، شرکت مدیریت اکتشاف

۳- فارغ التحصیل دانشگاه صنعت نفت

(شکل-۱)



(شکل-۲)



و خروج سیال به چاه را نام برد. در حالت کلی با افزایش عمق در چاه، دما به نسبت خاص افزایش می‌یابد و به صورت نمودار گرادیان دما نشان داده می‌شود. حال ممکن است به دلایلی نمودار دما انحراف از این نمودار را نشان دهد. به عنوان مثال ورود گاز به دیواره چاه به دلیل پدیده انبساط باعث کاهش دما شده در حالیکه گاز تزریق شده به داخل سازند دلیل عمل تراکم افزایش دما را نشان می‌دهد (اثر ژول-تامپسون). همچنین جریان آب دما را افزایش داده و جریان گاز کاهش ناگهانی دما و بعد از آن دوباره افزایش دما را نشان می‌دهد. (شکل ۳)

شامل: بررسی مشارکت لایه‌ها در تولید، نوع سیال تولیدی آنها و بررسی نحوه توزیع سیال تزریقی در لایه‌ها می‌شود. • بررسی رفتار و ویژگیهای سیال مخزن، بعنوان مثال به دست آوردن درجه اشباع اولیه در هر لایه، تغییر غیر عادی آنها حین تولید و بررسی اینکه آیا مخزن بطور مطلوبی تخلیه می‌گردد یا خیر؟ برای نیل به اهداف بالا می‌بایست مجموعه‌ای از ابزارها (شکل ۲) شامل دماسنج، جریان سنج، فشار سنج، چگالی سنج، قطر سنج، عمق سنج و غیره را به صورت همزمان به کار برد که در ذیل چند ابزار مهم این مجموعه معرفی می‌گردد.

نمودار CCL

اولین نکته مهم در نمودار گیری، تعیین عمق ابزار درون چاه، در هر لحظه است. برای این منظور نمودارهای به دست آمده از ابزارهای اشعه گاما و CCL را با نمودارهای اولیه (Base Logs) این ابزارها در زمان حفاری مقایسه و تصحیح می‌کنند. برای بررسی صحت عمقی که ابزار CCL نشان می‌دهد، می‌توان از مبناهای زیر استفاده نمود:

- محل اتصال لوله‌های جداری (casing collar)
- پاشنه لوله‌های جداری (casing shoe)
- بالای آستری (liner lap)
- اتصالات کوتاه (short joints)
- انتهای لوله مغزی (tubing end)

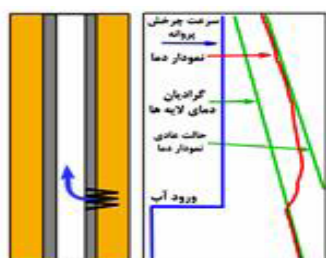
دماسنج (Temperature measurement)

ابزار دماسنج نمودار تغییرات دما بر حسب عمق را نشان می‌دهد که از مهمترین کاربردهای آن می‌توان یافتن محل ورود

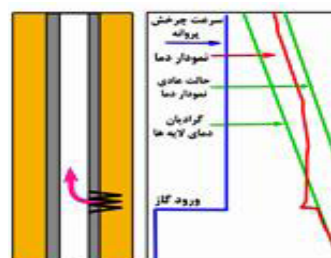
جریان سنج (Flowmeter) و نحوه تعیین سرعت سیال، V_f ، توسط این ابزار

این وسیله از یک پروانه (spinner) که حول یک محور می‌چرخد تشکیل شده است. قرار گرفتن این پروانه به طریقی است که با توجه به جهت حرکت ابزار و سرعت چرخش آن، می‌توان سرعت حرکت سیال را به دست آورد. به منظور تامین سرعت سیال توسط این ابزار باید عوامل گوناگونی را در نظر گرفت و نمودار به دست آمده بر اساس سرعت چرخش پروانه (FPS) بر حسب سرعت ابزار $Cs = \text{cable speed}$ را تصحیح کرد. چون ثبت اطلاعات در حال حرکت به بالا و پایین صورت

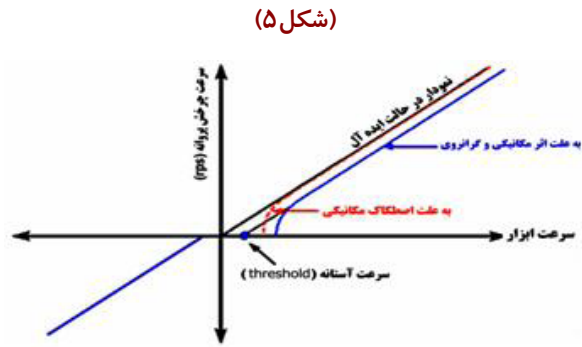
شکل ۴ - چاه با مشکل تولید آب



شکل ۳ - چاه با مشکل تولید گاز

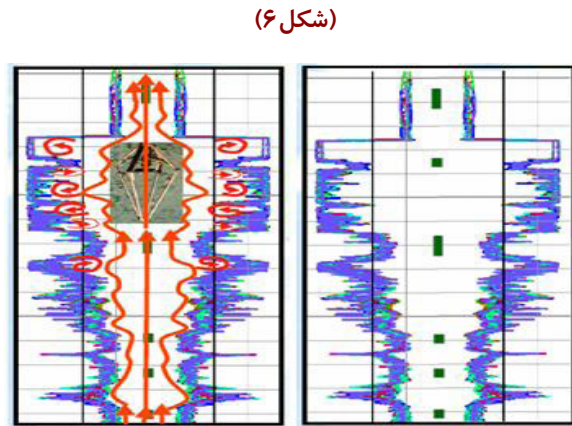


می‌گیرد باید اثر سرعت ابزار را از سرعت به دست آمده حذف نمود تا سرعت واقعی سیال بدست آید. همچنین باید توجه داشت که سیالی که گرانروی کمتری دارد پروانه را با سرعت بیشتری می‌چرخاند. لذا در تصحیح نمودار باید نوع سیال چاه را نیز در نظر گرفت.



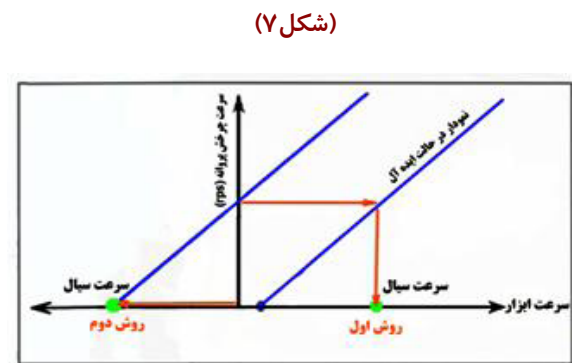
(شکل ۵)

برای اندازه‌گیری سرعت جریان در اعماق مختلف بدین ترتیب عمل می‌شود که ابتدا ابزار را در محیط ساکن ته چاه (پایین شبکه‌ها) با چهار سرعت مختلف به سمت پایین و بالا حرکت داده، سپس برای این ناحیه ۸ نقطه با مختصاتهای (C_{si}, rps_i) به دست می‌آید. حال اگر از نقاطی که rpsهای مثبت دارند یک خط و از نقاطی که rpsهای منفی دارند نیز یک خط عبور دهیم، دو خط مستقیم و تقریباً موازی هم، به صورتی که یک ناپوستگی بین آن دو وجود دارد، حاصل می‌شود که مبنای ما برای محاسبه‌ی سرعت سیال است. وجود این ناپوستگی به دلیل حداقل سرعتی است که سیال باید داشته باشد تا پروانه شروع به حرکت کند. که به این سرعت، سرعت آستانه (Threshold Velocity) گفته می‌شود. (شکل ۵)



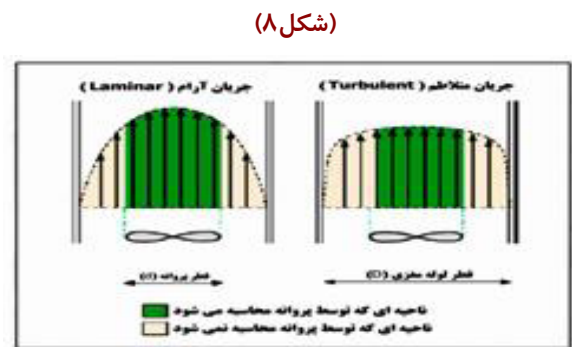
(شکل ۶)

مقادیر rps و Cs مربوط به هر ناحیه را باید از بالای آن ناحیه خواند. (به عنوان مثال در تعیین سرعت جریان یک ردیف شبکه تولیدی، باید این اطلاعات را از بالا ترین نقطه‌ی آن شبکه خواند نه روبروی آن).



(شکل ۷)

در نواحی که جریان وجود ندارد (محیط ساکن ته چاه) هنگام پایین رفتن ابزارهای نمودارگیری، ۴ نقطه با rps مثبت و هنگام بالا آمدن ابزارها، ۴ نقطه با rps منفی به دست می‌آید. اما برای نواحی جریانی ممکن است هنگام بالا آمدن ابزارهای نمودارگیری، در یک یا چند نقطه (از نقاط چهارگانه که سرعت حرکت ابزار در آنها متفاوت است) rps مثبت باشد. بدان دلیل که در این نقاط سرعت حرکت سیال به طرف بالا، از سرعت حرکت ابزار به طرف بالا بیشتر بوده و یا ممکن است هنگام پایین رفتن ابزارها rps منفی باشد به دلیل آنکه در این نقاط سرعت حرکت سیال به طرف پایین، از سرعت حرکت ابزار به طرف پایین بیشتر است و این می‌تواند یکی از نشانه‌های وجود thief zoon یا cross flow باشد. (از دیگر نشانه‌های وجود cross flow هنگامی است که سرعت کابل ما صفرو پروانه rps منفی نشان دهد و یا اینکه بعد از تفسیر مشاهده شود که سرعت سیال در ناحیه‌ای، از ناحیه پایینی خود کمتر است و ...).

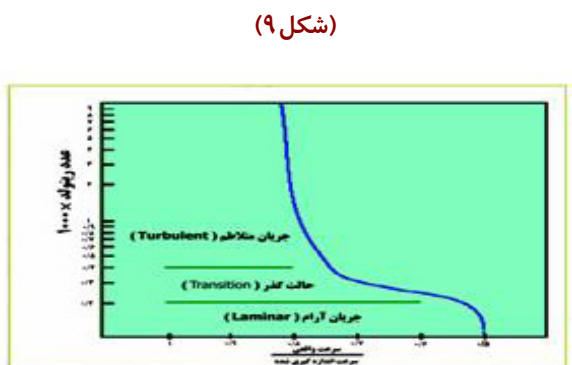


(شکل ۸)

انتخاب نواحی مناسب در جاهایی که به صورت حفره باز open hole تکمیل شده‌اند

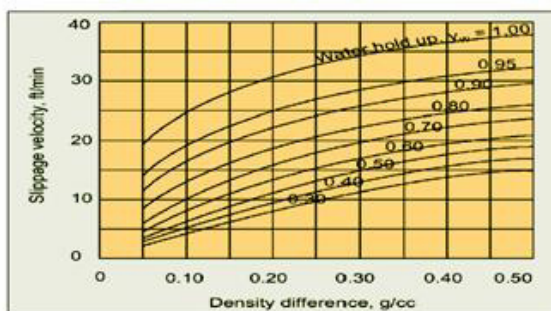
در این نوع چاه‌ها ممکن است مناطق شسته شده (wash-out zone) به وجود آید که باعث بروز مشکلاتی برای تفسیر می‌شود. از جمله:

- پیچشی شدن و تلاطم شدید جریان در این مناطق و در نتیجه آن تأثیر روی سرعت چرخش پروانه؛
 - خواندن قطر بیشتر توسط ابزار caliper؛
 - عدم شناسایی صحیح نواحی که در تولید دخالت ندارند و یا نواحی با تولید بالا (مانند شکافها)؛
- لذا انتخاب نقاط مناسب و حذف نواحی شسته شده در چاه‌های



(شکل ۹)

(شکل ۱۰)



باید متذکر شد که در فواصلی که به صورت حفره باز تکمیل شده اند قطر حفره همانگونه که در بالا اشاره شد، از روی ابزار Caliper حاصل می‌گردد.

معمولاً ضریب تصحیح را در اکثر موارد برای جریانهای متلاطم (Turbulent)، 0.84 و برای جریانهای آرام (Laminar)، 0.5 می‌توان در نظر گرفت. در نهایت نمودار مبنای تصحیح شده بدست خواهد آمد. ضریب تصحیح را از فرمول زیر نیز می‌توان یافت:

چگالی سنج

چگالی سیال درون چاهی را بر حسب عمق، می‌توان با Gradiomanometer و یا ابزار جذب اشعه گاما اندازه گیری کرد. Gradiomanometer چگالی را از طریق اختلاف فشار بین دو نقطه اندازه می‌گیرد. این وسیله برای تعیین محل ورود گاز و تشخیص سطوح آب ساکن بسیار مناسب است. در تعیین محل ورود آب به چاه، رابطه بین پس ماند آب (Y_w) و برش آب (water cut) مورد نیاز می‌باشد.

اگر چگالی نفت را ρ_o ، چگالی آب را ρ_w و چگالی اندازه گیری شده را ρ_m در نظر بگیریم، پس ماند آب برابر است با:

$$Y_w = \frac{\rho_m - \rho_o}{\rho_w - \rho_o}$$

در جریانهای چند فازی، فازهای مختلف با سرعتهای یکسانی جریان ندارند. که این اختلاف سرعت، سرعت لغزشی یا V_s slippage velocity نامیده می‌شود که تابعی از اختلاف چگالی بین دو فاز در حال جریان است و آن را می‌توان با داشتن اختلاف چگالی بین آب و نفت و پس ماند آب از روی شکل ۱۰ به دست آورد.

در حالت کلی دبی هر فاز برابر است با $q = V_{act} \cdot Y \cdot A$ به عنوان مثال در جریان دو فازی آب و نفت، دبی هر فاز را می‌توان با داشتن پس ماند هر فاز و دبی کل جریان، بدست آورد.

$$q_o = (1 - Y_w)(q_t + V_s A Y_w) \quad q_w = Y_w [q_t - V_s A (1 - Y_w)]$$

$$V_o = V_w + V_s \quad \text{و} \quad q_o = (1 - Y_w) A V_o \quad \text{و} \quad q_w = Y_w A V_w$$

با تکمیل حفره باز برای تفسیر مناسب و صحیح بسیار ضروریست. تصویر سمت راست شکل ۶.

برای رسم نمودار rps بر حسب Cs یک ناحیه، باید از نقاط با rps مثبت یک خط و از نقاط با rps منفی نیز یک خط جداگانه عبور داد. برای به دست آوردن سرعت جریان در ناحیه‌های دیگر نیز مراحل بالا تکرار می‌شود. یعنی برای هر ناحیه ۸ نقطه با مختصاتهای (Csi, rpsi) به دست می‌آید که در نتیجه برای هر ناحیه یک نمودار حاصل می‌شود. در ادامه برای بدست آوردن سرعت سیال در هر ناحیه به دو روش میتوان عمل کرد:

روش اول: محل برخورد نمودار مربوط به ناحیه مورد نظر با محور عمودی (جایی که حرکت ابزار صفر است، یعنی سرعت چرخش پروانه فقط به علت سرعت سیال است) را روی نمودار مبنا تصور کرده و سپس سرعت مربوط به آن ناحیه را از روی محور افقی خوانده تا نتیجه سرعت سیال در آن ناحیه به دست می‌آید.

روش دوم: مجموع سرعت در محل برخورد نمودار مربوط به ناحیه مورد نظر با محور افقی (جایی که سرعت چرخش پروانه صفر است یعنی سرعت ابزار در بالا آمدن با سرعت سیال برابر است) بوده و میزان سرعت آستانه، سرعت سیال را نشان می‌دهد. (شکل ۷)

با توجه به پروفایل سرعت در لوله و این که قطر پروانه از قطر لوله کوچکتر است، سرعتی را که پروانه به ما می‌دهد از سرعت واقعی جریان در لوله بیشتر خواهد بود. (شکل ۸)

$$\frac{V_{spinner}}{V_{flow}} > 1$$

برای تصحیح ابتدا عدد رینولد را از طریق فرمول زیر به دست آورده:

$$N_{Re} = 129 \frac{\rho v d}{\mu}$$

ρ : gr/cm³, v : ft/min, d : inch, μ : cp

اگر N_{Re} کوچکتر از ۲۰۰۰ باشد جریان آرام و اگر بزرگتر از ۴۰۰۰ باشد جریان متلاطم است.

سپس از طریق شکل ۹ ضریب تصحیح (C) حاصل می‌شود. حال با ضرب این عدد در سرعتهای به دست آمده از پروانه، سرعتهای واقعی بدست می‌آید

$$V_{act} = C_f \times V_{app}$$

در نهایت دبی کل جریان محاسبه می‌گردد

$$q_t = V_{act} \times A$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

که در این فرمول

D = قطر داخلی لوله (اینچ)

d = قطر ابزار (اینچ) (تقریباً ۱/۶۸۷۵ اینچ)

	Oil	Water	Gas
Viscosity range (cp)	0.2 to 10	0.2 to 1	0.05 to 0.2
Density Range (gr/cm ³)	0.6 to 1	1	0.01 to 0.07

۱۰- به دست آوردن درصد تولید هر لایه

ابتدا نمودار سرعت چرخش پروانه (RPS) را بر حسب عمق رسم کرده (نمودار به دست آمده برای سرعتهای مختلف ابزار نتایج مشابهی می‌دهد)، سپس برای مشخص کردن درصد تولیدی لایه‌ها بر روی نمودار، کمترین میزان سرعت دوران پروانه را تعیین و آن را به صورت خط مبنای صفر در نظرمی‌گیریم و به همین ترتیب بالاترین سرعت دوران پروانه را به صورت خط مبنای صد درصد منظور نموده، آنگاه این دو خط را توسط خط سومی به هم وصل می‌کنیم (خطوط مبنای موازی محور عمق خواهند بود و خط سوم دو خط مبنای موازی را بر روی صفحه قطع می‌نماید). حال خط سوم را به صد درجه مساوی تقسیم می‌نماییم.

اینک تغییرات روی نمودار سرعت پروانه بر حسب عمق با خطوط موازی مبنای بر روی این خط تصویر کرده و در نتیجه درصد تولیدی هر لایه از روی این خط خوانده می‌شود. (شکل ۱۴)

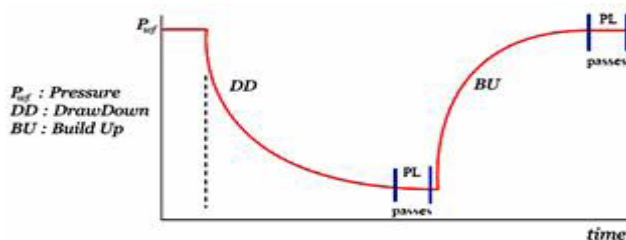
نتیجه گیری

با توجه به اینکه اندازه گیری فشار، دما و دبی در سطح، نمی‌تواند بطور مطلوب نشان دهنده آنچه که در چاه میگردد باشد و همچنین به دلیل لزوم اندازه گیری فشار و دبی جریان ناحیه به ناحیه برای تعیین فشار میانگین و شاخص بهره دهی (PI) هر چاه تولیدی و تزریقی، از نمودارهای تولیدی به عنوان منبعی مطمئن برای دستیابی اطلاعات مورد نیاز استفاده می‌شود که کاربرد آنها را می‌توان در دو زمینه اصلی تقسیم بندی کرد: ارزیابی عملکرد چاه نسبت به دینامیک مخزن و آنالیز مشکلات مکانیکی چاه. همچنین در مواردی نظیر جریانهای چند فاز در چاه بویژه در چاههای انحرافی و افقی این نمودارها می‌توانند کمک فراوانی در محاسبه دبی هر فاز و درصد تولید داشته باشند.

منابع

1. Thomas O.Allen and A.P.Roberts, «production operation, Through tubing production logging», volume 1, 4th edition, 2002
2. Bahrami H, «The PSP tool», Schlumberger company, December 2004
3. Tracs international, «Self learning module of production logging»
4. Schlumberger Company, «Cased Hole Log Interpretation Principles and Application», 1989
5. Faber B, «Production logging, measurement and interpretation», well log analysis center.
6. Protechnics company, «Solution for improved well performance, 2002.
7. Dr Cosan Ayan, «Production logging», Schlumberger, 1996
8. Sondex, «A guide to spinner flowmeter selection and use», April 2002
9. P. Mukerji, Z.Zaouali, and H. Rees, «The role of enhanced production logging measurements in challenging openhole horizontal completions», SPE-102198, September 2006.

(شکل ۱۳)



$$\text{Water cut: } \frac{q_w}{q_t}$$

$$q_{o,sc} = \frac{q_{o@P,T}}{B_o}$$

$$q_{g,sc} = GOR \cdot q_{o,sc}$$

بنابراین با اندازه گیری دبی آب و نفت می‌توان مقدار مشارکت لایه مورد نظر را در تولید آب و نفت سنجید.

در حضور گاز نیز روابط زیر برای تعیین دبی هر فاز برقرار است:

$$Y_o + Y_w + Y_g = 1$$

$$Y_o = (\rho - \rho_w Y_w - \rho_g (1 - Y_w)) / (\rho_o - \rho_g)$$

$$q_w = Y_w AV_w, \quad q_g = Y_g AV_g, \quad q_o = Y_o AV_o$$

باید خاطر نشان کرد امروزه علاوه بر این ابزار، برای تشخیص محل ورود آب و گاز، تعیین پس ماند هر فاز و در چاههای افقی با وجود رژیم‌های جریانی مختلف در هر زاویه انحراف چاه، از دو ابزار جدید بنامهای DEFT و GHOST استفاده می‌شود که در محاسبات و تفسیرهای لاگهای بهره برداری بسیار مفیدند.

۹- شرایط چاه هنگام عملیات نمودارگیری

در زمان راندن نمودارنگار تولید، چاه باید دارای شرایط متعادلی باشد تا بتوان اطلاعات دقیق تری را از شرایط درون چاهی و جریانی آن به دست آورد. در غیر این صورت پس از آزمایش (چه در حالت جریانی و چه در حالت ساکن)، داده‌های مربوط به پروانه از جریان سنج در نمودار rps بر حسب cable speed یک خط مستقیم را نمی‌دهد. لذا بهترین شرایط برای انجام این کار زمانی است که تغییرات فشار چاه در دبی کنونی در کمترین مقدار خود باشد. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود نقاطی که با علامت PL مشخص شده اند بهترین زمان برای انجام این عملیات هستند.

(شکل ۱۴)

