



بهینه‌سازی نحوه تکمیل چاه‌های یک میدان به منظور افزایش تولید با استفاده از نرم افزار PROSPER

حمید محمودان^۱ کارشناس ارشد مهندسی نفت، شرکت نفت و گاز پارس

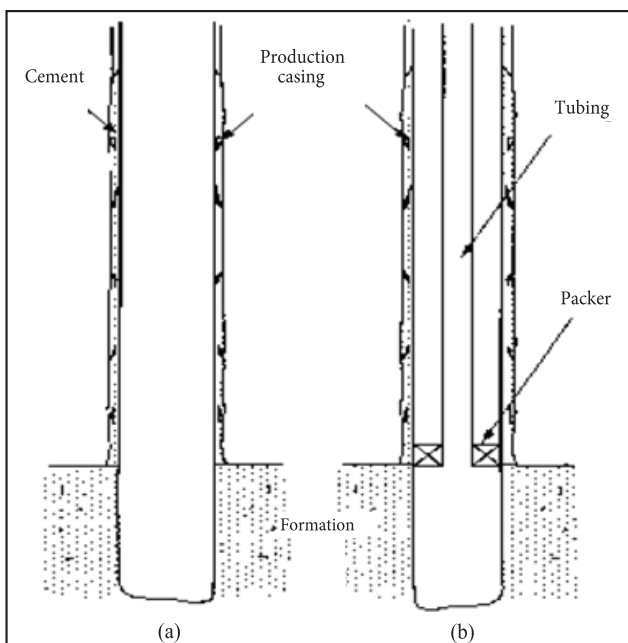
چکیده

عملیات «تکمیل چاه»^۲ از بخش‌های مهم عملیات بهره برداری است که بلافاصله پس از عملیات حفاری و به منظور تولید از چاه به صورت ایمن و اقتصادی صورت می‌گیرد. نحوه تکمیل چاه، ارتباط مستقیم با میزان برداشت از چاه دارد. در این مطالعه، نحوه تکمیل سه چاه یک میدان مشترک گازی که در سه نقطه متفاوت از مخزن قرار دارند تغییر داده می‌شود و اثر این تغییر بر روی میزان تولید از چاه، توسط نرم افزار و با توجه به نمودارهای «عملکرد جریانی مخزن»^۳ و «عملکرد رشته تولیدی»^۴ بررسی می‌گردد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که با اعمال تغییر در نحوه تکمیل چاه‌ها در این میدان، می‌توان نرخ برداشت از هر چاه را حدود ۳۰٪ افزایش داد، که علاوه بر منافع بالای اقتصادی با توجه به مشترک بودن میدان، کمک شایانی به حفظ سهم کشورمان از این میدان نیز خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: عملیات تکمیل چاه، حد سرعت سایش، عملکرد جریانی مخزن، عملکرد رشته تولیدی، نرم افزار PROSPER.

$$PI = \frac{q}{\Delta P} \quad (1)$$

که q : دبی تولید (ft^3/day)، ΔP : افت فشار بین مخزن و چاه



مقدمه

به مجموعه فعالیت‌هایی که پس از عملیات حفاری و به منظور بهره برداری از چاه به صورت ایمن و اقتصادی انجام می‌گیرد، عملیات تکمیل چاه می‌گویند که می‌تواند شامل: «راندن رشته تولیدی»^۵، «عملیات اسیدکاری»، «مشبک کاری» و ... باشد. یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در تکمیل چاه، تعیین نحوه تولید از چاه است. چاه‌ها به دو روش اصلی: «حفره باز» و یا «جداربندی»^۶ تکمیل می‌شوند (شکل ۱ و ۲). صرف نظر از اینکه کدام یک از این دو روش استفاده شود، معمولاً برای تولید ایمن‌تر و جلوگیری از وارد شدن آسیب به لوله‌های جداری به خصوص لوله جداری تولیدی، یک رشته لوله تولیدی برای تولید سیال مخزن به داخل چاه رانده می‌شود. قطر این لوله تولیدی از روی محاسبات مربوط به عملکرد جریانی مخزن و عملکرد رشته تولیدی، توسط نرم افزارهای شبیه‌ساز چاه، مانند PROSPER تعیین می‌گردد.

۱- نمودار عملکرد جریانی مخزن

عملکرد جریانی مخزن را معمولاً به صورت نموداری که بیانگر رابطه بین دبی تولیدی و فشار ته چاه است نشان می‌دهند. برای رسم نمودار عملکرد جریانی مخزن، تعریف مفهوم «ضریب بهره‌دهی»^۷ ضروری است، ضریب بهره‌دهی از رابطه داری مشتق شده و به صورت ستون مقابل محاسبه می‌شود:

شکل ۱ | دو چاه با تکمیل نوع حفره باز، چاه a با تولید از لوله جداری تولیدی، چاه b با تولید از رشته تولیدی

فشار چاه، تعیین کننده این نمودار خواهند بود. معروف ترین روابط برای محاسبات جریان چند فازی برای چاه‌ها توسط: «هگدورن و برانز»^{۱۱}، «دانز و راس»^{۱۲}، «بگز و بریلز»^{۱۳} ارایه شده است، امروزه این محاسبات توسط نرم افزارهای شبیه ساز جریان چاه صورت می گیرد.

۳- نرم افزار PROSPER

این نرم افزار از مجموعه نرم افزارهای Petroleum Expert است که برای شبیه سازی جریان داخل چاه استفاده می شود. این نرم افزار قابلیت بسیار خوبی برای محاسبات مربوط به عملکرد جریانی مخزن و عملکرد جریانی رشته تولیدی و هم چنین رسم نمودارهای مربوطه دارد. همان گونه که در شکل ۵ مشخص است، این نرم افزار با دریافت مشخصات مخزن و سیال آن، دما و فشار، ابعاد ابزارهای درون چاهی و سایر شرایط حاکم بر مخزن، چاه و سیال آن می تواند نمودارهای عملکرد جریان و عملکرد رشته تولیدی را رسم نماید که از تلاقی آنها توان تولیدی چاه مشخص می شود. در این مقاله از این نرم افزار برای به دست آوردن دبی تولید در دو نوع تکمیل مختلف یک چاه و مقایسه آنها با هم استفاده شده است.

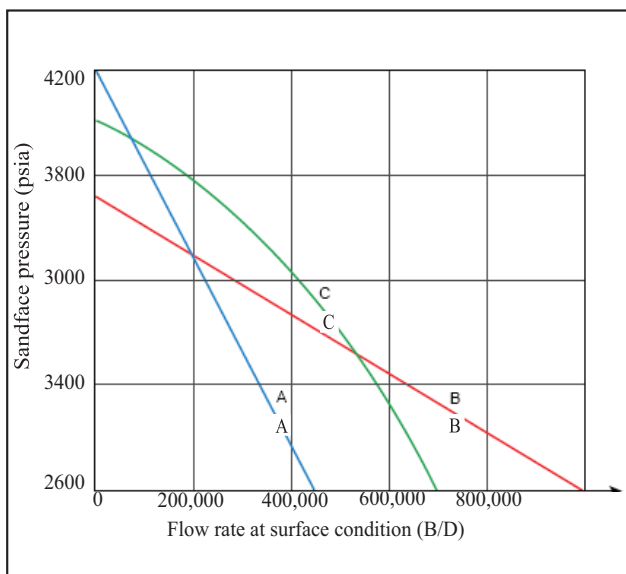
۴- بررسی تغییر در نحوه تکمیل چاه در دو چاه از یک میدان مشترک گازی در این مطالعه، سه چاه از چاه‌های یک میدان مشترک گازی شامل: یک چاه عمودی و دو چاه انحرافی که با فاصله نسبتاً زیادی از هم قرار گرفته اند (این فاصله کمک می کند تا شمول این مطالعه

(psi) و ضریب بهره دهی (PI) بر حسب $ft^3/day/psi$ می باشد. با توجه به رابطه ۱ و پس از رسم $P\Delta$ بر حسب q و با توجه به اینکه برای سیال نفتی بالای فشار اشباع، نمودار عملکرد جریانی مخزن به صورت یک خط راست است، هر چه نمودار دارای شیب خط کمتری باشد، نشانگر این است که مخزن دارای ضریب تولید بیشتری خواهد بود. به این معنی که توان تولید مخزنی که نمودار آن دارای شیب خط کمتری است، به ازای افت فشار مساوی در چاه، بیشتر خواهد بود (در مخازن گازی و نفتی که در اثر تولید، فشار به زیر فشار اشباع می افتد، نمودار به شکل منحنی خواهد بود). معروف ترین روابط برای محاسبه عملکرد جریانی توسط «وگل»^۸، «استدینگ»^۹ و «فتکوویچ»^{۱۰} ارایه شده است.

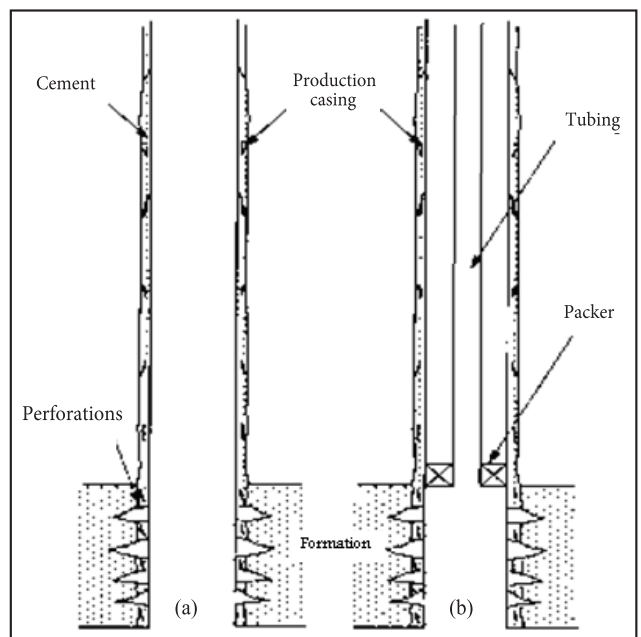
امروزه برای محاسبات مربوط به این نمودار و رسم آن از نرم افزارهای شبیه ساز جریان چاه استفاده می شود [۲]. در شکل ۳ عملکرد جریانی برای سه نوع مخزن ذکر شده نشان داده شده است.

۲- نمودار عملکرد رشته تولیدی

این نمودار که نمونه‌ای از آن در شکل ۴ نشان داده شده است، بیانگر ارتباط بین فشار و دبی تولیدی در رشته تولیدی از چاه در یک جریان چند فازي رو به بالا می باشد. از ترسیم هم زمان این نمودار و نمودار عملکرد جریانی مخزن، میزان دبی تولیدی چاه مشخص خواهد شد. عواملی مانند: قطر رشته تولیدی، نسبت آب و گاز تولیدی، مشخصات سیال مخزن و



شکل ۳ | سه نوع نمودار عملکرد جریان، نوع A مخزن با سیال نفتی، بالای فشار اشباع و ضریب تولیدی پایین، نوع B مخزن با سیال نفتی، بالای فشار اشباع و ضریب تولیدی بالا، نوع C مخزن با سیال گازی یا سیال نفتی پایین فشار اشباع [۲]



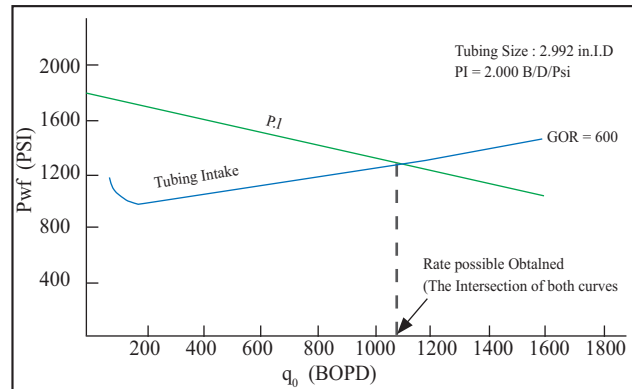
شکل ۲ | دو چاه با تکمیل از نوع جداربندی، چاه a با تولید از لوله جداری تولیدی، چاه b با تولید از رشته تولیدی



در کل مخزن مشخص گردد و محدود به یک چاه نباشد) توسط نرم افزار PROSPER شبیه سازی می شوند. سپس نحوه تکمیل این دو چاه در نرم افزار تغییر داده می شود و اثر این تغییر در دبی تولیدی چاه بررسی می شود. لازم به ذکر است برای مقایسه سایر عوامل تأثیر گذار در میزان تولید، مانند فشار سرچاهی، نسبت میعانات به گاز تولیدی ثابت فرض می شوند. در حال حاضر این چاه ها به وسیله یک رشته تولیدی ۷ اینچ با قطر داخلی ۶/۲۱ اینچ به صورتی که در شکل ۶-الف نشان داده شده است تکمیل می شوند، با توجه به استاندارد API حداکثر سرعت مجاز گاز در لوله تولیدی برای جلوگیری از ساییدگی لوله از فرمول زیر به دست می آید:

$$V = \frac{C}{\sqrt{P}}$$

(۱)



شکل ۴ | منحنی آبی رنگ نشانگر منحنی عملکرد رشته تولیدی است که محل برخورد آن با نمودار عملکرد جریان، تعیین کننده دبی تولیدی از چاه است [۲]

Prosper 11.5 - License#:05000 - IPM V7.50 - Build#:600 - Jan 27 2010 (untitled)

File Options PVT System Matching Calculation Design Output Units Wizard Help

OPTIONS SUMMARY	PVT DATA	IRP DATA
Fluid Oil PVT Method Black Oil Equation Of State Separator Single-Stage Emulsions No Hydrates Disable Warning Water Viscosity Use Default Correlation Water Vapour No Calculations Viscosity Model Newtonian Fluid Steam Option No Steam Calculations Flow Type Tubing Well Type Producer Artificial Lift None Lift Type Predicting Pressure and Temperature (offshore) Temperature Model Rough Approximation Range Full System Completion Cased Hole Sand Control None Inflow Type Single Branch Gas Coning No Company Field Location Well	Solution GOR 0 (scf/STB) Oil Gravity 0 (API) Gas Gravity 0 (sp. gravity) Water Salinity 0 (ppm) Mole Percent H2S 0 (percent) Mole Percent CO2 0 (percent) Mole Percent N2 0 (percent) Pb, Rs, Bo Correlation Glaso Oil Viscosity Correlation Beal et al PVT Matched No Use Tables No	Reservoir Model PI Entry M&G Skin Model Enter Skin By Hand D&PP Skin Model Cinco / Martin-Bronz Compaction Permeability Reduction Model No Relative Permeability No Absolute Open Flow (AOF) 0 (STB/day) Reservoir Pressure 0 (psig) Reservoir Temperature (deg F) Water Cut 0 (percent) Total GOR (scf/STB)
EQUIPMENT DATA	ANALYSIS SUMMARY	Prosper 11.5 IPM V7.50 - Build # 600 - Jan 27 2010 Petroleum Experts Limited Petex House 10 Logie Mill Edinburgh, EH7 4HG United Kingdom Email: edinburgh@petex.com Web site: www.petex.com untitled License Number : 05000 File Format Version : 607 Current File Version : Original=0 Current=0 Memory - Load 44% Physical (2038/2047Mb) Virtual (1134/1946M)
Deviation Survey <input checked="" type="checkbox"/>	Inflow <input checked="" type="checkbox"/>	
Surface Equipment <input checked="" type="checkbox"/>	System (3 Variables) <input checked="" type="checkbox"/>	
Downhole Equipment <input checked="" type="checkbox"/>	System (4 Variables) <input checked="" type="checkbox"/>	
Geothermal Gradient <input checked="" type="checkbox"/>	System (Multi Variables) <input checked="" type="checkbox"/>	
Average Heat Capacities <input checked="" type="checkbox"/>	Gradient <input checked="" type="checkbox"/>	
	VLP (3 Variables) <input checked="" type="checkbox"/>	
	VLP (4 Variables) <input checked="" type="checkbox"/>	
	VLP (Multi Variables) <input checked="" type="checkbox"/>	
	Tubing Correlation Comparison <input checked="" type="checkbox"/>	
	PipeLine Correlation Comparison <input checked="" type="checkbox"/>	
	Gradient Matching <input checked="" type="checkbox"/>	
	VLP/IPR Matching <input checked="" type="checkbox"/>	
	PipeLine Matching <input checked="" type="checkbox"/>	
	Generate for GAP <input checked="" type="checkbox"/>	
	BHP From WHP <input checked="" type="checkbox"/>	

شکل ۵ | نمایی از نرم افزار شبیه ساز PROSPER

چاه مورد بررسی و با فرض فشار سر چاهی مساوی، مقایسه می گردد.

۴-۱- بررسی چاه عمودی

پس از وارد کردن اطلاعات مربوط به چاه و مخزن و شبیه سازی شرایط چاه، نمودار عملکرد جریان مخزن (منحنی سبز رنگ) و نمودارهای عملکرد رشته تولیدی چاه در حالت تکمیل با رشته ۷ اینچ و تکمیل به روش "۷×۹ ۵/۸" (منحنی های قرمز رنگ با شماره های صفر و ۱) به صورتی که در شکل ۷ نشان داده شده، رسم می گردد با توجه به شکل ۷، دبی تولیدی در حالت تکمیل ("۷×۹-۵/۸") در حدود ۱۶۰ میلیون فوت مکعب در روز است، در حالی که برای رشته تکمیل ۷ اینچ، این عدد در حدود ۱۲۵ میلیون فوت مکعب در روز می باشد که به معنای افزایشی در حدود ۲۸٪ در دبی تولید با تغییر در نحوه تکمیل چاه است.

۴-۲- بررسی چاه انحرافی اول

برای این چاه که با زاویه ای در حدود ۵۰ درجه حفاری شده است، نمودارهای عملکرد جریان و عملکرد رشته های تولیدی در شکل ۸ نشان داده شده است. در حالت تکمیل فعلی (رشته ۷ اینچ) دبی تولید در حدود ۱۱۵ میلیون فوت مکعب در روز و در حالت تکمیل پیشنهادی ("۷×۹-۵/۸") دبی تولید در حدود ۱۵۰ میلیون فوت مکعب در روز است که افزایشی در حدود ۳۰٪ را نشان می دهد.

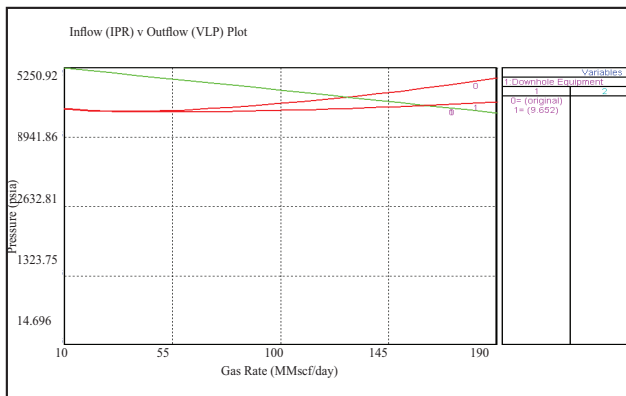
۴-۳- چاه انحرافی دوم

نمودارهای بازده جریانی و توان انتقال رشته های تولیدی این چاه که با زاویه ای در حدود ۵۲ درجه حفاری شده مطابق شکل ۹ است. بر این اساس، دبی تولیدی در تکمیل فعلی (رشته سراسری ۷ اینچ)

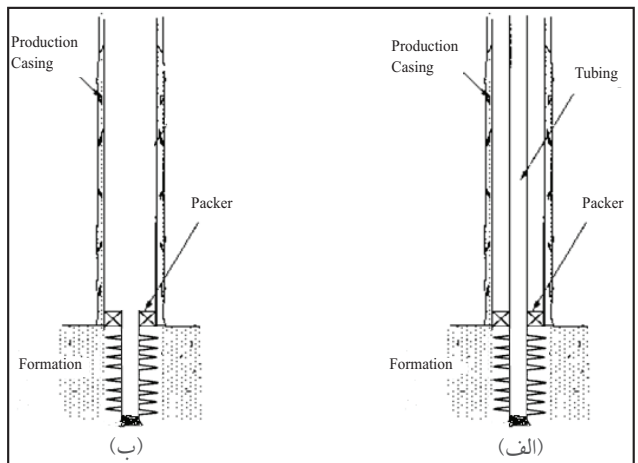
که V : حداکثر سرعت مجاز (ft/Sec) و ρ : چگالی گاز در دما و فشار چاه (lb/ft^3) می باشد. تجارب صنعتی برای C در جریان سیال فاقد مواد جامد، عدد ۱۰۰ را پیشنهاد می کند، هر چند استاندارد API در مواردی که خوردگی به وسیله تزریق مواد ضد خوردگی یا آلیاژهای ضد خوردگی کنترل می گردد، اجازه استفاده اعداد ۱۵۰ تا ۲۰۰ را نیز می دهد [۱]. ولی در این مطالعه با توجه به هدف تحقیق-مقایسه بین دو نوع تکمیل چاه- از همان عدد ۱۰۰ استفاده شده است. برخی از اطلاعات استفاده شده در محاسبه حداکثر دبی مجاز تولید در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به این فرمول، حداکثر دبی تولیدی مجاز در لوله ۷ اینچ در حدود ۱۳۰ میلیون فوت مکعب در روز به دست می آید. این مطالعه پیشنهاد می کند، نحوه تکمیل به صورتی که در شکل ۶- ب نشان داده شده است تغییر کند. یعنی در داخل مخزن هم چنان از رشته آستری ۷ اینچ استفاده گردد، ولی لوله مغزی ۷ اینچ حذف شده و تولید از داخل لوله جداری تولیدی "۵/۸-۹ اینچ با قطر داخلی ۸/۶۸۱ اینچ صورت گیرد که به صورت خلاصه به آن تکمیل ("۷×۹-۵/۸") می گوئیم. این نوع تکمیل، در مرحله اول با توجه به افزایش قطر داخلی لوله تولیدی به میزان ۴۰٪ محدودیت تولید چاه را از عدد ۱۳۰ میلیون فوت مکعب به ۱۸۰ میلیون فوت مکعب افزایش می دهد. در مرحله بعد، توان تولید این دو رشته تکمیلی توسط نرم افزار در سه

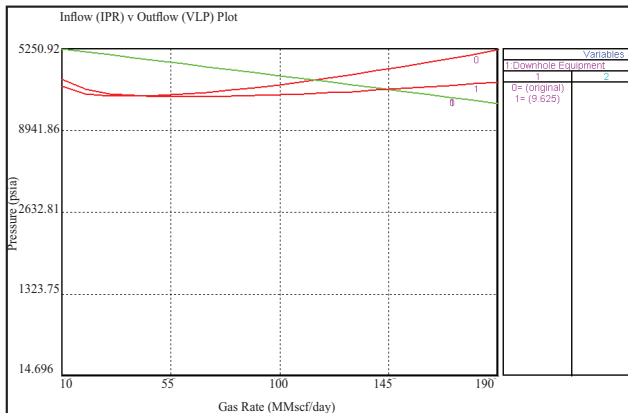
اطلاعات استفاده شده برای محاسبه حداکثر دبی مجاز تولید گاز	
سر چاه	ته چاه
فشار: ۴۲۰۰ پام	فشار: ۵۱۰۰ پام
دما: ۱۳۰ درجه فارنهایت	دما: ۲۱۰ درجه فارنهایت
دانشیته ویژه گاز: ۰/۷ نسبت به هوا	دانشیته ویژه گاز: ۰/۷ نسبت به هوا



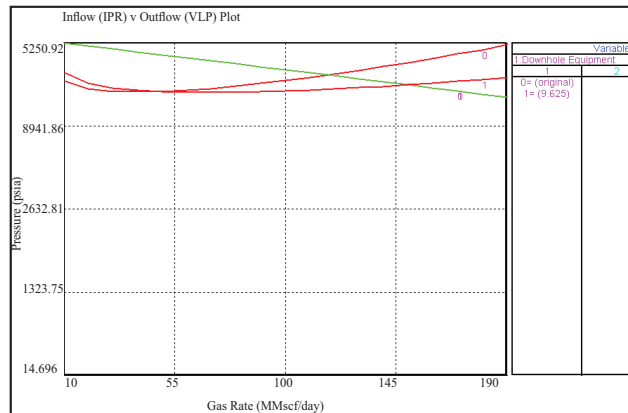
شکل ۷ | منحنی عملکرد جریانی مخزن (رنگ سبز) و منحنی های توان رشته تولیدی اولیه (رنگ قرمز شماره ۰) و رشته تولیدی پیشنهادی (رنگ قرمز شماره ۱) در چاه عمودی



شکل ۶ | نحوه تکمیل چاهها در حال حاضر (الف) و نحوه تکمیل پیشنهادی چاهها (ب)



شکل ۹ | منحنی عملکرد جریان (رنگ سبز) و منحنی‌های توان رشته تولیدی اولیه (رنگ صورتی شماره ۰) و رشته تولیدی پیشنهادی (رنگ قرمز شماره ۱) چاه انحرافی دوم



شکل ۸ | منحنی عملکرد جریان مخزن (رنگ سبز) و منحنی‌های توان رشته تولیدی اولیه (رنگ قرمز شماره ۰) و رشته تولیدی پیشنهادی (رنگ قرمز شماره ۱) در چاه عمودی

۱۷ اینچ) به دلیل عبور از سرعت مجاز گاز عملاً این کار غیر ممکن است.

- افزایش قطر رشته تولیدی می‌تواند در دبی‌های یکسان باعث کاهش سرعت گاز و در نتیجه کاهش ساییدگی در رشته تولیدی گردد. همچنین در سرعت برابر گاز، توان انتقال دبی گاز بیشتری توسط رشته تکمیل پیشنهادی وجود دارد.
- با توجه به افت کم فشار در ته چاه، در تکمیل نوع «ب» نسبت به نوع «الف»، احتمال تغییر عمده در بازیافت میعانات گازی کم است. هرچند بهتر است اثر افت فشار در ته چاه بر میزان تولید و بازیافت نهایی میعانات گازی توسط نرم افزارهای شبیه ساز مخزن بررسی گردد. در هر صورت حتی اگر اثر تغییر نحوه تکمیل بر بازیافت میعانات گازی شدید باشد، این نوع تکمیل می‌تواند در چاه‌های مستقر در خط مرزی و به منظور جلوگیری از مهاجرت گاز مورد استفاده قرار گیرد.

در حدود ۱۱۲ میلیون فوت مکعب در روز و در تکمیل پیشنهادی (۷"×۹.۵/۸") در حدود ۱۴۵ میلیون فوت مکعب در روز است که در حدود ۲۹٪ افزایش دبی جریان را نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

- این تحقیق نشان می‌دهد با تغییر در نحوه تکمیل چاه می‌توان با ثابت نگه داشتن فشار سر چاهی در حدود ۳۰٪ افزایش تولید از هر چاه به دست آورد.
- با توجه به افزایش قطر داخلی رشته تولیدی و افزایش حد سرعت مجاز تولید، برای جلوگیری از سایش در رشته تولیدی از ۱۳۰ میلیون فوت مکعب در رشته تکمیلی ۱۷ اینچ به ۱۸۰ میلیون فوت مکعب در روز در رشته تکمیلی ۷"×۹.۵/۸" در صورت نیاز می‌توان با کاهش فشار سر چاهی به این میزان تولید دست یافت. در حالی که در تکمیل حال حاضر (رشته

پی‌نوشت‌ها

¹Hamid.mahmoudan@gmail.com

⁵Production Tubing

¹⁰Fetkovich

²Well Completion

⁶Cased Hole

¹¹Hagedorn & Browns

³IPR (Inflow Performance Relation)

⁷Productivity Index (PI)

¹²Dones & Ros

⁴TIC (Tubing Intake Curve)

⁸Vogel

¹³Beggs & Brills

⁹Standing

منابع

[1] API RP14E Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems.

[2] Introduction to Well Testing, Schlumberger Wireline and Testing, Bath, England, 1998.