



# بهینه‌سازی رشته تکمیلی یکی از چاه‌های نفتی ایران با مشکل تولید ذرات سازندی

دکتر احسان خامه چی<sup>۱</sup>، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

هانیه رسولی<sup>۲</sup>، دانشجوی دکتری مهندسی مخازن هیدروکربوری، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده

مهم‌ترین بخش تکنولوژی تولید نفت، مهندسی و نصب تجهیزات تکمیل درون چاهی است. رشته تکمیلی، مهم‌ترین جزء سیستم تولید بوده و باید به‌گونه‌ای صحیح، طراحی، نصب و نگهداری شود. اگر چاه تولیدی دارای مشکل تولید ذرات سازندی باشد، این طراحی از اهمیت بیش‌تری برخوردار خواهد بود. در این مطالعه برای جلوگیری از تولید ذرات سازندی، چهار روش اصلی تکمیل چاه معرفی گردیده است، سپس یکی از چاه‌های نفتی میدین جنوبی ایران که دارای مشکل تولید ذرات سازندی می‌باشد، با استفاده از نرم‌افزار Prosper مدل‌سازی شده است. در ادامه، نتایج حاصل از به‌کارگیری هر یک از این روش‌ها بر عملکرد چاه، افت فشار ناشی از استفاده هر روش در چاه و حساسیت‌سنجی نسبت به پارامترهای مختلف، بررسی و مقایسه شده و مناسب‌ترین روش برای تکمیل چاه، معرفی گردیده است.

واژه‌های کلیدی رشته تکمیل، عملکرد چاه، بهینه‌سازی، آنالیز نودال، روش تکمیل

واژه‌های کلیدی

مقدمه

از میان پارامترهای یاد شده، اندازه لوله مغزی از اهمیت خاصی برخوردار است و باید به‌طور صحیح تعیین شود. زیرا در صورتی که اندازه لوله مغزی کوچک‌تر از مقدار بهینه باشد، افت فشار ناشی از اصطکاک افزایش یافته و در صورت بزرگ‌تر بودن نیز، میزان لغزش زیاد می‌شود. این امر ممکن است به Load up و کشته‌شدن چاه بیانجامد [۳].

برنامه‌ریزی برای یک عملیات تکمیل چاه، از مرحله تئوری تا نصب تجهیزات، فرآیندی بسیار پیچیده است و شامل چندین فاز مجزا می‌باشد. در این شرایط باید عوامل زیادی مد نظر قرار گیرد؛ هرچند در بیشتر حالات، ممکن است به تعداد زیادی از آن‌ها توجه لازم نشود. صرف‌نظر از میزان پیچیدگی طراحی روش‌های تکمیل چاه، طی این فرآیند باید اصول اساسی و مورد نیاز هر یک از روش‌ها نیز مد نظر گرفته شود؛ یعنی یک سیستم تکمیل چاه باید نهایتاً به تولید (یا تزریق) ایمن، کارآمد و مقرون به صرفه منجر گردد.

تأثیر اقتصادی طراحی و نصب رشته تکمیل غیربهینه دارای اهمیت زیادی است؛ از این رو باید به طراحی و فرآیند مهندسی عملیات تکمیل چاه توجه شود. به‌عنوان نمونه، تأخیر در آغاز دوره بازگشت سرمایه<sup>۲</sup> چاه‌ها نشان می‌دهد که چگونه طراحی یا عملکرد غیربهینه رشته تکمیل بر تحقق اهداف کاری تأثیر می‌گذارد. هر چند کاهش هزینه‌های نصب و تسریع در راه‌اندازی جزء اهداف مهم کاری است، اما اهداف دیگری از قبیل سودهی بلند مدت نیز نباید نادیده گرفته شود (شکل ۱). لازم به ذکر است که کاربرد روش‌های

هر سیستم تکمیل باید سه شرط اصلی ایمنی، کارآمدی و اقتصادی بودن را دارا باشد [۱]. انتخاب مواد، تجهیزات و تکنیک‌های مربوط به مهندسی و نصب تجهیزات تکمیل درون چاهی باید بر اساس بررسی فاکتورهای مؤثر بر مخزن، چاه و سیستم تولید صورت گیرد. برای انواع روش‌های تکمیل، طبقه‌بندی‌های مختلفی وجود دارد. بر اساس فصل مشترک بین چاه و مخزن، دو نوع روش تکمیل حفزه‌باز و تکمیل با لوله جدار به‌کار گرفته می‌شود. روش تولید نیز به دو نوع تکمیل چاه‌های با جریان طبیعی و تکمیل چاه‌های با فراآوری مصنوعی تقسیم می‌گردد و تکمیل، بسته به ناحیه تولید، یگانه و چندگانه خواهد بود. روش تکمیل مناسب بر اساس دبی تولیدی، خواص سازند تولیدی، خواص سیال تولیدی، فشار چاه و عمق و موقعیت آن تعیین می‌شود [۲]. بهینه‌سازی تولید، نیازمند شناخت سیال مخزن و پارامترهای تأثیرگذار بر میزان سیال تولیدی و طراحی بهینه هر یک اجزای خط تولید، حفزه چاه، تکمیل و بخش مخزن می‌باشد. این فرآیند از طریق بهینه‌سازی سیستم تکمیل، شناسایی موانع یا فاکتورهای محدودکننده تولید و تعیین روش‌های افزایش بازدهی تولید قابل انجام است. برای بهینه‌سازی عملکرد چاه از روش آنالیز نودال استفاده می‌شود. بهینه‌کردن عملکرد جریان چاه شامل بررسی پارامترهای ذیل است:

۱. اندازه لوله مغزی و خط لوله جریان
۲. اندازه کاهنده سطحی و شیر ایمنی درون چاهی
۳. دانسیته مشبک کاری
۴. طول فاصله مشبک کاری
۵. طراحی گراول پک
۶. طراحی فراآوری مصنوعی

<sup>1</sup> khamehchi@aut.ac.ir

<sup>2</sup> hrasouli@aut.ac.ir

<sup>3</sup> Payout



پیچیده و پرهزینه ممکن است منجر به بازگشت سرمایه بیش تر در طول دوره زمانی طولانی تر شود. علاوه بر این، پی آمد طراحی نامناسب می تواند اثرات نامطلوبی از قبیل نیاز به نصب زود هنگام تجهیزات Velocity String یا فراآوری مصنوعی داشته باشد [۴].

باید توجه داشت که همواره کم هزینه ترین روش، مناسب ترین روش تکمیل چاه نیست؛ چراکه ممکن است انتخاب نامناسب، به هزینه های تعمیر و نگهداری بیش تر و مجدد منجر گردد. به این ترتیب در انتخاب روش مناسب تکمیل چاه باید به موارد ذیل دقت کرد:

۱. چگونگی مقایسه هزینه های تعمیر و نگهداری با سود مورد انتظار (هزینه های یک میدان بزرگ که دارای چاههایی با تولید بالاست دارای ضمانت بازگشت بیش تری نسبت به یک میدان کوچک با دبی غیراقتصادی است).

۲. برآورد مشکلات احتمالی روش مورد نظر و برآورد ریسک هزینه های سرمایه گذاری

۳. برآورد نرخ تولید و توسعه میدان مورد نظر به لحاظ تئوری و این که روش تکمیل چاه چگونه باشد که نیازهای چاه را در زمان حال پاسخ دهد و در آینده نیز بتوان با اعمال تغییرات جزئی در آن، بهره لازم را به دست آورد [۵].

#### ۱- معرفی روش های اصلی تکمیل چاه های دارای مشکل تولید ذرات سازندی

روش های مختلفی برای کنترل تولید ذرات سازندی وجود دارد که متداول ترین آن ها عبارتند از:

۱. روش آستری شکافدار

۲. Wire- Wrapped Screen

۳. Pre-Packed Screen

۴. گراول پک

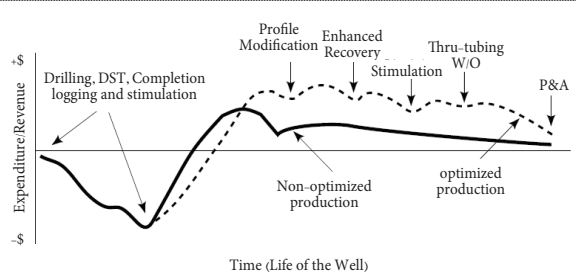
#### ۱-۱- آستری شکافدار

آستری شکافدار با الگوهای متنوعی ساخته می شود. این الگوها در شکل ۲ نشان داده شده اند. کمترین عرض شکافی که در این روش می تواند ایجاد شود، حدود ۰/۰۱۲ اینچ است.

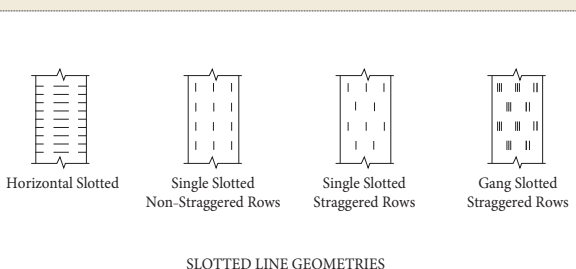
عمده مزیت آستری شکافدار، کم هزینه بودن آن است؛ ولی نسبت به روش های دیگر، مساحت جریان یافته کوچک تری دارد و در طول تولید با افت فشارهای بیش تری مواجه می شود.

از بین الگوهای نشان داده شده، معمولاً الگوی تک شکاف نامتقارن<sup>۴</sup> ترجیح داده می شود؛ زیرا در این الگو، استحکام و مقاومت اولیه لوله به میزان بیش تری حفظ می شود. الگوی نامتقارن، اغلب در طول مساحت سطح لوله، توزیع یکنواخت تری از شکاف ها را ارائه می دهد. معمولاً آستری های شکافدار به گونه ای طراحی می شوند که نسبت به قطر خارجی سطح لوله، ۳ درصد مساحت باز داشته باشند. البته در برخی موارد مساحت های باز به ۶ درصد نیز می رسند.

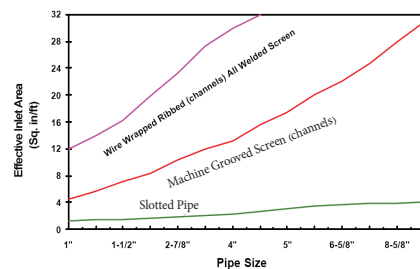
<sup>4</sup> single slot staggered



۱ | تأثیر سیستم تکمیل غیر بهینه [۴]

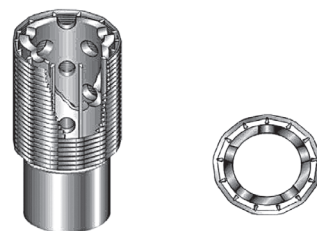


۲ | الگوهای مختلف آستری شکافدار [۶]



COMPARISON OF EFFECTIVE INLET AREAS (20 GAUGE SCREEN)

۳ | مقایسه مساحت جریان یافته Wire Wrapped Screen و آستری شکافدار



۴ | شماتیک Wire Wrapped Screen [۶]



### ۲-۱. روش Wire- Wrapped Screens

Wire Wrapped Screen یکی دیگر از روش‌هایی است که برای نگه‌داشتن گراول‌ها در فضای آنولوس بین تورسیمی و سازند به کار گرفته می‌شود. مزیت Wire Wrapped Screen نسبت به آستری شکافدار، سطح جریانی بیش‌تر آن است؛ این موضوع در شکل ۳ نشان داده شده است.

کم‌ترین اندازه شکاف برای Wire Wrapped Screen حدود  $0.006$  اینچ می‌باشد. در این روش به دور لوله اصلی یا همان آستری شکافدار، سیم‌های مقاومی به‌صورت فشرده (مرتب و کنار هم) می‌پیچند و بین سیم‌پیچ و آستری، فاصله گذارهایی<sup>۵</sup> نیز در نظر می‌گیرند تا سطح تولید بالا رود و به‌منظور غربال بهتر، اختلاف فشار بیش‌تری ایجاد شود. در شکل ۴، نمایی از روش Wire Wrapped screen ارائه شده است [۶، ۷].

### ۳-۱. روش Pre-Packed Screen

این روش برای جلوگیری از عبور ذرات ریز ماسه به خط تولید، به‌صورت صفحه‌ای<sup>۶</sup> ایمن عمل می‌کند. در این روش علاوه بر سیم‌پیچ کردن آستری، یک پک<sup>۷</sup> از جنس آهن اسفنجی نیز به‌صورت غلافی بر روی سیم‌پیچ می‌کشند و بار دیگر روی آن را با یک سیم ضخیم‌تر و مقاوم‌تر سیم‌پیچی می‌کنند. این روش، تکنولوژی جدیدتری است و استفاده از آن، تولید هرگونه شنی را ناممکن می‌سازد. شکل ۵ نمایی از این اسکرین را نشان می‌دهد [۶].

### ۴-۱. روش گراول پک

گراول پک، یک فیلتر دانه دانه با نفوذپذیری بسیار بالا (حدود ۲۰ داری) است که از ورود شن‌های سازند به داخل چاه جلوگیری می‌نماید. این روش از دهه ۱۹۳۰ در صنعت نفت مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، یک محلول دوغابی از گراول‌هایی با سایز مشخص را به همراه یک سیال حمل‌کننده، به فضای حلقوی بین صافی و لوله جداری مشبک‌کاری شده پمپ می‌کنند. گراول‌های موجود در تونل مشبک‌ها، افت فشاری را که بر قابلیت تولید تأثیر زیادی دارد، افزایش می‌دهند. این روش دارای اشکالات و معایبی است؛ از جمله این‌که در طول نصب، سیال حمل‌کننده به داخل سازند نفوذ کرده و به تراوایی سازند آسیب می‌رساند و تولید را محدود می‌کند. گراول پک، قطر مؤثر دهانه چاه‌ها را نیز کاهش می‌دهد؛ از این‌رو، روش کنترل تولید شن را پرهزینه می‌سازد.

البته با وجود این معایب، روش بسیار مفیدی در جلوگیری از حرکت شن‌ها و تولید آن‌هاست و امروزه، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. نکته اساسی، انتخاب صحیح مایعی است که گراول، توسط آن به محل مورد نظر ریخته می‌شود. مایعات دارای گرانشی کم‌تر از یک، گراول فشرده‌تری ایجاد می‌کنند. آب نمک و نفت، مایعات مناسبی برای این منظور هستند و در سازندهای رسی نیز می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. غلظت گراول در مایع باید  $120-60 \text{ kg/m}^3$  و میزان دبی پمپ نیز  $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$  باشد. باید تلاش شود

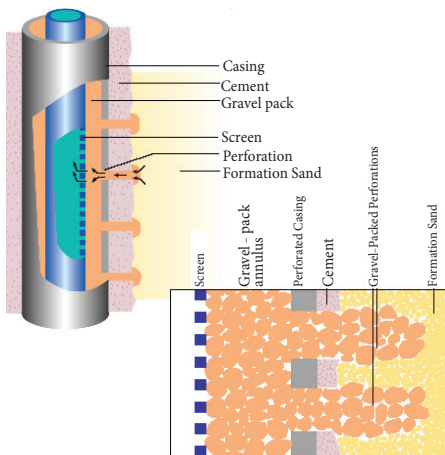
<sup>5</sup> Spacer

<sup>6</sup> Screen

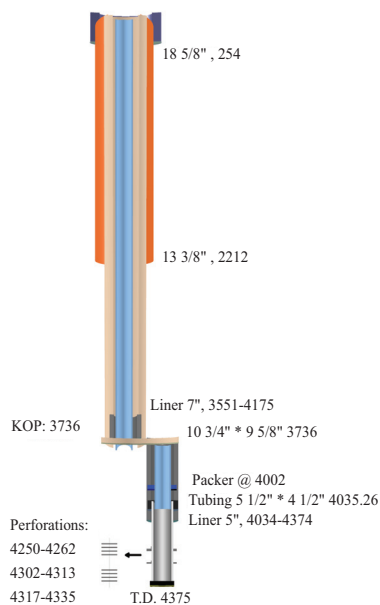
<sup>7</sup> Pack



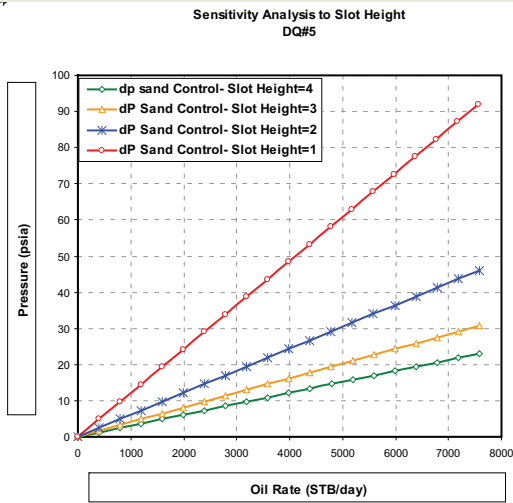
شکل ۵ | شماتیک Pre-Packed Screen [۶]



شکل ۶ | چگونگی قرار گرفتن گراول پک در چاه [۸]



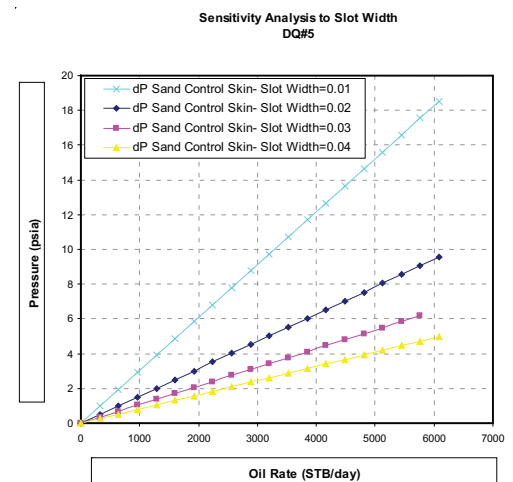
شکل ۷ | شمای درونی چاه



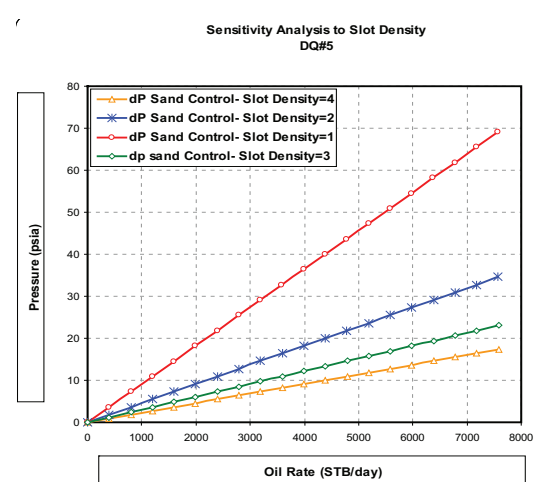
شکل ۱۰ | حساسیت سنجی نسبت به ارتفاع شکاف در حالت استفاده از آستری شکافدار



شکل ۸ | منحنی های IPR و افت فشارهای مختلف در حالت استفاده از آستری شکافدار



شکل ۱۱ | حساسیت سنجی نسبت به عرض شکاف در حالت استفاده از آستری شکافدار



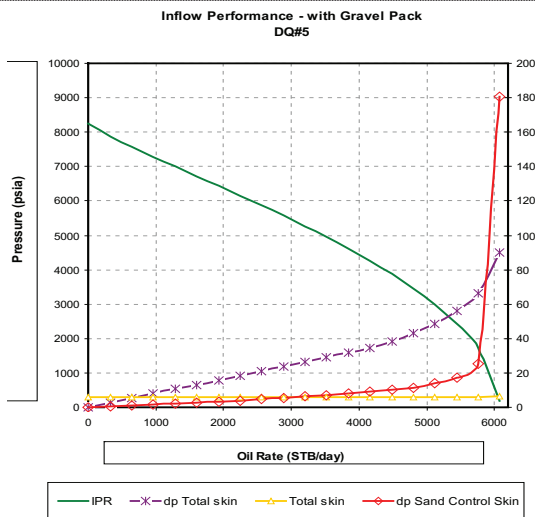
شکل ۹ | حساسیت سنجی نسبت به دانسیته ایجاد شکاف در حالت استفاده از آستری شکافدار

تا مایع مورد نظر تمیز باشد، در غیر این صورت به سازند آسیب خواهد رسید و کانال‌های سازند بسته خواهند شد. برای این منظور، بهتر است که مایع از فیلتر عبور داده شود. با پر کردن فضای بین لوله آستری و سازند به وسیله ریگ، باید از هرگونه حرکت ماسه در داخل سازند و به طرف چاه جلوگیری نمود. کنترل ماسه توسط گراول پک، در چاه‌های باز و جداره گذاری شده امکان پذیر است. اما نتایج آن در چاه‌های حفرة باز چندان جالب نیست. شکل ۶ نمایی از چگونگی قرار گرفتن گراول پک را در چاه نشان می‌دهد.

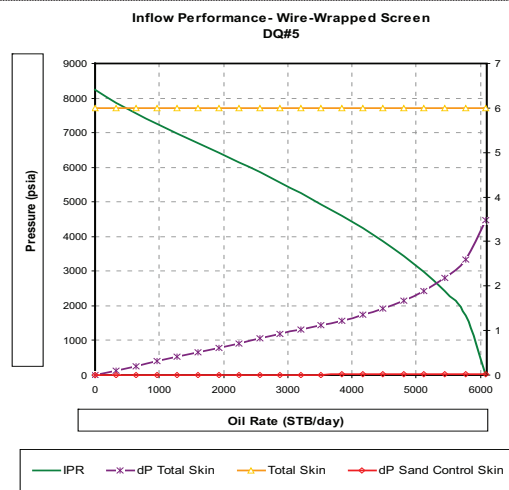
یکی از مشکلات مهم به کارگیری گراول پک در چاه‌های جداره گذاری شده، مسدود شدن مشبک‌هاست؛ زیرا مایع همراه ریگ باید از درون این روزنه‌ها عبور کند و در صورتی که روزنه‌ها توسط تکه‌های فلزی یا سنگ سازند گرفته

جدول ۱ | مشخصات عمومی چاه مورد مطالعه

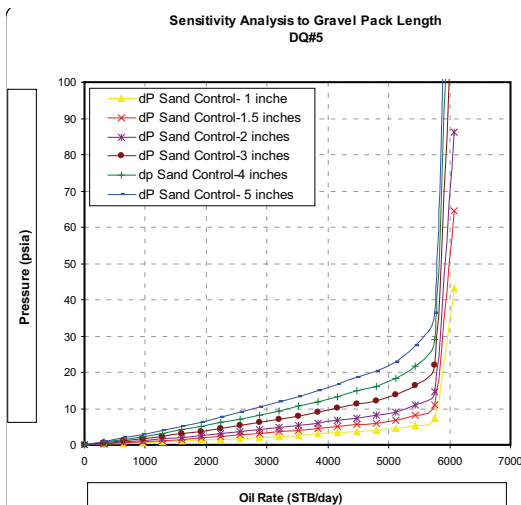
چاه توصیفی	...	نوع چاه
عمودی	...	پروفایل چاه
۵	m	ارتفاع از سطح زمین
۱۳	m	RT-MSL
۴۳۷۵	MD	عمق نهایی
۵۱/۹۱	m	عمق شیر ایمنی
۴۸/۹۰	m	ضخامت سازند
۰/۱۵	...	تخلخل متوسط سازند
$1/394 \times 10^{-5}$	psi <sup>-1</sup>	تراکم کل سیستم
۰/۰۵۴۳	m	شعاع چاه



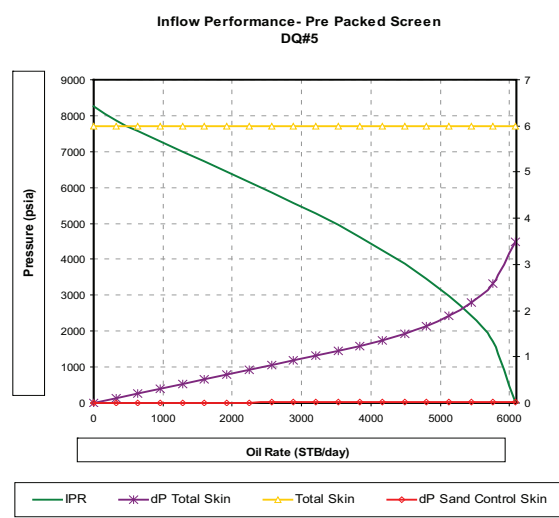
شکل ۱۴ | منحنی های IPR و افت فشارهای مختلف در حالت استفاده از گراول پک



شکل ۱۲ | منحنی های IPR و افت فشارهای مختلف در حالت استفاده از Wire Wrapped Screen



شکل ۱۵ | نتایج حساسیت سنجی نسبت به طول گراول پک



شکل ۱۳ | منحنی های IPR و افت فشارهای مختلف در حالت استفاده از Pre Packed Screen

یکی از چاه‌های نفتی میدین جنوب ایران مورد مطالعه قرار گرفت. در جدول ۱، مشخصات عمومی چاه مورد نظر ارائه شده است. برای انجام این بررسی، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Prosper، چاه مورد مطالعه در حالت طبیعی شبیه‌سازی و آنالیز گردید. سپس هر یک از روش‌های یاد شده، در چاه قرار داده شد و نتیجه مربوط به استفاده از آن‌ها بر عملکرد چاه، میزان افت فشار ناشی از به‌کارگیری هر روش و همچنین حساسیت‌سنجی نسبت به پارامترهای مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۷، شمای درونی چاه مورد بررسی آورده شده است.

در این مطالعه، برای انجام محاسبات از روش آنالیز نودال استفاده گردیده است. باید در نظر داشت که در محاسبات مربوط به چاه، خود چاه

باشند، مایع امکان جاری شدن از طریق روزنه‌ها را نخواهد داشت. بنابراین لازم است که روزنه‌ها کاملاً تمیز و شسته شوند. قبل از آغاز عملیات، روزنه‌ها توسط دستگاه Cup-Type Perforation Wash Tool شستشو داده می‌شوند و محل مورد نظر نیز توسط سیالات مناسب، کاملاً تمیز می‌گردد.

یک روش پیچیده برای دوام توده گراول، رسم نمودار بازدهی چاه با استفاده از شبیه‌ساز مخزن و پیش‌بینی حرکت شن‌ها و چگونگی تأثیر آن‌ها بر افت فشار است [۸، ۹، ۱۰].

## ۲. مطالعه موردی

برای بررسی نتایج مربوط به به‌کارگیری هر یک از روش‌های یاد شده،



نتایج به دست آمده از مدل سازی چاه با انواع روش های مربوط به جلوگیری از تولید ذرات سازندی به شرح ذیل است:

#### ۱. میزان افت فشار ناشی از Total Skin:

Wire Wrapped Screen ≈ Pre Packed Screen ≈ گراول پک > آستری شکافدار

#### ۲. میزان افت فشار ناشی از Sand Control Skin:

Pre Packed Screen > Wire Wrapped Screen > گراول پک > آستری شکافدار

#### ۳. میزان دبی تولیدی چاه ها:

میزان دبی تولیدی چاه ها در روش های مختلف جلوگیری از تولید ذرات سازندی، مطابق جدول ۲ است.

#### ◆ نتیجه گیری

در این مطالعه، روش های مختلف کنترل تولید ذرات سازندی در یکی از چاه های نفتی ایران که با مشکل تولید ذرات سازندی مواجه بود، شبیه سازی و آنالیز گردید و نسبت به پارامترهای مختلف هر یک از روش ها، حساسیت سنجی انجام شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که میزان افت فشار ناشی از به کارگیری آستری شکافدار، بیش تر از سایر روش هاست. از طرف دیگر با توجه به نتایج حساسیت سنجی، مشخص گردید که افزایش دانسیته ایجاد شکاف، ارتفاع شکاف و عرض شکاف در آستری شکافدار، میزان افت فشار را کاهش خواهد داد. اما در روش گراول پک با افزایش طول گراول پک، میزان افت فشار افزایش می یابد.

#### ◆ منابع

- [1] Mukherjee.H, Schlumberger.D, "Well Completion and Production", June 1991.
- [2] Beggs, Howard Dale, "Production optimization using NODAL analysis", OGCI Publications, 2003.
- [3] Boyun Guo, William C. Lyons, Ali Ghalambor, "Petroleum Production Engineering", Elsevier Science & Technology Books, February 2007.
- [4] Schlumberger. D, "Completion Design and Engineering", December 1996.
- [5] Heriot-Watt University, "Production and Downhole Completion Engineering", 2002.
- [6] "Completion Technology for unconsolidated formations", Rev. 2 / June 1995.
- [7] Spurlock, J.W. and Demski, D.B.: "A new approach to the sand control problem-A multi-layer, wire-wrapped sand screen," SPE 4014, prepared for the 47th annual fall meeting of the society of petroleum engineers of AIME, San Antonio, Texas, Oct. 8-11, 1972.
- [8] www.oilfield.slb.com.
- [9] Saucier, R.J.: "Considerations in gravel pack design," SPE 4030, journal of Petroleum Technology, February 1974, pp. 205-212.
- [10] Lee, C.C., Darby, M.C. and Popp, T.R.: "Effective thru tubing gravel pack methods in attaka field," SPE 72132, prepared for the presentation at the SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference held in Kuala Lumpur, Malaysia, Oct. 8-9, 2001.

تنها بخشی از سیستم تولید است. تولید از مخزن نیازمند عبور سیال از سنگ مخزن و لایه های تولیدی و ورود آن به چاه، پیمودن ستون چاه و ورود به سیستم جمع آوری پس از عبور از تسهیلات سر چاهی است. مجموعه سازند تولیدی در قسمت متبک کاری شده چاه، رشته تکمیلی، ادوات کنترل سر چاهی، تسهیلات سطح الارضی و سیستم جمع آوری، همگی "سیستم تولید" نامیده می شوند. هر کدام از این قسمت ها تأثیر مشخصی بر تولید دارند. در این مطالعه، سیستم تولید در نظر گرفته شده شامل ستون چاه است. در ادامه، نتایج مدل سازی این روش ها ارایه می شود.

#### ۲-۱. نتایج مدل سازی چاه DQ-5

##### ۱-۱-۲. نتایج مدل سازی با آستری شکافدار

در شکل ۸ منحنی عملکرد چاه و هم چنین تغییرات افت فشار ناشی از اثر پوسته مربوط به آستری شکافدار و اثر پوسته کلی نشان داده شده است. در شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱، نتایج مربوط به حساسیت سنجی نسبت به دانسیته ایجاد شکاف، ارتفاع شکاف و عرض شکاف برای آستری شکافدار ارایه شده است. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، با افزایش دانسیته ایجاد شکاف و ارتفاع شکاف، میزان افت فشار کاهش می یابد. افزایش عرض شکاف، نیز اثر مشابهی داشته و باعث کاهش افت فشار می گردد.

##### ۲-۱-۲. نتایج مدل سازی با استفاده از روش Wire-Wrapped Screen

در شکل ۱۲، منحنی عملکرد چاه و هم چنین تغییرات افت فشار ناشی از اثر پوسته مربوط به Wire-Wrapped Screen و اثر پوسته کلی نشان داده شده است.

##### ۲-۱-۳. نتایج مدل سازی توسط روش Pre-Packed Screen

در شکل ۱۳ نیز منحنی عملکرد چاه و هم چنین تغییرات افت فشار ناشی از اثر پوسته مربوط به Pre-Packed Screen و اثر پوسته کلی ارایه شده است.

##### ۲-۱-۴. نتایج مدل سازی با استفاده از روش گراول پک

شکل ۱۴، منحنی عملکرد چاه و تغییرات افت فشار ناشی از اثر پوسته مربوط به گراول پک و اثر پوسته کلی را ارایه می کند. برای بررسی اثر تغییرات طول گراول پک بر میزان افت فشار، نسبت به این پارامتر حساسیت سنجی شده و نتایج آن در شکل ۱۵ آورده شده است. با توجه به شکل، با افزایش طول گراول پک، میزان افت فشار افزایش می یابد.

۲ | میزان دبی تولیدی چاه ها در روش های مختلف جلوگیری از تولید ذرات سازندی

	Solution Point Rate (STB/Day)			گراول پک
	آستری شکافدار	Wire Wrapped Screen	Pre Packed Screen	
DQ-5	۲۸۱۴	۲۸۲۳	۲۸۲۳	۲۸۱۹
DQ-6	۱۰۳۵۸	۱۰۵۵۰	۱۰۵۵۰	۱۰۵۵۰
DQ-9	۹۲۱۲	۹۵۹۰	۹۵۹۰	۹۵۹۰