

Research Paper

Simulation and Study of the Effect of the Length of the Completed Zone in Horizontal Wells on the Phenomenon of Water Coning with a Focus on Identifying Optimal Well Completion Conditions

Arsalan Taznabi¹, Mohammad Amin Gholamzadeh^{2*}, Mohammadreza Asghariganjeh³

1 Department of Engineering, Petroleum and Energy Research Center, Om. C., Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

2 Department of Engineering, Petroleum and Energy Research Center, Om. C., Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

3 Department of Chemistry, Om. C., Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

Use your device to scan and read the article online



Keywords:

Water Coning Phenomenon, Horizontal Well, Well Completion Zone Length, Simulation, Water Cut Percentage

Abstract

The phenomenon of water coning represents the mechanism of water entering the lower parts of oil formations into oil production wells. The phenomenon of water coning will have a significant impact on reducing the rate of well utilization and production, followed by a decrease in the rate of discharge and, as a result, the overall recovery efficiency of oil reservoirs. This phenomenon is also one of the most important and fundamental issues and problems in oil wells, which has a great impact on final production, increasing operating costs, and also creating environmental problems.

This article simulates and studies the effect of the length of the completed area in horizontal wells on the phenomenon of water coning, focusing on identifying the optimal conditions for well completion in an oil field using Eclipse software. For this purpose, initial field data including geological, petrophysical, and reservoir information are used as software inputs, and this phenomenon is simulated in the field. In this study, the effect of the length of the completed area in the field on the amount of produced water cut has been evaluated. The results of this study show that increasing the length of the completed area in horizontal wells leads to a decrease in the percentage of produced water cut. For example, in a well with a fixed length, increasing the length of the completed area from 300 to 600 feet has caused a decrease in the percentage of water cut, and this pattern has also been observed in wells with lengths of 9000 and 12000 feet.

Corresponding author: Mohammad Amin Gholamzadeh

Email: m.a.gholamzadeh@iau.ir

DOI: <https://doi.org/10.82281/jnec.2025.1208597>

مقاله پژوهشی

شبیه سازی و مطالعه تاثیر طول ناحیه تکمیل شده در چاه های افقی بر پدیده مخروطی شدن آب با تمرکز بر شناسایی شرایط بهینه تکمیل چاه

ارسلان تازنابی^۱، محمدمبین غلامزاده^{۲*}، محمدرضا اصغری گنجه^۳

۱. گروه فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات نفت و انرژی، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

۲. گروه فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات نفت و انرژی، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

۳. گروه شیمی، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

چکیده

پدیده مخروطی شدن آب، بیانگر مکانیسم ورود آب موجود در بخش های پایین سازندهای نفتی به چاه های تولید نفت می باشد. پدیده مخروطی شدن تاثیر بسزایی در کاهش میزان بهره دهی و تولید از چاه ها و به دنبال آن کاهش میزان تخلیه و در نتیجه راندمان بازیافت کلی مخازن نفتی خواهد داشت. همچنین این پدیده یکی از اصلی ترین و اساسی ترین مسائل و مشکلات در چاه های نفتی است که بر تولید نهایی، افزایش هزینه های عملیاتی و نیز ایجاد مشکلات زیست محیطی تاثیر فراوانی دارد.

این مقاله به شبیه سازی و مطالعه تاثیر طول ناحیه تکمیل شده در چاه های افقی بر پدیده مخروطی شدن آب با تمرکز بر شناسایی شرایط بهینه تکمیل چاه در یک میدان نفتی با استفاده از نرم افزار اکلیپس پرداخته است. برای این منظور، داده های اولیه میدان شامل اطلاعات زمین شناسی، پتروفیزیکی و مخزنی به عنوان ورودی های نرم افزار به کار گرفته شده و شبیه سازی این پدیده در میدان انجام شده است. در این پژوهش، اثر عامل طول ناحیه تکمیل شده در میدان بر میزان برش آب تولیدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می دهد که افزایش طول ناحیه تکمیل شده در چاه های افقی منجر به کاهش درصد برش آب تولیدی می شود. به عنوان مثال، در چاهی با طول ثابت، افزایش طول ناحیه تکمیل شده از ۳۰۰ به ۶۰۰ فوت باعث کاهش درصد برش آب شده است، و این الگو در چاه هایی با طول های ۹۰۰ و ۱۲۰۰ فوت نیز مشاهده شده است.

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



واژه های کلیدی:

پدیده مخروطی شدن آب، چاه افقی، طول ناحیه تکمیل چاه، شبیه سازی، درصد برش آب

* نویسنده مسوول: محمدمبین غلامزاده

پست الکترونیکی: m.a.gholamzadeh@iaui.ir

DOI: <https://doi.org/10.82281/jnec.2025.1208597>

مقدمه

پدیده مخروطی‌شدن آب، بیانگر مکانیسم ورود آب موجود در بخش‌های پایین سازندهای نفتی به چاه‌های تولید نفت می‌باشد، یکی از مسائل و مشکلات مهم و رایج در تولید نفت از چاه‌های تولیدی بوده که بیش از آنچه تصور می‌شود در میادین نفتی و چاه‌های تولیدی شایع است [۱].

در پدیده مخروطی‌شدن، آب از پایین لایه‌های مشبک‌کاری شده وارد چاه تولیدی می‌شوند. این پدیده تاثیر بسزایی در کاهش میزان بهره‌دهی و تولید از چاه‌ها و به دنبال آن کاهش میزان تخلیه و در نتیجه راندمان بازیافت کلی مخازن نفتی خواهد داشت. پدیده مخروطی‌شدن در اثر حرکت سیالات در جهتی که حداقل مقاومت وجود دارد ایجاد می‌شود. به طور معمول این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که یک چاه با دبی تولید بالایی تولید می‌شود و از اینرو عاملی است که سبب محدود کردن دبی تولید نفت از چاه می‌گردد. پیش از شروع تولید از مخزن، سیالات مخزنی تحت شرایط تعادل قرار دارند اما با شروع تولید، در همه جهات گرادیان غیریکنواخت فشار ایجاد می‌شود [۲]. با افزایش سرعت سیال و هدر رفتن انرژی مخزن، تغییر توزیع سطح تماس آب و نفت در مخازن نفتی روی می‌گردد و آب می‌تواند به طرف محدوده مشبک‌کاری شده جریان یابد. مدت زمانی که طول می‌کشد تا آب به محدوده مشبک‌کاری شده و تولیدی چاه برسد، زمان میان‌شکنی نام دارد. به زمانی که مخروط آب هنوز به چاه نرسیده باشد، دوره زیر بحرانی گفته می‌شود. با رسیدن مخروط آب به انتهای چاه دوره بحرانی آغاز می‌گردد و هنگامی که این مخروط دهانه چاه را فراگرفت، دوره فوق بحرانی نامیده می‌شود. به طور معمول در توزیع جریانی سیالات در اطراف دیواره چاه سه نوع نیرو دخالت دارند [۳]:

نیروهای موینگی

نیروهای گرانشی یا ثقلی

نیروهای ویسکوز یا دینامیک

در پدیده مخروطی‌شدن، نیروهای دینامیکی (ویسکوز) رو به بالا که در نتیجه افت فشار در دهانه چاه بوجود می‌آیند، باعث حرکت رو به بالای آب تا ارتفاعی که با نیروی وزن آب برابر شود، می‌گردند. با دور شدن از دهانه چاه در جهت شعاعی و به علت کاهش اثر نیروهای رو به بالای دینامیکی، ارتفاع نقطه تعادل میان این نیرو و نیروی وزن آب کاهش یافته و در نتیجه مکان هندسی نقاط تعادل، در سطح تماس آب و نفت شکل مخروطی به خود می‌گیرد [۴]. لازم به توضیح است که پارامترهای تاثیرگذار بر پدیده مخروطی‌شدن آب به چهار گروه اصلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از [۵]:

پارامترهای مربوط به سیالات مخزن (اختلاف دانسیته، نسبت ویسکوزیته و ...)

پارامترهای مربوط به سنگ (نسبت نفوذپذیری و ...)

پارامترهای مشترک میان سنگ و سیال (ترشوندگی ...)

پارامترهای چاه و مخزن (دبی تولید و ...)

۲. روش پژوهش

میدان مورد مطالعه:

میدان نفتی مورد مطالعه متشکل از ده زون مختلف بوده که جزئیات اولیه این میدان در جدول شماره (۱) آورده شده است.

جدول ۱- اطلاعات میدان مورد مطالعه

۴۹/۴۷	دانسیته نفت (پوند بر فوت مکعب)
۷۲/۷۳	دانسیته آب (پوند بر فوت مکعب)
۳۱۵۶	فشار نقطه حباب (پام)
۵۰۵۵	فشار اولیه مخزن (پام)
۳۲۰	ضخامت لایه نفتی (فوت)
۸۱	دمای مخزن (سانتیگراد)

خصوصیات سنگ و شکاف مخزن:

همانگونه که پیش از این اشاره شد، میدان مورد بررسی در این تحقیق شامل ده زون نفتی است که اطلاعات مربوط به خصوصیات سنگ آن در جدول شماره (۲) به طور خلاصه ارائه شده است. ویژگی‌های شکاف در این مخزن که یک مخزن شکاف‌دار است به این صورت است که

شکاف دارای تخلخلی معادل $4/23$ درصد با طول 7 فوت می‌باشد. ضمن آنکه این شکاف با تراوایی عمودی 1639 میلی‌داری و تراوایی افقی 485 میلی‌داری در مخزن گسترده شده است.

جدول ۲- اطلاعات سنگ مخزن

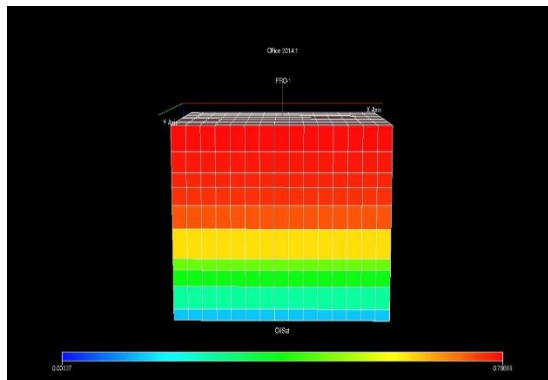
تراوایی (میلی‌داری)	تخلخل	ضخامت لایه (فوت)	زون
۱۱	۱۳/۵۰	۴۲	۱
۱۲	۱۲/۱۱	۳۴	۲
۱۷	۱۷/۲۸	۲۴	۳
۱۹	۱۳/۶۱	۲۹	۴
۱۱	۱۵/۵۱	۳۹	۵
۷	۱۱/۸۱	۴۹	۶
۱۶	۱۳/۶۲	۱۹	۷
۱۲	۱۵/۵۷	۲۷	۸
۱۴	۱۴/۲۳	۳۸	۹
۱۴	۱۳/۱۷	۱۹	۱۰

خصوصیات سفره آبد:

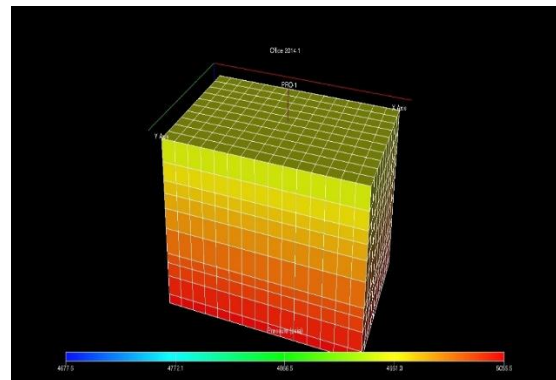
مشکل عمده تولید آب در این میدان، ناشی از پدیده مخروط‌شدگی آب است که به دلیل وجود سفره آبد در مخزن ایجاد شده است. وجود این سفره آبد باعث بالا آمدن سطح تماس بین آب و نفت شده و در نتیجه مخروط‌شدگی آب به وجود آمده است. ضخامت سفره آبد در این میدان 640 فوت، تخلخل آن $17/34$ درصد و تراوایی آن نیز $405/34$ میلی‌داری است.

شبیه‌سازی مخزن:

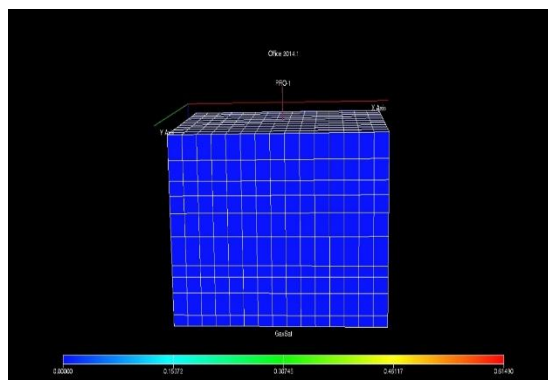
اشکال شماره (۱) تا (۶)، به‌طور دقیق مدل‌های ایجادشده توسط نرم‌افزار اکلیپس را در میدان مطالعه نمایش می‌دهند. مدل مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت سه‌بعدی با ابعاد $15 \times 10 \times 5$ ساخته شده است.



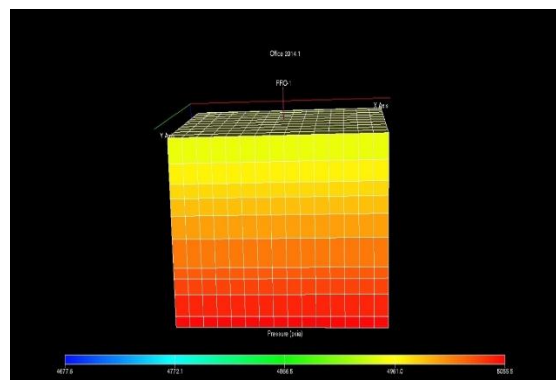
شکل ۲- مدل اشباع نفت



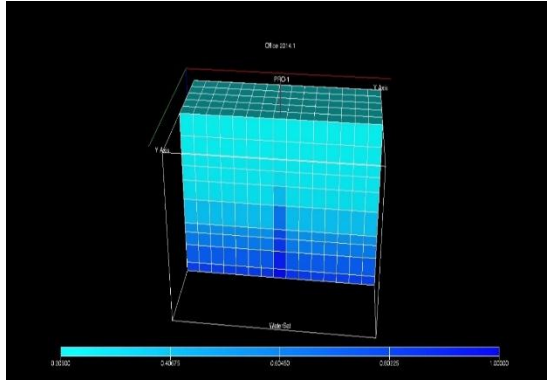
شکل ۱- توزیع فشار اولیه مخزن



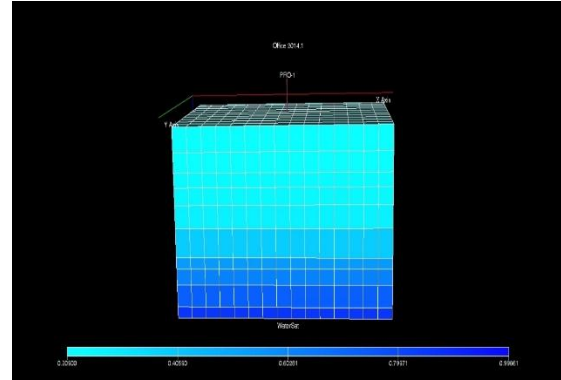
شکل ۴- مدل اشباع گاز



شکل ۳- مدل فشار مخزن



شکل ۶- مدل مخروط‌شدگی آب در چاه تولیدی



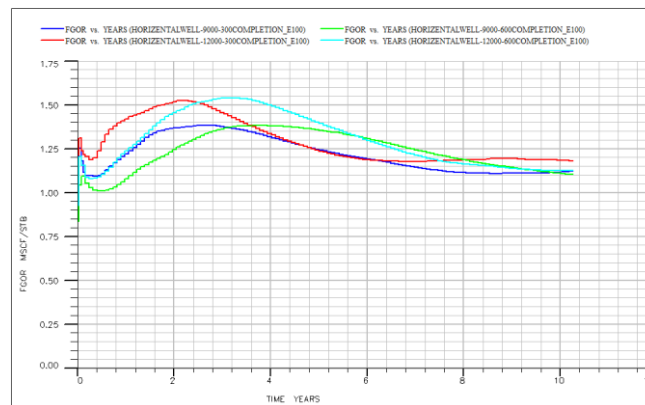
شکل ۵- مدل اشباع آب

سناریوی تولید:

به‌منظور بررسی اثر طول تکمیل چاه بر تولید آب از میدان، دو حالت تکمیل چاه به طول ۳۰۰ فوت و ۶۰۰ فوت مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این، با توجه تحقیقات گذشته و به نتایج مثبت حاصل از چاه‌هایی با طول ۹۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ فوت در تولید نفت و کاهش تولید آب، این دو حالت تکمیل نیز در شبیه‌سازی‌ها گنجانده شدند.

۳. تجزیه و تحلیل نتایج

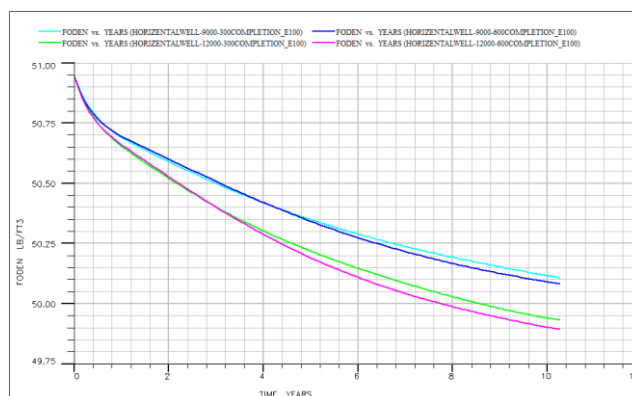
نمودار شماره (۱) تغییرات نسبت گاز به نفت تولیدی در این میدان را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، نسبت گاز به نفت تولیدی در میدان دو روند کاملاً متفاوت را از خود نشان می‌دهد. در ابتدای دوره تولید و تا پایان سال سوم، این نسبت به طور پیوسته افزایش می‌یابد و پس از آن روندی کاهشی به خود می‌گیرد. این الگوی تغییرات در تمامی حالت‌های مورد بررسی مشاهده شده است. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار این است که وقتی ناحیه تکمیل شده از ۳۰۰ فوت به ۶۰۰ فوت افزایش می‌یابد، نسبت گاز به نفت در ابتدا کم بوده و سپس بعد از رسیدن به نقطه حداکثر، به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش طول ناحیه تکمیل شده به ۶۰۰ فوت، نسبت گاز به نفت به طور کلی افزایش می‌کند. در نهایت، در پایان دوره تولید از این میدان، نسبت گاز به نفت تغییرات چندانی نداشته و در حدود ۱/۱۰ تا ۱/۲۰ میلیون فوت مکعب بر بشکه باقی می‌ماند.



نمودار ۱- تغییرات نسبت گاز به نفت تولیدی بر اساس طول ناحیه تکمیل شده متفاوت در چاه افقی

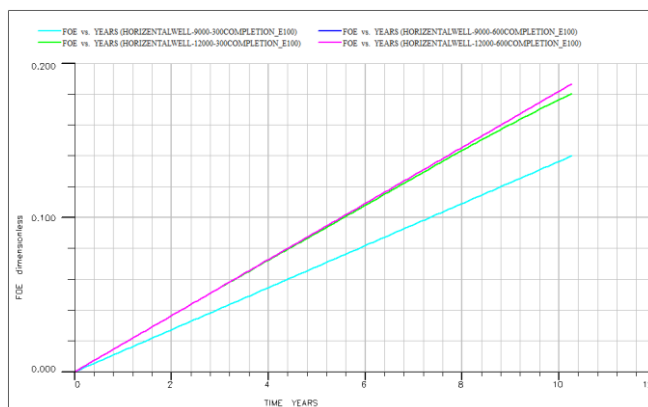
نمودار شماره (۲) تغییرات ویسکوزیته نفت میدان بر اساس ناحیه تکمیل شده مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص است، با افزایش ناحیه تکمیل شده از ۳۰۰ به ۶۰۰ فوت، ویسکوزیته نفت میدان نیز افزایش می‌یابد. این افزایش ویسکوزیته در هر دو حالت چاه افقی با طول ۹۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ فوت مشاهده شده است. از سوی دیگر، با گذشت زمان و افزایش مدت تولید به ۱۰ سال، ویسکوزیته نفت میدان روندی نزولی به خود می‌گیرد که این موضوع در تمامی سناریوهای بررسی شده صدق می‌کند. به طور کلی، در انتهای دوره تولید از میدان، ترتیب بیشترین به کمترین ویسکوزیته نفت به شرح زیر است: ابتدا برای حالت چاه با طول ۹۰۰۰ فوت و ناحیه تکمیل ۳۰۰ فوت،

سپس طول چاه ۹۰۰۰ فوت و تکمیل ۶۰۰ فوت، طول چاه ۱۲۰۰۰ فوت و تکمیل ۳۰۰ فوت، و در نهایت طول چاه ۱۲۰۰۰ فوت و تکمیل ۶۰۰ فوت. در پایان دوره تولید، کمترین و بیشترین ویسکوزیته نفت میدان به ترتیب برابر با ۴۹/۹۰ و ۵۰/۱۰ پوند بر فوت مکعب هستند.



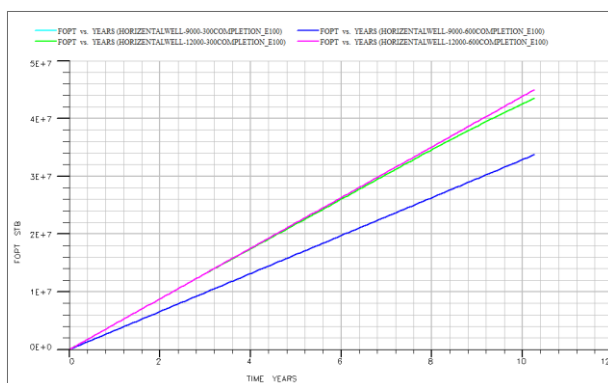
نمودار ۲- تغییرات دانسیته نفت میدان بر اساس طول ناحیه تکمیل شده متفاوت در چاه افقی

نمودار شماره (۳) تغییرات ضریب بازیافت نفت میدان را در سناریوهای مختلف این مطالعه نمایش می‌دهد. همانطور که از این نمودار برمی‌آید، با گذشت زمان از آغاز تولید، ضریب بازیافت نفت میدان افزایش یافته است. به‌طوری‌که در پایان سال دهم تولید، بیشترین مقدار نفت تولید شده و ضریب بازیافت نفت به بالاترین سطح خود رسیده است. بررسی دقیق‌تر داده‌های این نمودار نشان می‌دهد که طول ناحیه تکمیل شده تاثیر چندانی بر ضریب بازیافت نفت ندارد، به‌طوری‌که در هر دو حالت تکمیل چاه با طول‌های ۳۰۰ و ۶۰۰ فوت، ضریب بازیافت تقریباً مشابه است و در بهترین حالت تنها ۱ درصد تفاوت مشاهده می‌شود. نکته دیگر قابل توجه این است که تغییرات ضریب بازیافت نفت فقط در صورتی که طول چاه افقی تغییر کند، اندکی محسوس می‌شود. در این حالت، زمانی که از چاه افقی با طول ۹۰۰۰ فوت استفاده شود، ضریب بازیافت نفت برابر با ۱۴ درصد است، در حالی که در استفاده از چاه افقی با طول ۱۲۰۰۰ فوت، این مقدار به ۱۸ درصد می‌رسد، که نشان‌دهنده تاثیر مستقیم افزایش طول چاه افقی بر ضریب بازیافت نفت میدان است.



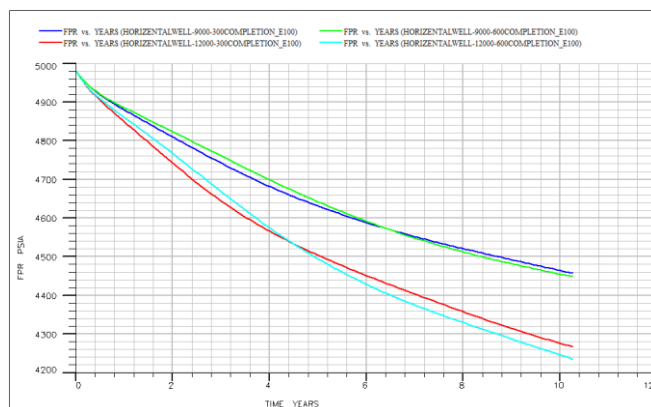
نمودار ۳- تغییرات ضریب بازیافت نفت میدان بر اساس طول ناحیه تکمیل شده متفاوت در چاه افقی

نمودار شماره (۴) تغییرات حجم کل نفت تولیدی از میدان را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. طبق این نمودار، با افزایش مدت زمان تولید از میدان، حجم کل نفت تولیدی به طور مستمر افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین مقدار نفت تولیدی در پایان سال دهم مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار این است که تغییرات طول ناحیه تکمیل شده تاثیر زیادی بر روی حجم کل نفت تولیدی ندارد؛ به عبارت دیگر، حجم نفت تولید شده در سناریوهای تکمیل چاه با طول ۳۰۰ و ۶۰۰ فوت تفاوت چندانی ندارد. اما، افزایش طول چاه افقی از ۹۰۰۰ به ۱۲۰۰۰ فوت به وضوح باعث افزایش حجم کل نفت تولیدی از میدان می‌شود. در سناریویی که چاه افقی به طول ۱۲۰۰۰ فوت و ناحیه تکمیل شده به طول ۶۰۰ فوت باشد، حجم کل نفت تولیدی حدود ۴۵ میلیون بشکه است، در حالی که در سناریوی دیگر که چاه افقی ۹۰۰۰ فوت و ناحیه تکمیل شده ۶۰۰ فوت دارد، حجم تولید حدود ۳۴ میلیون بشکه است. این تفاوت نشان‌دهنده تاثیر مستقیم افزایش طول چاه افقی بر میزان تولید کل نفت از میدان می‌باشد.



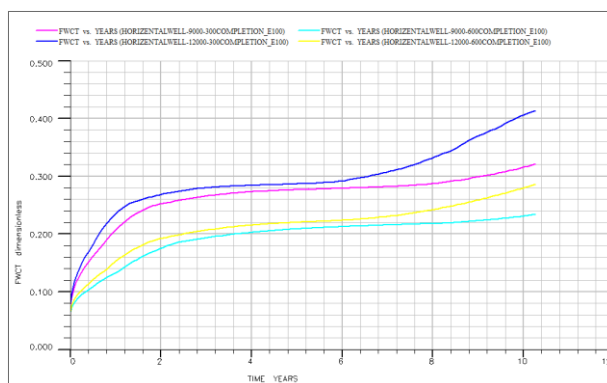
نمودار ۴- تغییرات حجم کل نفت تولید شده از میدان بر اساس طول ناحیه تکمیل شده متفاوت در چاه افقی

نمودار شماره (۵) تغییرات فشار متوسط مخزن بر اساس طول‌های مختلف ناحیه تکمیل شده در میدان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، با گذشت زمان از آغاز تولید، فشار متوسط مخزن کاهش می‌یابد، به طوری که فشار اولیه مخزن که در حدود ۵۰۰۰ پام است، در انتهای سال دهم به حدود ۴۲۰۰ پام در بدترین شرایط کاهش پیدا می‌کند. نکته قابل توجه در این نمودار این است که افزایش طول ناحیه تکمیل شده از ۳۰۰ به ۶۰۰ فوت تأثیر قابل توجهی بر کاهش فشار مخزن ندارد و تفاوت فشار متوسط مخزن در این دو حالت کمتر از چند پام است. به عنوان مثال، زمانی که طول چاه افقی برابر با ۹۰۰۰ فوت باشد، فشار نهایی مخزن در هر دو حالت تقریباً برابر با ۴۴۶۰ پام است. علاوه بر این، زمانی که طول چاه افقی به ۱۲۰۰۰ فوت افزایش می‌یابد، فشار متوسط مخزن در حالت تکمیل ۳۰۰ فوت برابر با حدود ۴۲۷۰ پام و در حالت تکمیل ۶۰۰ فوت برابر با ۴۲۳۵ پام است، که این تغییرات نشان‌دهنده تفاوت ناچیز بین این دو سناریو می‌باشد.



نمودار ۵- تغییرات فشار متوسط میدان بر اساس طول ناحیه تکمیل شده متفاوت در چاه افقی

نمودار شماره (۶) تغییرات درصد برش آب تولیدی از میدان در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، با گذشت زمان تولید، درصد برش آب تولیدی از میدان نیز به تدریج افزایش می‌یابد؛ به طوری که در پایان سال دهم تولید، این درصد در تمامی سناریوها به بیشترین مقدار خود می‌رسد. نکته مهم دیگر در این بخش، تاثیر افزایش طول ناحیه تکمیل شده از ۳۰۰ به ۶۰۰ فوت است که منجر به کاهش درصد برش آب تولیدی از میدان می‌شود. این کاهش در هر دو طول چاه افقی مشاهده گردیده است. علاوه بر این، با افزایش طول چاه افقی از ۹۰۰۰ به ۱۲۰۰۰ فوت، درصد برش آب تولیدی از میدان کاهش می‌یابد. در اینجا، کمترین درصد برش آب که حدود ۲۳ درصد است، مربوط به سناریویی با چاه افقی ۹۰۰۰ فوت و طول ناحیه تکمیل ۶۰۰ فوت می‌باشد. در مقابل، بیشترین درصد برش آب تولیدی که حدود ۴۱ درصد است، مربوط به چاه افقی با طول ۱۲۰۰۰ فوت و ناحیه تکمیل ۳۰۰ فوت می‌باشد.



نمودار ۶- تغییرات درصد برش آب تولیدی میدان بر اساس طول ناحیه تکمیل شده متفاوت در چاه افقی

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به شبیه‌سازی و مطالعه تاثیر طول ناحیه تکمیل‌شده در چاه‌های افقی بر پدیده مخروطی‌شدن آب با تمرکز بر شناسایی شرایط بهینه تکمیل چاه در یک میدان نفتی با استفاده از نرم‌افزار اکلپیس پرداخته شد. نتایج کلی این پژوهش عبارتند از: افزایش طول ناحیه تکمیل‌شده در چاه‌های افقی به‌طور مستقیم بر درصد برش آب تولیدی تأثیر می‌گذارد. در چاه افقی با طول ثابت، با افزایش طول ناحیه تکمیل‌شده از ۳۰۰ به ۶۰۰ فوت، درصد برش آب کاهش می‌یابد. این روند در هر دو طول چاه افقی ۹۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ فوت صادق است.

زمانی که طول ناحیه تکمیل‌شده ۳۰۰ فوت باشد، درصد برش آب تولیدی از میدان برای چاه افقی ۹۰۰۰ فوت برابر با ۳۲٪ و برای چاه افقی ۱۲۰۰۰ فوت برابر با ۴۰٪ است.

References

1. Abdel Azim, R. (2016). Evaluation of water coning phenomenon in naturally fractured oil reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 6(2), 279–291. <https://doi.org/10.1007/s13202-015-0185-7>
2. Ansari, R. Z., & Johns, R. T. (2013). Superposition of steady-state coning solutions for multiple wells with reservoir boundaries. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108, 362–369. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.07.006>
3. Bahadori, A. (2010). Determination of well placement and breakthrough time in horizontal wells for homogeneous and anisotropic reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 75(1), 196–202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.007>
4. Bahadori, A., & Nouri, A. (2012). Prediction of critical oil rate for bottom water coning in anisotropic and homogeneous formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 82–83, 125–129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.016>
5. Bai, T., & Tahmasebi, P. (2021). Efficient and data-driven prediction of water breakthrough in subsurface systems using deep long short-term memory machine learning. *Computational Geosciences*, 25(1), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s10596-020-10005-2>