

## پیش‌بینی مخروطی‌شدگی آب در چاه‌های افقی و عمودی با استفاده از روابط همبستگی

علی رحمانی، مجتبی رحیمی\* و رضا ذبیحی، گروه مهندسی نفت دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر

### چکیده

همواره متعاقب تولید نفت از مخازن زیرزمینی، فشار مخزن افت می‌کند. این افت فشار باعث می‌شود گاز و آب موجود در بالا و پایین ستون نفتی به سمت چاه تولیدی مهاجرت کند و موجب تشکیل مخروط آب و گاز می‌شود. در این حالت چاه‌های تولیدی نفت با مشکلات عدیده‌ای مواجه می‌شوند که در نهایت منجر به کاهش تولید یا توقف تولید می‌شود. هدف از انجام این تحقیق معرفی روابط همبستگی مربوط به پدیده‌ی مخروطی‌شدن است تا به کمک آنها وقوع این پدیده پیش‌بینی شود و بتوان اقدامات لازم را جهت مقابله با آن انجام داد. لذا در این پژوهش سعی شده این پدیده از دیدگاه پیش‌بینی پدیده به کمک روابط همبستگی مورد بررسی قرار گیرد. این روابط پارامترهایی نظیر دبی بحرانی (حداقل دبی نفت که مخروط تشکیل خواهد شد) و زمان رسوخ (مدت زمانی که طول می‌کشد آب یا گاز وارد ناحیه‌ی مشبک شود) را مورد بررسی قرار می‌دهد. برای به دست آوردن هر یک از این پارامترها، پژوهش‌های تجربی و آزمایشگاهی زیادی انجام شده است و نتایج، به صورت روابط همبستگی متناظر با آن شرایط معرفی شده‌اند. بر اساس بررسی‌های انجام شده با افزایش فاصله‌ی مشبک‌شدگی، مخروط‌شدگی کاهش خواهد یافت. همچنین طبق راه‌حل پیشنهادی میر و گردنر با احداث یک دیواره‌ی نفوذناپذیر به صورت شعاعی از پایین چاه می‌توان مخروط‌شدگی را کاهش داد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۲/۰۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۱۰/۰۱

### واژگان کلیدی:

مخروطی‌شدن، روابط همبستگی، دبی بحرانی، زمان رسوخ.

### مقدمه

خنثی می‌شود. در شرایط اولیه، سیالات مخزن در حالت تعادل قرار دارند. [۳] تولید از چاه باعث ایجاد یک گرادیان فشار در اطراف چاه می‌شود که در صورت غلبه‌ی آن بر تعادل وزنی سیالات سطح تماس آب و نفت یا گاز و نفت به صورت مخروطی و در جهت بازه‌ی تولیدی چاه تغییر شکل می‌دهند. [۴]

مخروطی‌شدن بر تولید نهایی، افزایش هزینه‌های عملیاتی و بروز مشکلات زیست‌محیطی تاثیر فراوانی دارد. هنگامی که نیروی ویسکوز در جهت عمودی بر نیروی ثقلی غلبه می‌کند، سطوح تماس جابجا شده و سبب بروز مخروط‌شدگی می‌شود. معمولاً این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که دبی تولید بالایی به چاه تحمیل می‌شود. [۵ و ۶]

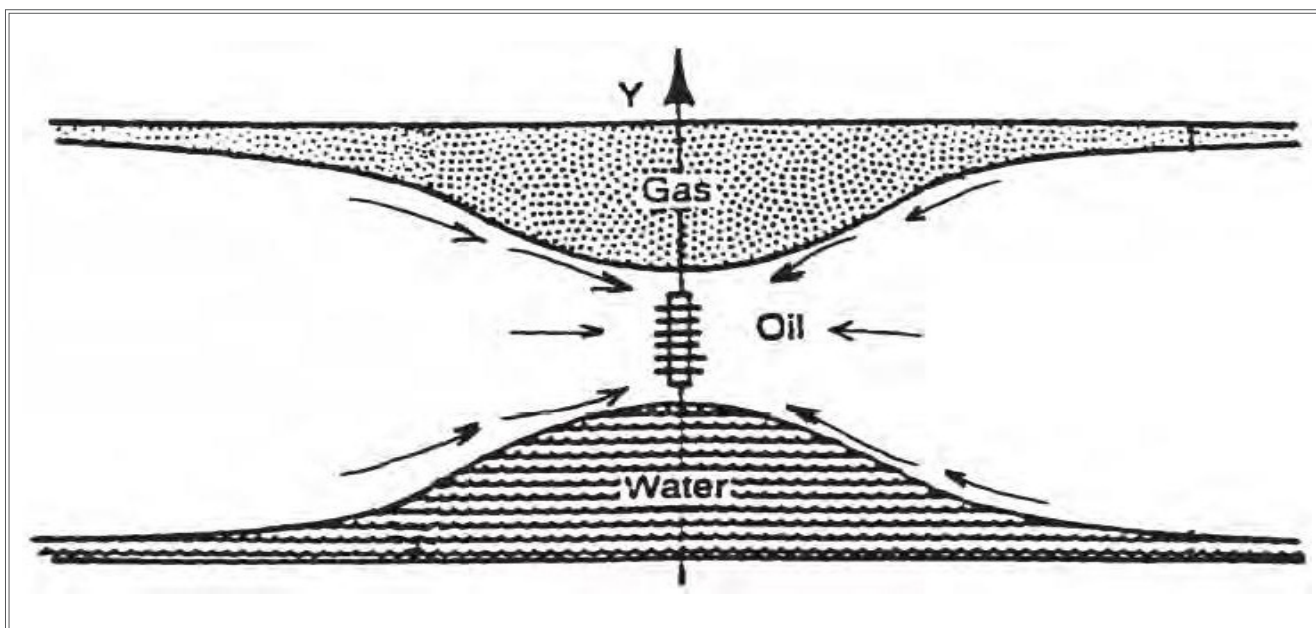
این پدیده به طور معمول در چاه‌های تولیدی که به چاه‌های تولیدی مخزنی که دارای آبران فعال یا کلاهدگ‌گازی باشد، دبی بالایی تحمیل می‌کند. از این‌رو، این پدیده به عاملی برای محدود کردن دبی تولید نفت از چاه تبدیل می‌شود. در میادین نفتی سعی

پدیده‌ی مخروطی‌شدن آب-گاز<sup>۱</sup> بیانگر فعال شدن مکانیسم ورود آب به بخش‌های زیرین سازندهای نفتی (سفره‌ی آب) یا گاز ناشی از کلاهدگ‌گازی به چاه‌های تولید نفت است و یکی از مسائل و مشکلات مهم تولید از چاه‌های نفت می‌باشد. (شکل ۱) [۱] مخروطی‌شدن به معنی توصیف حرکت آب یا گاز به سمت بازه‌ی تولیدی چاه به کار می‌رود.

مخروطی‌شدن، یک پدیده‌ی نامطلوب به‌شمار می‌آید که هزینه‌ی بهره‌برداری را افزایش می‌دهد و سبب کاهش بازده مکانیسم تخلیه شدن مخزن می‌شود. این پدیده، عاملی است که سبب محدود کردن دبی تولید نفت از چاه می‌شود. بررسی پدیده‌ی مخروطی‌شدن در مطالعات جامع مخزن و مدل‌سازی کل مخزن مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرد. [۲]

حرکت مخروطی‌شدن در ابتدا نتیجه‌ی جابجا شدن سیالات مخزن به علت گرادیان فشار در جهت کمترین مقاومت در برابر حرکت است که بر اساس تمایل سیالات به باقی ماندن در تعادل وزنی،

\* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (rahimi@iaukhsh.ac.ir)



شکل ۱ | پدیده‌ی مخروط‌شدگی آب و گاز [۵]

برداشت هیدروکربن در مخازن تحت رانش آب و یا کلاهِک گازی است. مزایای استفاده‌ی یک چاه افقی نسبت به چاه عمودی متداول، ظرفیت بالاتر تولید نفت در افت فشار یکسان و زمان گسست طولانی‌تر آن در میزان نرخ تولید داده شده است.

پدیده‌ی مخروطی شدن علاوه بر کاهش بازدهی مخزن باعث تشکیل رسوب در لوله‌ها، ایجاد خوردگی در آنها، مشکلات زیست‌محیطی و تحمیل هزینه‌ی مربوط به تاسیسات سطحی جداسازی و تصفیه‌ی آب و گاز تولیدی به همراه نفت می‌شود. فاکتورهای اساسی کنترل جهت حداکثر کردن برداشت نهایی نفت میادین، به تاخیر انداختن برخورد و تولید آب و گاز است. [۹]

مخروطی شدن می‌تواند اثرات منفی در تولید نفت در مخازن نفتی و تولید گاز در مخازن گازی بر جای گذارد. در مخازن نفتی که ضخامت لایه‌ی نفتی کم و سفره‌ی آبی نیز وجود داشته باشد، نرخ بالای تولید می‌تواند سبب مخروط شدن آب به سمت بالا و یا مخروط شدن گاز به سمت پایین به داخل مشبک‌های چاه شود. هنگامی که آب و گاز تولید شود، نرخ تولید نفت کاهش می‌یابد و هزینه‌ی جداسازی آب و یا گاز افزایش خواهد یافت.

جهت کاهش پدیده‌ی مخروطی شدن آب در مخازن نفت، در صنعت معمول است که چاه‌های عمودی به مراتب بالاتر از سطح تماس آب-نفت<sup>۲</sup> (OWC) مشبک‌کاری شده و چاه‌ها در نرخ کمتر از نرخ بحرانی تولید شوند. به طور مشابه در مخازن نفت-گاز، چاه‌ها اغلب

بر این است که دبی‌های تولید در محدوده‌ای کنترل شوند که مانع از ورود آب یا گاز به چاه تولیدی شود. [۷] اگر بتوان از این پدیده جلوگیری کرد، می‌توان به دبی بیشتر تولید دست یافت. در مخازن شکاف‌دار به دلیل توزیع غیریکنواخت شکاف‌ها، نحوه‌ی توسعه‌ی مخروط به سمت بازه‌ی تولیدی چاه غیر منظم است و تخمین دبی بحرانی و زمان میان‌شکنی مخروط نیاز به مدل کردن مخزن همراه با آگاهی از نحوه‌ی توزیع شکاف‌ها در اطراف چاه تولیدی و بررسی اشباع در شکاف و ماتریکس دارد.

زمان میان‌شکنی آب در سیستم‌های شکاف‌دار، کوتاه‌تر و دبی بحرانی در آنها کمتر است. از سوی دیگر، در قسمت‌هایی با تراوایی بالا، صعود و پیشروی سیال در آن منطقه بالاتر بوده و احتمال مخروطی شدن از آن ناحیه بالا می‌رود. [۶]

یکی از پارامترهای مهم در حفاری افقی چاه‌ها، افزایش میزان بازیافت هیدروکربن از مخازنی است که دارای کلاهِک گازی و تحت رانش آب می‌باشد. از مزایای چاه‌های افقی نسبت به چاه‌های عمودی می‌توان به ظرفیت بالای تولید از چاه‌های افقی در اختلاف فشار مشابه و نیز زمان گسست طولانی‌تر در دبی تولیدی مشابه با چاه‌های عمودی اشاره کرد. [۸]

سال‌های اخیر برنامه‌های کاربردی تکنولوژی حفر چاه افقی در مخازن هیدروکربنی در حال توسعه به طور گسترده‌ای استفاده شده است. یکی از اهداف اصلی استفاده از این تکنولوژی، بهبود

### ۳- مفاهیم و مبانی نظری تحقیق

میزان و سرعت مخروطی شدن تابع دبی سیال تولیدی، نفوذپذیری سنگ مخزن در جهت عمودی (در مقایسه با جهت افقی) و فاصله‌ی سطوح تماس سیالات از شبکه‌های تولیدی است. در همین راستا، برای بسط مباحث مخروطی شدن، نیاز است ابتدا به توضیح و مفاهیم این پدیده بپردازیم که عبارتند از: [۶ و ۲]

#### ۱- مخروط با ثبات<sup>۴</sup>

#### ۲- مخروط بی ثبات<sup>۵</sup>

#### ۳- دبی تولیدی بحرانی<sup>۶</sup>

چنانچه یک چاه نفتی در دبی ثابت تولید کند و گرادیان فشار نیز ثابت باشد، شرایط جریان پایدار حاکم خواهد شد. در چنین شرایطی اگر نیروهای دینامیک (ویسکوز) در چاه کم‌تر از نیروهای گرانشی باشند، مخروط ایجاد شده آب یا گاز به چاه نخواهد رسید و پیشرفت نخواهد کرد و در یک حالت ثابت باقی خواهد ماند. در این حالت این مخروط را مخروط باثبات می‌نامند. عکس این حالت، چنانچه فشار سیستم در شرایط شبه پایدار قرار داشته باشد، یک مخروط بی‌ثبات ایجاد خواهد شد. این مخروط آنقدر پیشرفت خواهد کرد تا این که شرایط پایدار حاکم شود. [۸]

اگر مقدار افت فشار جریان در چاه آنقدر زیاد باشد که بتواند بر نیروهای گرانشی غلبه کند، مخروط بی‌ثبات پیشرفت کرده و در نهایت به درون چاه راه خواهد یافت. نکته‌ی قابل ذکر این است که در شرایط واقعی، سیستم مخروط باثبات نوعی مخروط شبه‌باثبات<sup>۷</sup> است، زیرا مکانیزم تخلیه<sup>۸</sup> و توزیع فشار در سیستم مرتباً در حال تغییر می‌باشد. به عنوان مثال، در هنگام تخلیه‌ی یک مخزن، سطح تماس آب‌نفت به سمت بالا و به طرف فواصل عمقی تولیدی پیشرفت می‌کند و شانس ایجاد مخروط‌شدگی آب بیشتر می‌شود. دبی بحرانی دبی است که بیشتر از آن، گرادیان فشاری که موجب ایجاد مخروطی شدن آب یا گاز می‌شود، به وجود می‌آید. به عبارتی دیگر، دبی بحرانی به عنوان حداکثر دبی که به وسیله‌ی آن می‌توان بدون تولید آب یا گاز اضافی به تولید نفت ادامه داد تعریف می‌شود. [۴ و ۱]

در شرایط بحرانی، مخروط ایجاد شده از نوع مخروط باثبات است ولی در موقعیتی قرار دارد که احتمال وارد شدن آن به چاه زیاد می‌باشد. مهندس مخزن به منظور دستیابی به حالت تولید نفت بدون آب یا گاز اضافی، بایستی دو نکته‌ی کاربردی و فنی را در نظر داشته باشد:

در ستون نفتی دور از سطح تماس گاز-نفت مشبک‌کاری شده‌اند. همچنین موفقیت در کاهش پدیده‌ی مخروطی شدن توسط پلیمر و ژل نیز انجام شده است. اخیراً رویکرد جدیدی از کاربرد تکنولوژی DWS<sup>۲</sup> که در آن آب به طور مجزا از نفت با تکمیل دوگانه تولید می‌شود، مطرح شده است. ممکن است تولید آب در زیر OWC مخروطی شدن آب به سمت بالا را کاهش دهد به طوری که نرخ تولید نفت افزایش یابد. [۱۰ و ۱۱]

### ۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

در چاه‌های افقی نیز پدیده‌ی مخروطی شدن آب رخ می‌دهد. به علت این که حجم مخروط زیر چاه افقی بسیار بزرگ‌تر از حجم مخروط زیر چاه عمودی است، لذا حجم آب و یا گازی که باید جانشین نفت تولید شود بسیار بیشتر است و حرکت رو به بالا یا رو به پایین آن کم‌تر خواهد بود و زمان وارد شدن آب و یا گاز در تولید طولانی‌تر خواهد بود.

بنابراین بعد از زمان گسست شدن، حجم عظیمی از سیال تولیدی به آب اختصاص داده می‌شود و ضریب بازدهی تولید نفت به شدت کاهش می‌یابد. همچنین افت فشار ناشی از اصطکاک در طول دهانه‌ی چاه افقی و تغییر مسیر سیال باعث به وجود آمدن گرادیان فشار در طول سازند در چاه‌های افقی می‌شود.

بنابراین ارتفاع آب در اطراف چاه با هر دبی تولید نفت هرگز متقارن نیست. بنابراین در چاه‌های افقی ارتفاع آب در جریان پایین دست بالاتر از جریان‌های بالادست است. هنگامی که دبی تولید نفت افزایش پیدا می‌کند، آب در جریان‌های پایین دست نسبت به جریان‌های بالادست سریع‌تر به پدیده‌ی میان‌گذر شدن می‌رسد. بنابراین با توجه به مطالب بالا بررسی دقیق سطوح تماس سیالات و انتخاب محل بهینه‌ی چاه افقی قبل از عملیات حفاری الزامی است. [۸]

در همین راستا، پژوهشگران حفر چاه‌های افقی را با استفاده از راه‌کارهای دقیق و برنامه‌ریزی شده به عنوان راه‌حلی در مقابل پدیده‌ی مخروطی شدن در مخازنی که دارای لایه‌ی زیرین آب هستند، توصیه می‌کنند. شناخت و پیش‌بینی رفتار مخازن نفتی در ارتباط با این پدیده حائز اهمیت است.

همچنین برخی از پژوهشگران دیگر نشان داده‌اند که حفر چاه‌های افقی در حل پدیده‌ی مخروطی شدن در چنین مخازنی مفید نبوده تا جایی که شایستگی این تکنولوژی در برابر این پدیده زیر سوال رفته است. [۵ و ۳]

۱- دبی تولیدی که بتوان بدون تولید آب یا گاز اضافی در نفت محاسبه کرد، با حداکثر مقدار خود پیش‌بینی شود.

۲- محاسبات و طراحی دقیق و حداقل خطای فاصله‌های عمقی استاندارد و مناسب در اجرای عملیات تکمیل چاه جهت دستیابی به بیشینه‌ی دبی تولیدی بدون تولید آب یا گاز اضافی در نفت تعیین شود.

مخروطی شدن آب را می‌توان با حفر جزئی<sup>۹</sup> چاه در مخزن و انتخاب فواصل عمقی دارای نفوذپذیری افقی بالا به عنوان شبکه‌های تولیدی محدود کرد. [۵۳ و ۵]

با این که نفوذپذیری عمودی را نمی‌توان کاهش داد ولی نسبت نفوذپذیری افقی به عمودی را می‌توان با روش‌هایی مانند اسیدکاری<sup>۱۰</sup> افزایش داد. جهت جلوگیری از گسترش مخروطی شدن آب یا گاز، گاهی اوقات لازم است که چاه تولیدی<sup>۱۱</sup> بسته شود تا این که از پیشروی بیشتر سطوح تماس سیالات جلوگیری شود که در این صورت موجب ثبات بیشتر این سطوح تماس می‌شود. البته این روش ممکن است که به صورت مقطعی جواب‌گو باشد ولی غالباً رضایت‌بخش نیست.

به همین منظور برای حل مشکل پدیده‌ی مخروطی شدن، از یک سری محاسبات استفاده شده است که در این مقاله با بهره‌گیری از معادلات برخی از دانشمندان صاحب‌نظر در زمینه این پدیده ما را به تکمیل شدن اهداف که پیش‌بینی رفتار مخروطی آب و گاز در چاه‌های افقی است، سوق می‌دهد. [۱۱]

### ۳-۱- بررسی تئوری پدیده‌ی مخروطی شدن در مخازن

پدیده‌ی مخروطی شدن به علت حرکت سیالات در جهتی که حداقل مقاومت وجود دارد، ایجاد می‌شود. مخروطی شدن در مخازن نفتی برای دو سیال آب و گاز به وجود می‌آید. چنانچه شرایط اولیه‌ی طبیعی مخزن در نظر گرفته شود، معمولاً در اثر اختلاف دانسیته بین سیالات، آب پایین‌تر از نفت و گاز بالاتر از نفت قرار می‌گیرد. چنانچه فرض شود یک چاه تولیدی نفت به صورت جزئی در مخزن حفر شده باشد، فواصل عمقی تولیدی بین دو سطح تماس سیالات (سطح تماس آب-نفت و گاز-نفت) قرار خواهد داشت.

تولید از چاه، موجب ایجاد گرادیان‌های فشار و به تبع آن باعث پایین‌تر رفتن سطح تماس گاز-نفت و بالاتر رفتن سطح تماس آب-نفت می‌شود. [۱۲] در حالت متوازن و طبیعی با وجود ایجاد این گرادیان‌های فشار، گاز به دلیل دارا بودن دانسیته‌ی کم‌تر از

نفت و آب به دلیل دارا بودن دانسیته‌ی بیشتر از نفت در بالا و پایین نفت باقی خواهند ماند. اما در شرایطی که نوعی عدم توازن ایجاد می‌شود، این پایین رفتگی گاز و بالا آمدگی آب به صورت مخروطی شکل اتفاق می‌افتد. معمولاً در توزیع جریان سیالات در اطراف چاه سه نوع نیرو دخالت دارند: [۱۱ و ۱۲]

#### ۱- نیروهای موینگی

#### ۲- نیروهای گرانشی (ثقلی یا وزنی)

#### ۳- نیروهای ویسکوز

به طور معمول، اثر نیروهای موینگی بر روی حرکت مخروط، بسیار ناچیز است و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد، اما بدون در نظر گرفتن آن، تولید آب و نسبت آب-نفت زودتر از زمان پیش‌بینی ممکن است شروع شود. جهت نیروهای گرانشی به صورت عمودی است و در اثر اختلاف دانسیته بین سیالات به وجود می‌آیند. نیروهای ویسکوز توسط معادله‌ی دارسی توصیف می‌شوند.

این نیروها نیز در اثر گرادیان فشار ایجاد شده و در حقیقت یک نیروی دینامیکی بوده که مربوط به حرکت سیالات هستند. تحرک‌پذیری آب بیشتر از نفت است و به همین دلیل می‌تواند به سمت بازه‌ی تولیدی حرکت کند. بنابراین در یک زمان مشخص، در هر نقطه از فواصل تولید یا فراتر از آنها، نوعی توازن بین نیروهای گرانشی و ویسکوز برقرار است و تا زمانی که این دو نیرو در حالت توازن باشند، سطح تماس سیالات تغییر شکل نمی‌دهد. هنگامی که نیروهای ویسکوز (دینامیک) بر نیروهای گرانشی غلبه کنند، یک شکل مخروطی در سطح تماس سیالات به وجود می‌آید که در این صورت پدیده‌ی مخروطی شدن در چاه اتفاق افتاده است. [۱۳]

تشریح تئوری فیزیکی این پدیده مربوط به افت فشار ایجاد شده در اثر تولید است که تاثیر آن از تمرکز یافتن خطوط جریان به سمت چاه و افزایش سریع گرادیان فشار در اطراف آن مشخص می‌شود. گرادیان فشار ایجاد شده سبب بالا آمدن سطح آب یا پایین آمدن سطح گاز می‌شود. هر چه تولید با دبی بیشتری انجام شود، گرادیان فشار ایجاد شده بیشتر شده و احتمال مخروطی شدن افزایش می‌یابد. در سیستم‌هایی که حرکت مخروطی آب وجود دارد نیروی ویسکوز ناشی از تحرک‌پذیری رو به بالا بوده و در ناحیه‌ی اطراف چاه بر تعادل وزنی آب و نفت غالب می‌شود.

هر چه در جهت شعاعی از چاه دور شویم افت فشار، کم‌تر شده و در نتیجه تعادل بین نیروهای ویسکوزیته و گرانشی آب و نفت

### ۳-۴- روابط حاکم بر زمان گسست در چاه افقی

اغلب محاسبات نرخ بحرانی، نرخ‌های پایین را نشان می‌دهند که به دلایل اقتصادی نمی‌تواند روی چاه‌های تولیدی تحمیل شود. بنابراین اگر چاه بالای نرخ بحرانی تولید کند مخروط پس از یک دوره‌ی زمانی خواهد شکست که این زمان، زمان گسست نامیده می‌شود. تاکنون روش‌های زیادی برای تخمین زمان گسست مخروطی شدن آب یا گاز ارائه شده است. پاپاتزاکس و همکارانش [۳] در سال ۱۹۸۹ رابطه‌ای را پیشنهاد دادند که بر اساس راه‌حل نیمه‌تحلیلی برای توسعه‌ی زمان مخروطی شدن آب و مخروط‌های هم‌زمان آب و گاز در یک مخزن نامحدود با قرارگیری یک چاه افقی در ستون نفتی است: [۳]

$$t_{BT} = \frac{22758.528h\mu_0 t_{D_{BT}} \phi}{(\rho_w - \rho_n)k_v} \quad \text{رابطه‌ی (۷)}$$

برای مخروطی شدن آب، رابطه‌ی ۸ به صورت بی‌بعد برقرار است: [۳]

$$t_{D_{BT}} = 1 - (3Q_D - 1) \ln \left[ \frac{3Q_D}{3Q_D - 1} \right] \quad \text{رابطه‌ی (۸)}$$

### ۵- آنالیز پارامترهای مهم در مخروط‌شدگی آب در چاه‌های عمودی و افقی

شکل ۲ تاثیر فاصله‌ی مشبک‌شدگی بر نرخ بحرانی نفت را نشان داده است. طبق این شکل، با کاهش فاصله‌ی مشبک‌شدگی، نرخ بحرانی نفت افزایش می‌یابد. دو روش برای کاهش مخروط‌شدگی وجود دارد. روش اول ایجاد سوراخ جزئی، روش دوم بر اساس دبی کمتر از نرخ بحرانی تولید بوده که مخروط‌شدگی تثبیت شده و به مشبک نخواهد رسید.

شکل ۳ نشان می‌دهد که با کاهش چگالی نفت، تمایل به مخروط‌شدگی کاهش یافته و با افزایش چگالی نفت، دبی بحرانی نفت کاهش می‌یابد. اختلاف چگالی بین نفت خام و سیال‌های همراه نقش مهمی در تعیین دبی ایفا می‌کند.

شکل ۴ تاثیر چگالی گاز بر دبی بحرانی نفت را نشان داده است. دبی بحرانی نفت با افزایش چگالی گاز کاهش می‌یابد. بر اساس آنالیز حساسیت از چندین چاه و تاثیر پارامترهای سیال بر دبی بحرانی نفت، مشاهده شد که فاصله‌ی مشبک‌شدگی نقش بسیار حیاتی بر تاثیر دبی بحرانی تولید ایفا می‌کند. ضخامت ستون نفتی، چگالی نفت، چگالی آب و چگالی گاز، فاکتورهایی هستند که توسط مهندسی نفت نمی‌توان آنها را کنترل کرد یا تخمین زد.

در سطح پایین‌تری به وجود خواهد آمد. مشابه همین سیستم در حرکت مخروطی گاز وجود دارد. افت فشار در دهانه‌ی چاه در اکثر آنالیزهای تئوری در نظر گرفته نمی‌شود و این مسئله‌ای مهم در زمینه‌ی کاربردی است. افت فشار باعث ایجاد گرادیان هیدرولیکی در ارتفاع آب در چاه می‌شود. با دلالت بر این موضوع قله‌ای شدن در پایین‌دست بیشتر از بالادست اتفاق می‌افتد. از این‌رو ابتدا ایجاد مخروط آب در پایین‌دست و سپس با تولید نفت بیشتر توسعه‌ی گسست آب به سمت بالادست خواهد بود. [۱۲]

### ۴- روابط و معادلات حاکم بر مخروط‌شدگی آب در چاه‌های عمودی و افقی

#### ۱-۴- نرخ دبی بحرانی در چاه افقی

نرخ بحرانی به عنوان حداکثر نرخ جریان نفتی که می‌تواند در چاه جهت جلوگیری از شروع مخروط ایجاد گردد، تعریف می‌شود. جوشی [۱۳] با معرفی یک سری پارامترها، روابط زیر را برای تعیین نرخ بحرانی جریان نفت در چاه‌های افقی پیشنهاد کرد. محاسبه‌ی دبی بحرانی نفت برای یک چاه افقی (مخروطی شدن آب) طبق رابطه‌ی ۱ می‌باشد: [۱۳]

$$Q_{oc} = 0.0246 \times 10^{-3} \frac{(\rho_w - \rho_o)k_h [h^2 - (h - D_b)^2]}{\mu_o \beta_o \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

جایی که طبق روابط ۲، ۳ و ۴ داریم: [۱۳]

$$r_w = \frac{\left( r_{eh} \frac{L}{2a} \right)}{\left[ 1 + \sqrt{1 - \left[ \frac{L}{2a} \right]^2} \right] \left( \frac{h}{2r_w} \right)^{\frac{h}{L}}} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

$$r_{eh} = \sqrt{\frac{43560A}{\pi}} \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

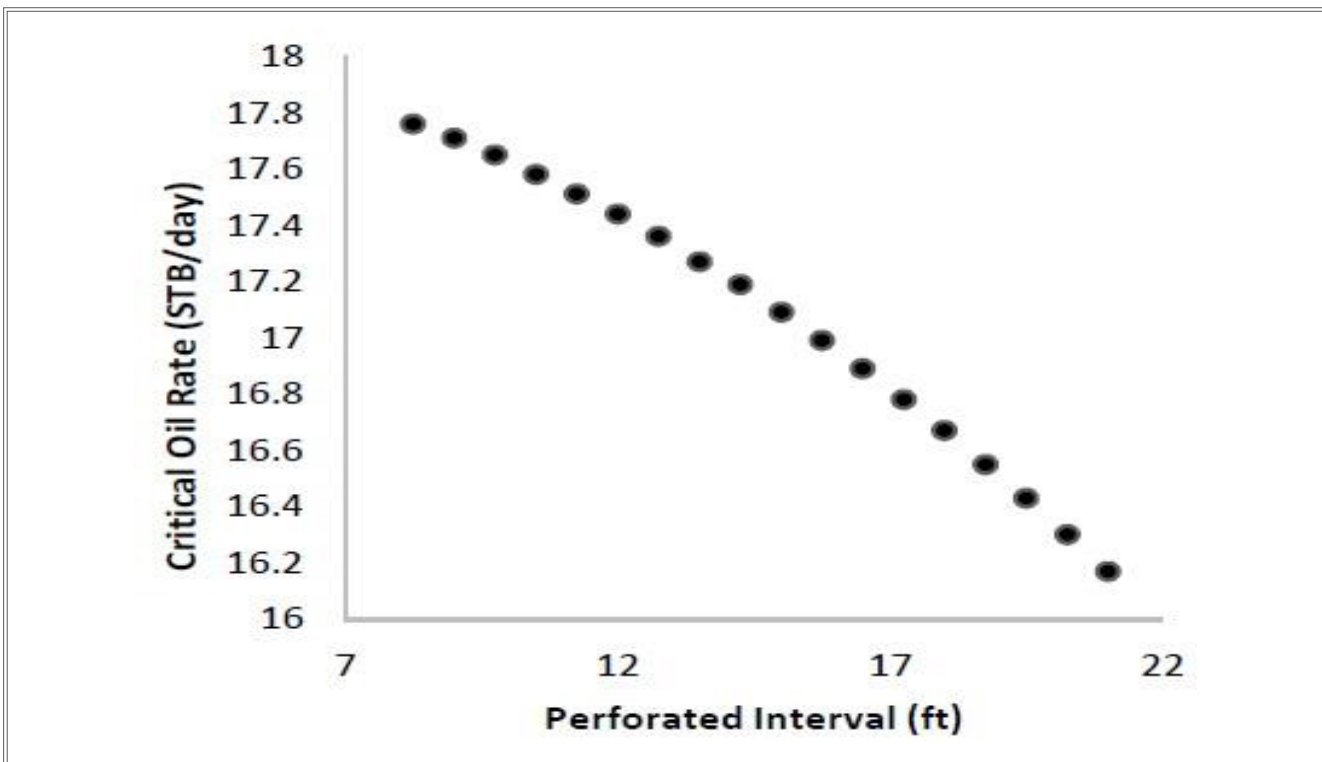
$$a = \frac{L}{2} \left[ 0.5 + \sqrt{0.25 + \left( 2 \frac{r_{eh}}{L} \right)^4} \right]^{0.5} \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

#### ۲-۴- نرخ دبی بحرانی در چاه عمودی

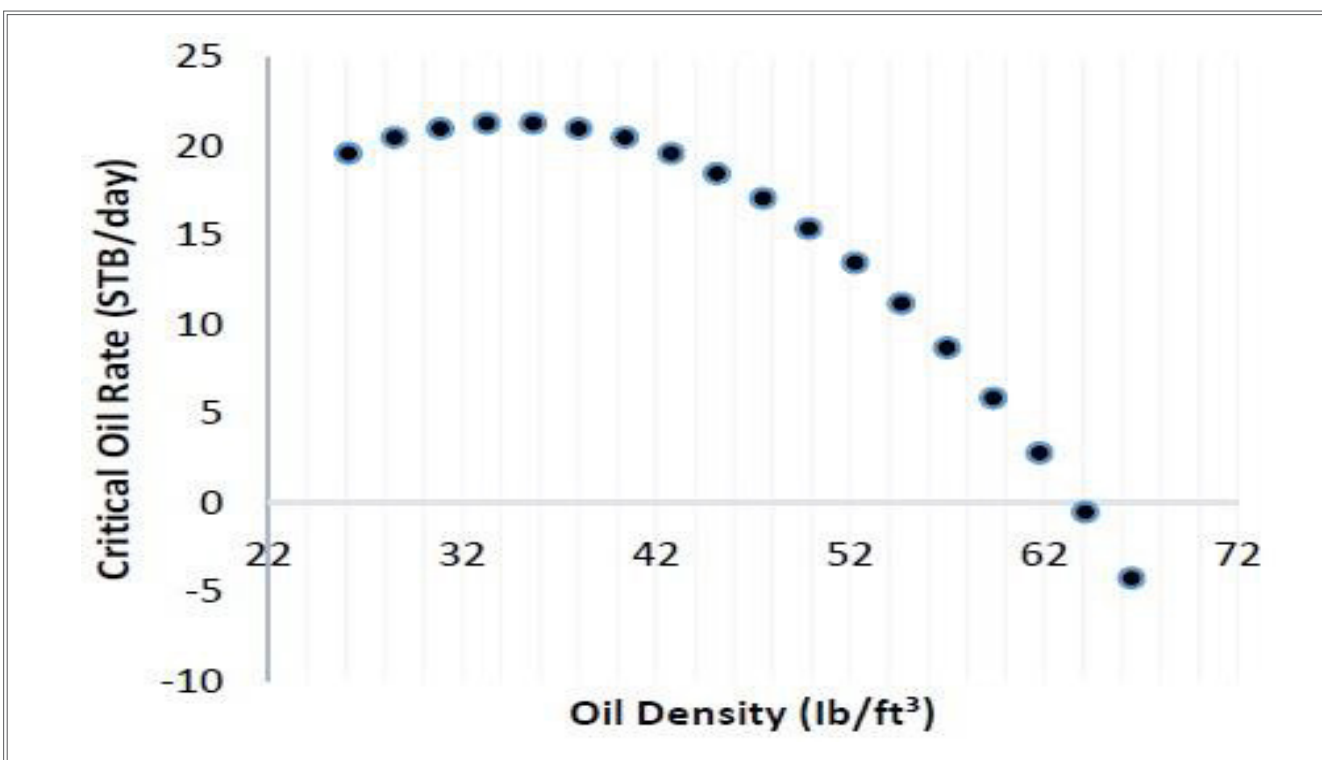
میر<sup>۱۳</sup> و گاردنر<sup>۱۴</sup> [۱۴] روابط ۵ و ۶ برای محاسبه‌ی نرخ دبی بحرانی در چاه عمودی ارائه کردند:

$$Q_{oc} = 0.246 \times 10^{-4} \left[ \frac{\rho_o - \rho_g}{\ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right)} \right] \left( \frac{k_o}{\mu_o \beta_o} \right) [h^2 - (h - D_t)^2] \quad \text{رابطه‌ی (۵)}$$

$$h_p = h - D_t \quad \text{رابطه‌ی (۶)}$$

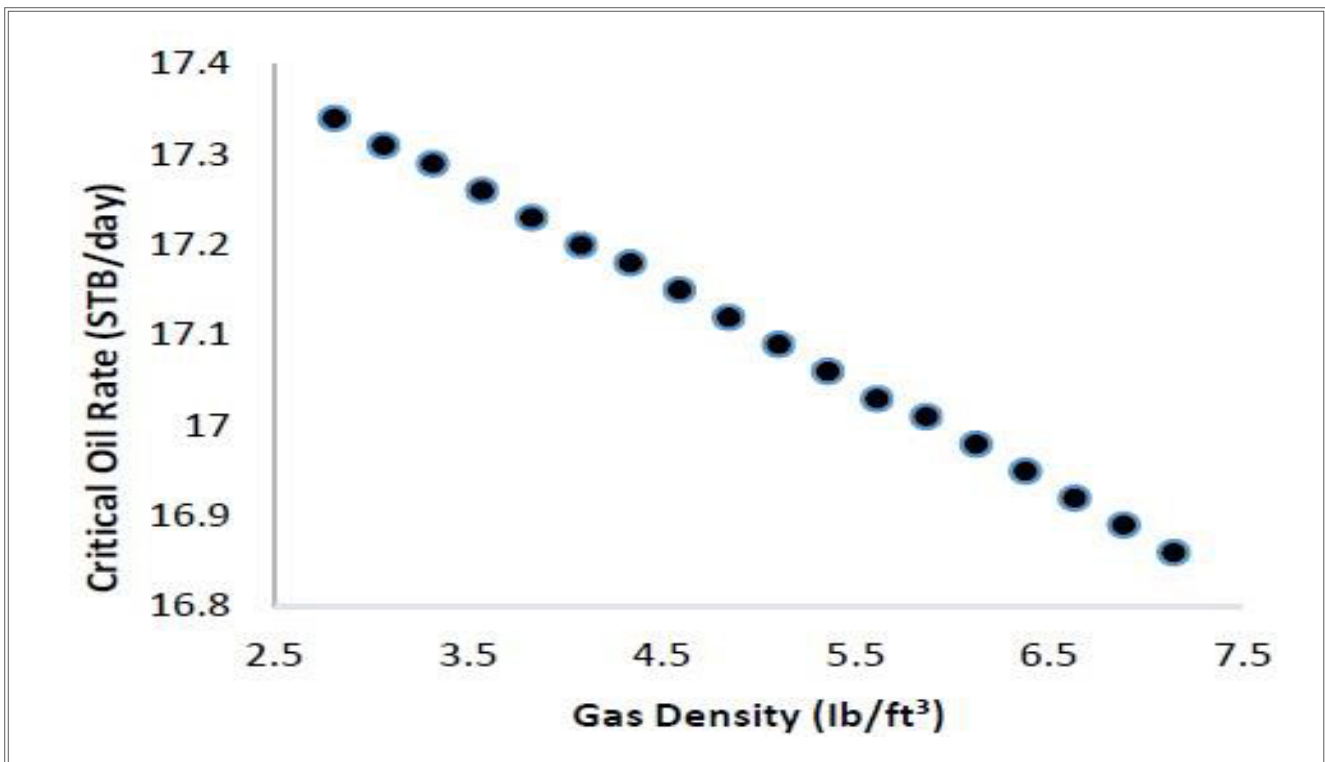


شکل ۲ نمودار نرخ بحرانی نفت در مقابل فاصله‌ی مشبک‌کاری [۱۴]

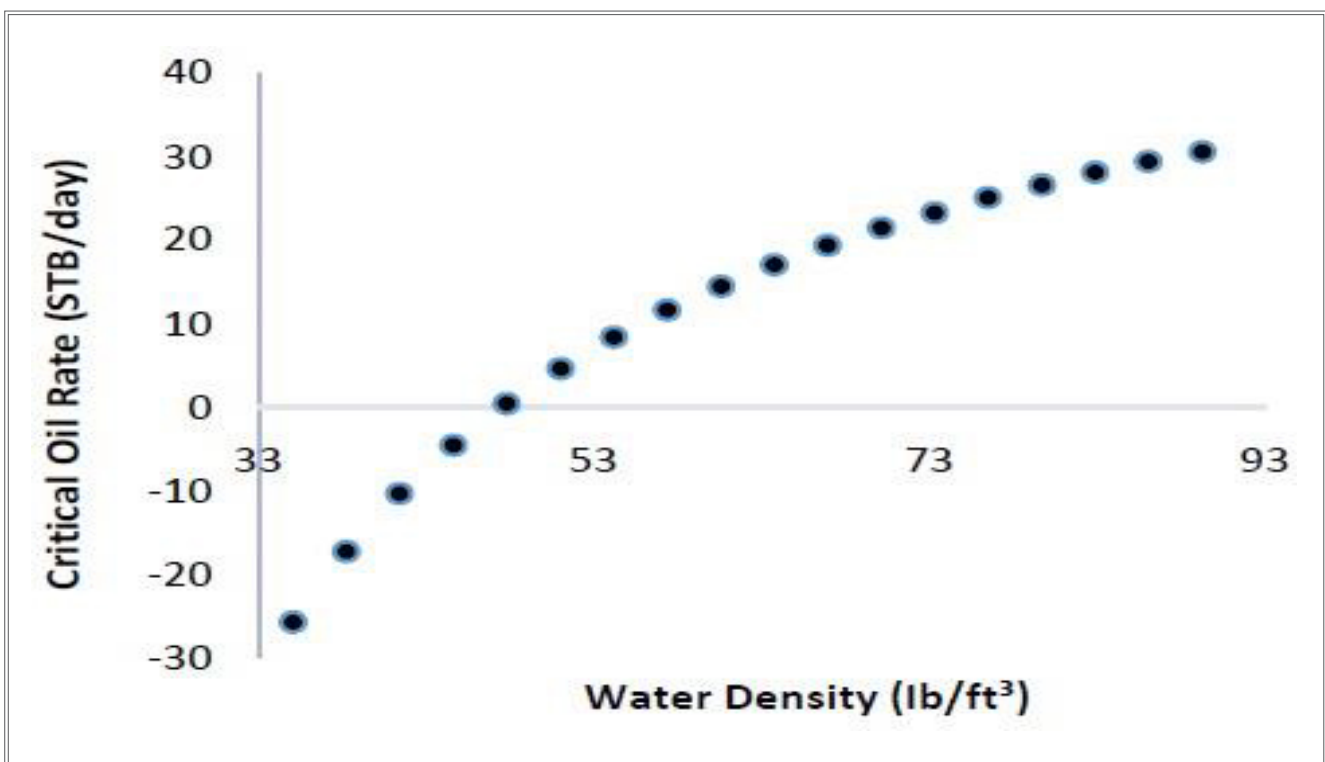


شکل ۳ نمودار نرخ بحرانی نفت در مقابل چگالی نفت [۱۴]





شکل ۴ | نمودار نرخ بحرانی نفت در مقابل چگالی گاز [۱۴]



شکل ۵ | نمودار نرخ بحرانی نفت در مقابل چگالی آب [۱۴]

سازند، می‌توان تخلخل و تراوایی را افزایش داد. تراوایی عمودی را نمی‌توان کاهش داد اما با این عمل می‌توان نسبت تراوایی افقی به تراوایی عمودی را افزایش داد و در نتیجه زمان گسست را طولانی کرد.

۷- طول مشبک‌ها در چاه‌های عمودی نقش بسیار مهمی در رفتار مخروطی شدن دارند. بنابراین با ایجاد شبکه‌های طولانی‌تر می‌توان میزان WOR را بعد از زمان گسست کاهش داد.

### فهرست علائم و اختصارات

در روابط ۱ تا ۹ پارامترهایی ذکر شده‌اند که هر یک نماد یک متغیر در روابط مذکور هستند. در اینجا به معرفی آنها پرداخته شده است:  $Q_{oc}$ : نرخ بحرانی نفت و واحد آن  $\frac{STB}{day}$  است.

$\rho_w$ : واحد  $\frac{lb}{ft^3}$  دانسیته‌ی آب.

$\rho_o$ : واحد  $\frac{lb}{ft^3}$  دانسیته‌ی نفت.

$k_h$ : نفوذپذیری افقی و واحد آن md است.

$h$ : ضخامت سازند و واحد آن فوت است.

$D_b$ : مسافت عمقی بین چاه افقی و تماس آب‌نفت و واحد آن فوت است.

$r_{eh}$ : شعاع ریزش چاه افقی و واحد آن فوت است.

$L$ : طول چاه افقی و واحد آن فوت است.

$r_w$ : شعاع موثر چاه و واحد آن فوت است.

$A$ : مساحت مخزن.

$\rho_g$ : واحد  $\frac{lb}{ft^3}$  دانسیته‌ی آب.

$D_t$ : مسافت عمقی بین چاه افقی و تماس گازنفت و واحد آن فوت است.

$t_{BT}$ : زمان گسست آب و واحد آن روز است.

$\mu_o$ : ویسکوزیته‌ی نفت و واحد آن سانتی‌پواز است.

$\emptyset$ : تخلخل و واحد آن DL است.

$Q_D$ : دبی بی‌بعد DL.

$t_{DBT}$ : زمان گسست بی‌بعد DL.

$\beta_0$ : ضریب حجمی نفت و واحد آن  $\frac{bbl}{STB}$  است.

$k_v$ : نفوذپذیری عمودی و واحد آن md است. ■

$$D_t = (h - h_p) \left[ 1 - \left( \frac{\rho_o - \rho_g}{\rho_w - \rho_g} \right) \right] \quad \text{رابطه‌ی (۹):}$$

### نتیجه‌گیری

۱- برای جلوگیری از پدیده‌ی مخروطی شدن و تولید آب قبل از هر عمل پیش‌گیرانه باید به تشخیص مشکل و محل ورود آب پرداخت.

پس از تشخیص کامل می‌توان نسبت به تعریف استراتژی‌های مختلف و انتخاب گزینه‌ی صحیح‌تر جهت کنترل مشکل اقدام کرد.

۲- از میان روش‌های جلوگیری از مخروطی شدن و تولید آب، حفر چاه با زاویه‌ی زیاد، بیشترین کاربرد را دارد و میزان کم‌ترین مقدار تولید آب را خواهیم داشت.

۳- اگرچه چاه‌های افقی، می‌تواند پدیده‌ی مخروطی شدن را کاهش دهد اما نمی‌تواند آن را به طور کامل از بین ببرد. مخروطی شدن پدیده‌ی پیچیده‌ای است که به تعداد زیادی از متغیرها وابسته است.

تجزیه و تحلیل دقیق و حساسیت بیشتر از قبیل وارد کردن برخی از عوامل دیگر مانند ویسکوزیته، نسبت پویایی، اختلاف دانسیته، شعاع چاه و غیره می‌تواند روابط و در نتیجه مخروطی شدن را بهبود بخشد.

از این رو برای کاهش یا به حداقل رساندن پدیده‌ی مخروطی شدن باید شناخت کافی از خواص سیال و مخزن و تاثیر آن بر روی رفتار مخزن داشته باشیم.

۴- می‌توان با افزودن ژل و پلیمر به سفره‌ی آبد که با افزایش ویسکوزیته‌ی آب همراه است، زمان تولید آب را افزایش داد که در این صورت آب دیرتر به دهانه‌ی چاه می‌رسد و منجر به سرعت تولید کم آب می‌شود.

۵- می‌توان با طراحی درست فاصله بین سطح تماس و چاه عمودی، چاه را در مکان بهینه قرار داد تا سرعت حرکت مخروط کاهش یابد.

البته زمانی که نتوان این فاصله را در مکان بهینه درست کرد، منجر به تولید آب با سرعت بالا خواهد شد.

۶- افزایش تخلخل در به تاخیر انداختن شروع مخروطی شدن نقش اساس دارد. از این رو با عملیات اسیدکاری و یا تقسیم فشار

### پانویس‌ها

1. Water & Gas Coning	4. Stable Cone	7. Pseudo Stable	10. Acidizing	13. Meyer
2. Oil Water Contact	5. Unstable Cone	8. Drainage Mechanism	11. Producing Well	14. Gardner
3. Down Hole Water Sink	6. Critical Production Rate	9. Partial Drilling	12. Joshi	

### منابع

- [1]. Ansari, R.Z., and Johns, R.T., "Steady-State Coning Solutions with Multiple Wells and Reservoir Boundaries", SPE 99896, SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, USA, 2006, pp. 22-26.  
[2]. Shirman, E.I., and Wojtanowicz, A.K., "More Oil Using Downhole

Water-Sink Technology: a Feasibility Study", SPE 66532, SPE Production & Facilities, 2000, 15(4), pp. 234-240.

■ ادامه منابع در (دبیرخانه) موجود است.