

# بررسی مکانیزم تشکیل، رشد و حرکت حباب در فرایند رانش گاز محلول در مخازن نفت سنگین

مجتبی گلپین<sup>۱</sup>، محمدرضا احسانی<sup>۱</sup>، محمد نیکوکار<sup>۲\*</sup>، لیلی صحرائورد<sup>۲</sup>

۱- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی

۲- تهران، پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز

پیام‌نگار: mohammad\_ni@yahoo.com

## چکیده

رشد حباب یکی از پارامترهای کلیدی در مدل کردن رانش گاز محلول است. لازم است تا نیروهایی که رشد را کنترل می‌کنند مشخص شده و به طور مناسب برای مدلسازی رشد حباب محاسبه شوند. علاوه بر این، قابلیت اجرا و اعتبار مدل‌های تجربی رشد حباب بایستی قبل از استفاده، معلوم گردد. در این مقاله، به بررسی مکانیزم‌های تشکیل حباب، رشد حباب و جریان فاز گاز در فرایند رانش گاز محلول در مخازن نفت سنگین پرداخته می‌شود. همچنین، تئوری‌های گوناگون به همراه روابط و فرضیات مختلف بیان شده‌اند.

کلمات کلیدی: رانش گاز محلول، هسته‌زایی همگن، هسته‌زایی ناهمگن، رشد حباب، جریان فازگازی

## ۱- مقدمه

مخازن نفت سنگین، منبع نوید بخشی از انرژی و هیدروکربورها را در آینده نمایان می‌کنند. تحلیل گران انرژی به علت کاهش مخازن نفت سبک و افزایش میزان مصرف انرژی در اکثر کشورهای در حال توسعه، نقش مهم و روند رو به رشدی برای مخازن نفت سنگین در نظر گرفته‌اند. نیاز به تأمین انرژی برای آینده، صنعت نفت و گاز را برای توسعه فناوری‌هایی به منظور بهبود میزان تولید نفت سنگین متعهد می‌سازد. فرایند رانش گاز محلول یکی از کم هزینه‌ترین روش‌های برداشت از مخازن نفت سنگین است که همچنان تردیدهایی در مورد مکانیسم فرایند آن وجود دارد. زمانی که فشار یک مخزن زیر اشباع به پایین فشار نقطه حباب برسد، فاز گاز ایجاد می‌شود. متراکم شدن فاز گاز به ثابت ماندن فشار در مخزن کمک کرده و بنابراین، نیروی محرکه لازم جهت

تولید اولیه ایجاد می‌شود. فاز گاز تا زمانی که به یک درجه اشباع معین که به آن اشباع بحرانی گاز می‌گویند نرسد، نمی‌تواند به عنوان یک فاز مستقل جریان یابد. از آنجاییکه تحرک گاز به مراتب بزرگتر از تحرک نفت و نرخ تولید گاز به مراتب بیشتر از نرخ تولید نفت است، از این رو باعث تولید نسبت گاز به نفت بیشتر می‌گردد. چنین روشی در بازیابی اولیه به عنوان رانش گاز محلول نامیده می‌شود [۱]. در شکل (۱) مفهوم مکانیزم رانش به تصویر کشیده شده است.

در واقع، فرایند رانش گاز محلول شامل حالت فوق اشباعی در نتیجه هسته‌زایی حباب‌های گاز است و در نهایت فاز گاز به عنوان یک فاز مستقل عمل می‌کند. بنابراین سه فرایند دینامیکی شامل: تشکیل نطفه (هسته‌زایی) حباب، رشد حباب در منافذ و در نهایت جریان حباب پراکنده و تشکیل فاز گاز آزاد، اتفاق می‌افتد. این فرایندها در

## ۲- هسته‌زایی<sup>۱</sup>

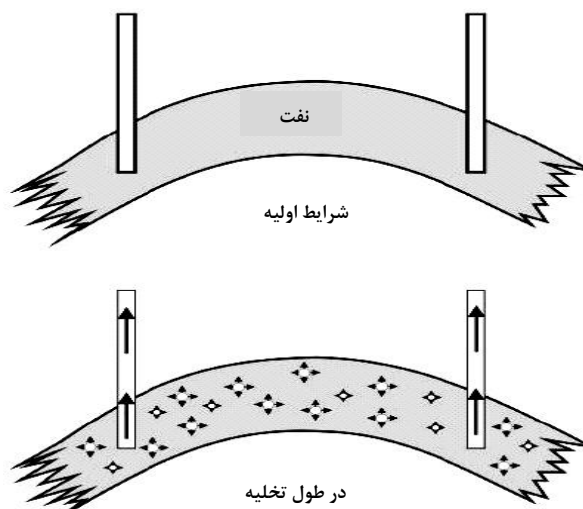
کاویتاسیون (حفره‌زایی) و جوشش، روش‌هایی هستند که می‌توانند باعث تشکیل حباب در فاز مایع شوند. در کاویتاسیون، تشکیل حباب گاز منجر به کاهش فشار در دمای ثابت می‌گردد. از طرف دیگر، جوشش شامل بالا رفتن دما در فشار ثابت به بالای نقطه جوش است. کاویتاسیون مکانیزم هسته‌زایی است که در مخزن تحت رانش گاز محلول اتفاق می‌افتد [۲].

فرایند هسته‌زایی را می‌توان بر اساس مدت زمان هسته‌زایی تقسیم بندی نمود. بر این اساس، هسته‌زایی می‌تواند به دو دسته هسته‌زایی آبی و هسته‌زایی تدریجی تقسیم شود. نظریه هسته‌زایی آبی بیان می‌کند که حباب‌ها در یک مقدار واحد از فوق اشباعیت، هسته‌زایی شده‌اند. درحالی که در هسته‌زایی تدریجی، با پیشرفت تخلیه مخزن، حباب‌ها در تمام مقادیر فوق اشباعیت، هسته‌زایی می‌کنند. تحقیقات زیادی برای تعیین آبی یا تدریجی بودن هسته‌زایی در مخازن انجام شده است. کاشچویچ و فیروزآبادی پیشنهاد کردند که هسته‌زایی آبی در مخازن در حال اتفاق افتادن است. جلیکمن و همکاران بیان کردند که اکثر حباب‌ها در ماکزیمم فوق اشباعیت هسته‌زایی می‌کنند. بورا و مینی [۳] هسته‌زایی را حتی پس از اینکه حباب‌ها تشکیل هسته داده بودند مشاهده کردند. لذا نتیجه گرفتند که هسته‌زایی در محیط متخلخل، آبی نیست بلکه تدریجی است.

کندی و اولسون [۴] نتیجه گرفتند که نرخ هسته‌زایی تابعی از فوق اشباعیت است و رابطه ای برای نرخ هسته‌زایی به عنوان تابعی از فوق اشباعیت ارائه کردند. در مورد سنگ‌های آهکی و سیلیس، آنها نتیجه گرفتند که هر دو به یک اندازه بر تشکیل حباب‌ها موثر اند. بازیافت نفت به تعداد حباب‌های تشکیل شده، طی فرایند رانش گاز محلول بستگی دارد و نرخ تخلیه سریع‌تر، منجر به هسته‌زایی بیشتر حباب‌ها می‌شود [۵].

جونز و همکاران دسته بندی جدیدی برای هسته‌زایی شامل هسته‌زایی همگن کلاسیک، هسته‌زایی غیر همگن کلاسیک، هسته‌زایی شبه کلاسیک، هسته‌زایی غیر کلاسیک ارائه کرده‌اند. علاوه بر این، اکثر محققان از مدل وجود ریز حباب‌های اولیه اسمیت برای توضیح هسته‌زایی سیستم در مدل سازی رانش گاز محلول استفاده کرده‌اند.

رانش گاز محلول در نفت سبک خیلی سریع اتفاق می‌افتد به طوری که می‌توان فرض کرد تعادل در سراسر زمان وجود دارد. با این حال، رفتار دینامیکی این فرایندها در رانش گاز محلول در نفت سنگین به نظر مهم می‌رسد. نحوه تغییرات رفتار و مشخصات مخازن تحت مکانیزم رانش گاز محلول در جدول (۱) خلاصه شده است. در ادامه، فرایندهای دینامیکی فوق توضیح داده شده‌اند.



شکل ۱- مخازن با رانش گاز محلول

جدول ۱- نحوه تغییرات رفتار و مشخصات مخازن تحت رانش گاز محلول

مشخصات مورد نظر	نحوه تغییرات و رفتار کلی
فشار مخزن	به صورت تند و پیوسته کاهش می‌یابد.
نسبت گاز به نفت	تا یک مدتی افزایش یافته و پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود شروع به کاهش یافتن می‌کند
تولید آب	وجود ندارد
رفتار چاه‌ها	زودتر از حد انتظار نیازمند بکارگیری پمپ است.
درصد بازیافت نفت	بین ۵ تا ۳۰ درصد

1. Nucleation

## ۱-۲ نظریه هسته‌زایی همگن

این نظریه با تعریف کلاسیک ترم هسته‌زایی مطابقت دارد. زیرا هسته به علت نوسانات مولکول‌ها در اثر ناپایداری گرمایی ایجاد می‌شود. در این نظریه، دیواره، ذره خارجی و محیط متخلخل در نظر گرفته نمی‌شوند. دسته‌ای از  $N$  مولکول با احتمال  $P$  تشکیل می‌شود که این مسئله به تعداد مولکول‌ها و سایر خواص محلول همچون ضریب نفوذ و دما بستگی دارد. هسته‌زایی همگن در اثر تشکیل خودبه‌خودی و سریع حباب‌ها در یک مایع، زمانی که یک تغییر ترمودینامیکی بزرگ رخ دهد، اتفاق می‌افتد [۹-۶].

در هسته‌زایی همگن، حباب‌ها به صورت تصادفی تشکیل می‌شوند و زمان لازم جهت تشکیل حباب دیگر قابل محاسبه خواهد بود. برای هسته‌زایی همگن، عبارت نرخ هسته‌زایی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$J = Z \exp\left(\frac{-W}{\psi T}\right) = Z \exp\left(\frac{-16\pi\sigma^3}{3\psi TS^2}\right) \quad (1)$$

که در آن  $Z$  تعداد کل مولکول‌های گاز در سیستم،  $w$  انرژی آزاد محرک که برای ایجاد یک خوشه مورد نیاز است،  $\psi$  ثابت بولتزمن،  $T$  دما بر حسب کلوین،  $\sigma$  تنش سطح مشترک و  $S$  فوق اشباعیت است. در این مدل هیچ آستانه‌ای برای فوق اشباعیت در نظر گرفته نمی‌شود. هسته‌زایی زمانی اتفاق می‌افتد که فوق اشباعیت مثبت باشد اما اگر فوق اشباعیت کوچک باشد، زمان ظاهر شدن اولین حباب‌ها می‌تواند بسیار طولانی باشد. بنابراین در این کلاس از هسته‌زایی، فوق اشباعیت خیلی بالایی مورد نیاز است

در یک مایع خالص، تنش سطحی نشان‌دهنده نیروهای درون مولکولی است که تمایل به در کنار هم نگه داشتن مولکول‌ها دارد و از تشکیل حفرات بزرگ جلوگیری می‌کند. شعاع بحرانی حبابهای تشکیل شده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_{critical} = \frac{2\sigma}{S} \quad (2)$$

این رابطه نشان می‌دهد که فوق اشباعیت بزرگ تر منجر به تشکیل حبابهای کوچک تر می‌شود [۱۰].

## ۲-۲ نظریه هسته‌زایی نا همگن

نظریه هسته‌زایی نا همگن مدل اصلاح شده نظریه همگن است تا بتواند مقادیر فوق اشباعیت بسیار کوچک را توضیح دهد. هسته‌زایی نا همگن روی ذرات خارجی مثل دیواره‌های ظرف، سطح مواد در سطوح متخلخل فضاهای خالی که به طور ناچیز خیس شده است [۷، ۹، ۱۱، ۱۲]، گازهای محبوس شده [۳] و غیره اتفاق می‌افتد. مدل موئینگی در حفره‌ها که در آن گاز در شکاف‌های مخروطی در یک جامد غیر یکنواخت در مایع محبوس شده توجهات را به خود جلب کرده است [۱۳]. در این حالت، ایجاد یک حباب چندین برابر آسانتر از حالت هسته‌زایی همگن است. مکانیزم هسته‌زایی نا همگن به عنوان مکانیزم با احتمال بیشتر در محیط متخلخل است [۶]. معادله کلاسیک برای نرخ هسته‌زایی عبارت است از:

$$J = A_1 \exp\left(-\frac{A_2}{\Delta P_s^2}\right) \quad (3)$$

که در آن  $\Delta P_s$  فوق اشباعیت است که براساس گرادیان فشار بیان شده است. کمیت‌های  $A_1$  و  $A_2$  به ترتیب پارامترهای سینتیک و ترمودینامیکی هستند که سیستم سنگ - سیال را توصیف کرده‌اند. یورتوس و پارلار جهت در نظر گرفتن اثر محیط متخلخل معادله کلی را به صورت زیر اصلاح کردند:

$$J = K_{het} \exp\left(-\frac{A_2}{F_j \cdot \Delta P_s^2}\right) \quad (4)$$

که در آن  $K_{het}$  ثابت سینتیکی،  $F_j$  تابعی از ژئومتریک سایت و ترشوندگی است. لی و یورتوس [۱۴] پیشنهاد کردند که یک سایت هسته‌زایی فعال است مشروط به اینکه شرط زیر برقرار باشد:

$$k_H c - P_1 \geq \frac{\sigma}{w} \quad (5)$$

در اینجا  $k_H$  ثابت انحلال‌پذیری،  $c$  غلظت گاز،  $P_1$  فشار مایع،  $\sigma$  تنش سطح مشترک و  $w$  اندازه دهانه شکاف است. هر چند آنها اشاره کردند که این شرایط هسته‌زایی تنها به متغیرهای نقطه‌ای  $c$  و

به این دلیل است که نرخ کاهش بیشتر در فوق اشباعیت بزرگ‌تر نتیجه می‌شود [۲].

### ۳-۲ آسفالتین

اسمیت پیشنهاد کرد که ذرات آسفالتین معلق می‌توانند به عنوان سایت‌های تشکیل حباب عمل کنند. کلاریچ و پراتس [۲۰] ادعا کردند که جذب آسفالتین بر سطح حباب‌ها می‌تواند حباب‌ها را اندکی پایدار کند. با این حال آزمایش‌های میکرومدل که توسط مینی و همکارانش انجام شد، موارد فوق را اثبات نمود [۲].

### ۳-۳ آب ذاتی

کندی و اولسون [۴] مشاهده کردند که حضور آب زمانی که به مخلوط هیدروکربوری اضافه می‌گردد، اثر قابل ملاحظه‌ای بر حباب ندارد. با این حال، کاماچ و بویر [۲۱] اشاره کردند که نفت در مقایسه با آب، انرژی سطحی کمتری دارد و زمانی که هسته‌ها حاوی آب ذاتی باشد، هسته‌زایی می‌تواند آسان‌تر باشد.

دانش و همکارانش [۱۵] پیشنهاد کردند که حضور آب ذاتی، می‌تواند هسته‌زایی حباب را به دلیل نفوذ اجزای سبک نفت به داخل فاز آب، به تأخیر بیندازد که این امر جمعیت خوشه‌ها با چگالی پایین در نفت را کاهش می‌دهد و از تشکیل حباب‌ها جلوگیری می‌کند. البته در شرایط واقعی مخزن، آب در تعادل با نفت است و این مورد اتفاق نمی‌افتد.

### ۴- رشد حباب

هنگامی که حباب‌ها تشکیل هسته دادند، شروع به رشد می‌کنند و نرخ رشد حباب، رشد فاز گاز را تعیین می‌کند. سرعت رشد به وسیله انتقال جرم، اندازه حرکت و یا حرارت در سطح مشترک حباب- مایع کنترل می‌گردد. انتقال جرم با تبخیر و چگالش در سطح برای یک سیستم تک جزئی اتفاق می‌افتد. همچنین انتقال جرم به خاطر نفوذ در فاز مایع برای سیستم‌های چند جزئی اتفاق می‌افتد. انتقال مومنتوم در اثر نیروهای هیدرودینامیکی در ارتباط با فشار موئینگی، اینرسی مایع و گرانشی کنترل شده است. انتقال حرارت به وسیله جریانی از گرما از مایع به سمت حباب اتفاق می‌افتد [۱۰].

$P_r$  بستگی دارند و شامل مکانیزم‌های سینتیکی طبیعی از هسته‌زایی کلاسیک (چه همگن و چه غیر همگن) نیست. معادله بالا فرض می‌کند که ناخالصی در فرایند هسته‌زایی حباب وجود دارد. معادله (۵)، مکانیزم هسته‌زایی ناهمگن را تفسیر کرده و به وسیله محققان زیادی [۱۹-۱۵] بررسی شده است.

### ۳-۲ هسته‌زایی شبه کلاسیک و هسته‌زایی غیر کلاسیک

مدل‌های هسته‌زایی شبه کلاسیک و هسته‌زایی غیر کلاسیک حضور حباب‌های اولیه را در نظر می‌گیرد. مکانیزمی بر اساس تشکیل و رشد حباب‌ها با فعال شدن ریز حباب‌های اولیه در بیشتر مطالعات هسته‌زایی در نظر گرفته شده است. اسمیت یکی از محققانی بود که رانش گاز محلول در نفت سنگین را بررسی و ادعا کرد که گاز به صورت حباب‌های ریز به همراه نفت جریان می‌یابد. او آنها را "ریز حباب" نامید. اکثر محققان از مدل وجود ریز حباب‌های اولیه اسمیت برای توضیح هسته‌زایی سیستم در مدل سازی رانش گاز محلول استفاده کرده‌اند.

ریز حباب‌های اولیه می‌توانند در توده مایع وجود داشته باشند و یا در سطح جامد به دام افتاده باشند. در مدل‌های موجود، پایداری ریز حباب‌های موجود در توده سیال نه به رفتار ترمودینامیکی آنها بلکه بواسطه حضور ناخالصی در مایع توجیه می‌شود. حباب‌ها با لایه نازکی از مواد فعال کننده سطحی با ایجاد یک پوسته جامد در سطح حباب‌ها از نفوذ گاز جلوگیری می‌کنند و ریز حباب‌ها را پایدار می‌نمایند. به طور آزمایشگاهی مشاهده شده است که تعداد حباب‌ها یک آستانه‌ای وارد و با کاهش اندازه حباب‌ها افزایش می‌یابند. تابع توزیع جمعیت حباب‌ها از توابع توانی و نمایی پیروی می‌کند.

در هسته‌زایی شبه کلاسیک، شعاع‌های حباب اولیه کوچک‌تر از شعاع بحرانی است و باید جهت رشد بر نیروی موئینگی غلبه کند درحالی‌که در هسته‌زایی غیر کلاسیک، شعاع حباب‌ها بزرگتر از شعاع بحرانی بوده و تمام آن‌ها رشد می‌کنند چراکه نیازی به هیچ نیروی فعال سازی ندارند [۱۰].

### ۳- پارامترهای فرایندی موثر بر هسته‌زایی

#### ۳-۱ نرخ تخلیه فشار

در آزمایش‌های مختلف مشاهده شده است که در نرخ تخلیه فشار بالاتر، حباب‌های بیشتری با سرعت بیشتر تشکیل می‌شوند. این امر

می‌کنند. بر اساس موارد فوق، به عنوان یک تقریب کلی، شعاع حباب در فرایند رانش گاز محلول، یک تابع نمایی از زمان است. فرض کنید که هیچ حباب جدیدی تشکیل نشده است. نرخ آزاد شدن گاز محلول می‌تواند به نرخ رشد حباب‌های موجود مرتبط باشد. از آنجاییکه حجم یا جرم حباب‌های گاز مستقیماً با شعاع‌های حباب‌ها متناسب است، می‌تواند مقادیر گاز تشکیل شده،  $n_{eg}(t)$ ، با توان‌های  $t$  متناسب باشد. شنگ و همکاران برای این منظور رابطه زیر را پیشنهاد کردند.

$$n_{eg}(t) = n_{eq} \left( \frac{t}{t_{eq}} \right)^b \quad (6)$$

در اینجا  $n_{eg}$  گاز در حال تعادل ترمودینامیکی،  $t_{eq}$  زمان مورد نیاز برای رسیدن به تعادل و  $b$  شاخص رشد حباب گاز است [۲۷، ۲۸]. بحث بالا نشان می‌دهد که ممکن است هیچ اثر غیر تعادلی در آزاد شدن گاز محلول در سیستم نفت، ویسکوز نباشد. این امر در مقیاس آزمایشگاهی جایی که مقیاس زمانی چند ساعت تا چند روز است خیلی مهم است. با این حال در مقیاس میدانی این تأخیر در آزاد شدن گاز محلول نتیجه واضحی ندارد. معادله نفوذ - جابه‌جایی کلی برای انتقال جزء حل شده عبارت است از [۱۴]:

$$\phi \frac{\partial C}{\partial t} + v \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (7)$$

که در آن  $\Phi$  تخلخل است که برای ستون مایع برابر ۱ می‌باشد،  $D$  ضریب نفوذ و  $v$  سرعتی است که به واسطه رشد حباب یا انقباض تولید شده است.

اکثر محققان ترم جابه‌جایی را در نظر نگرفته‌اند، زیرا سرعت سطح حباب پایین است و می‌توان از اثر جابه‌جایی صرف‌نظر کرد [۱۴]. فرض شبه استاتیک به طور وسیعی در فوق اشباعیت پایین [۲۹] و یا هنگامی که زمان کافی برای نفوذ قابل توجه وجود ندارد بکار می‌رود. مدل شبه استاتیک با دقت زیادی به وسیله اسکریون بدست آمده و به صورت عددی توسط اسطکلکی و مارتینز حل شده است. از تأثیر نیروهای ویسکوز، اینرسی و تنش سطحی در این حالت صرف نظر شده است.

پارامترهایی مثل گرانروی، تنش سطحی، نفوذ پذیری و شعاع اولیه حباب، نقش قابل توجهی در تعیین سرعت رشد حباب دارند. نیروهایی که رشد حباب را کنترل می‌کنند به دو دسته، نیروهای هیدرودینامیکی شامل نیروهای اینرسی، فشاری و ویسکوز و نیروهای نفوذی تقسیم می‌شوند. نیروهای اینرسی، فشاری و نفوذ پذیری نیروهایی هستند که به رشد حباب کمک می‌کنند در حالی که نیروی ویسکوز مانع رشد حباب می‌شود. اسکریون رشد حباب را با صرف نظر کردن از نیروهای هیدرودینامیکی در نظر گرفت و یک حل تحلیلی برای مسئله رشد نفوذی برای دامنه مشخصی از نیروهای انتقال جرم ارائه کرد. تحقیقات دیگر [۲۲ و ۲۳] نشان داد که در زمان‌های اولیه رشد حباب در توده مایع، نیروهای اینرسی رشد حباب را محدود می‌کنند اما در زمان‌های انتهایی، رشد با نیروهای نفوذی محدود می‌گردد. همچنین مشاهده شده است که در زمان‌های اولیه رشد، افزایش نیروهای ویسکوز منجر به نرخ رشد پایین حباب می‌گردد. موارد ذکر شده، رشد حباب را زمانی که فشار در یک مرحله افت می‌کند در نظر می‌گیرند. البته رشد حباب برای کاهش تدریجی در فشار خیلی بهتر شرایط مخزن را شبیه‌سازی می‌کند.

برای نرخ رشد حباب، در  $t_B(t)$ ‌های مختلف، رژیم‌های مختلفی از رشد حاصل می‌گردد.  $t_B(t)$  شعاع حباب در زمان  $t$  است. اگر رشد فقط به وسیله اینرسی مایع کنترل شده باشد، فقط تابعی خطی از  $t$  است. اگر رشد توسط نفوذ کنترل شده باشد،  $t_B$  با ریشه دوم (جذر) زمان متناسب است، این ارتباط ساده با استفاده از مدل‌های توده مایع نتیجه شده است [۲۴، ۲۵]. در محیط متخلخل تابعیت  $t_B(t)$  خیلی پیچیده تر است. نتایج آزمایش‌ها در میکرومدل‌ها نشان داده است که رابطه بین  $\log(t)$  و  $\log(t_B)$  خطی است. همچنین رابطه  $\log - \log$  بین  $t_B$  و  $t$  پیشنهاد می‌کند که  $t_B$  می‌تواند تابعی توانی از زمان باشد. کاشچیو و فیروزآبادی رابطه‌ای از نرخ رشد حباب در توده مایع جهت توصیف رشد حباب در محیط متخلخل ارائه دادند. آنها از یک فاکتور شکلی، جهت محاسبه اثر ژئومتری و شکل دانه‌ها و حفره‌های محیط متخلخل استفاده کردند [۲۶]. با استفاده از آنالیز ابعادی نشان داده شده است که  $t_B$  یک تابع توانی پیچیده از  $t$  است.

فاکتورهای زیادی، رشد حباب در محیط متخلخل را کنترل

برای مدل کردن رشد فاز گاز در محیط متخلخل باید ترم فشار موئینگی را وارد کرد. مولو یک مدل تئوریک جامع را برای هسته‌زایی رشد حباب توسعه داده است که با رشد و سپس اکتساب اشباع بحرانی گاز دنبال شده بود. نتایج او با وجود اینکه نیروهای موئینگی را نادیده گرفته بود، با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت. با این حال با در نظر گرفتن معادله رشد نفوذی، به نظر می‌رسد که او ترم حرکت مرز را که به خاطر انبساط حباب ایجاد شده است در نظر نگرفته است.

### ۵- آزاد شدن گاز و جریان یافتن حباب‌ها

گاز آزاد شده در نفت که منجر به کاهش فشار می‌شود، تمایل دارد به صورت پراکنده در نفت باقی بماند. حباب‌های گاز پراکنده شده ممکن است برای مدت زمان معقولی بدون متلاشی شدن به صورت فازهای پیوسته جداگانه باقی بمانند. با این حال، از نقطه نظر ترمودینامیکی، این پراکندگی حباب‌ها به علت ساختار آنها ناپایدار است و باید سرانجام از فاز نفت جدا شده و تشکیل یک فاز گاز آزاد را بدهند. این جدایش زمان بر بوده و بستگی به پایداری حباب‌های گاز دارد [۳۰].

برای نفت معمولی بعد از آزاد شدن گاز، این سه مرحله بسیار سریع اتفاق می‌افتد. با این حال، برای نفت سنگین و بیتومن به خاطر گرانشی فاز نفت یا فاکتورهای دیگر، برای مدت طولانی حباب‌های گاز به صورت پراکنده باقی می‌مانند. در واقع حباب‌های پراکنده شده گازی برخی رفتارهای غیر عادی را در جریان ایجاد می‌کنند و به جریان یافتن نفت در محیط متخلخل کمک می‌کنند و بازیافت نفت را در تولید از مخازن نفت سنگین و بیتومن افزایش می‌دهند. پایداری کف در هر درجه حرارتی به موازنه بین فرایندهای تشکیل حباب و تخریب حباب بستگی دارد. زمانی که حباب‌های پراکنده گازی در محیط متخلخل جریان می‌یابد، تولید مجدد حباب‌های پراکنده گازی و بهم پیوستن آنها به طور همزمان اتفاق می‌افتد. با این حال، زمانی که فاز گاز آزاد در محیط متخلخل تشکیل شده است، جریان نفت فومی (کف آلود) خیلی زود به پایان می‌رسد. بنابراین برای حفظ جریان نفت فومی، حباب‌های گاز باید به صورت پراکنده در فاز نفت وجود داشته باشند. نقش گاز پراکنده در فرایند بازیابی نفت بستگی به حالت گاز در شرایط مخزن دارد. معمولاً دو

حالت زیر وجود دارد:

- زمانی که گاز به صورت حبابهای مجزای پراکنده شده، وجود دارد، در این حالت حبابهای گاز در بهبود بازیافت نفت اثر می‌کند. با این حال جریان نفت فومی برای تولید نفت، سودمند است.
- زمانی که حباب‌های گاز به یکدیگر متصل شده و یک فاز پیوسته را تشکیل می‌دهند، فاز گاز اثر منفی روی بازیافت نفت دارد، زیرا انرژی حاصل از رانش مخزن به وسیله جریان فاز گاز، هدر رفته است.

حباب‌های پراکنده گازی، اثر بسیار مهمی در جریان نفت فومی، تحت فرایند رانش گاز محلول دارند. مقدار گازی که در اثر فرایند رانش گاز محلول به صورت پراکنده باقی مانده است در اثر پارامترهایی همچون ویسکوزیته نفت، نرخ تخلیه فشار، شکل هندسی حفره، ترکیبات تشکیل دهنده نفت و غیره کنترل شده است [۳۰].

بوررا [۳۱] گزارش کرد که نرخ تخلیه فشار، پر اهمیت ترین پارامتری است که ساختار حباب گازی پراکنده شده را هم در میکرومدل‌های همگن و هم در میکرومدل‌های غیر همگن تعیین می‌کند. رفتارها در حالت تخلیه سریع و تخلیه آهسته با یکدیگر متفاوت است. در آزمایش تخلیه آهسته، حباب‌های گاز تشکیل شده، رشد کرده و سرانجام چندین حفره را اشغال می‌کنند. سپس حباب‌ها جهت رشد در خروجی مدل ظاهر می‌شوند. در آزمون تخلیه سریع، حباب‌های گاز تشکیل شده، خیلی زود و بعد از رشد داخل حفرات، شروع به مهاجرت به سمت خروجی مدل می‌کنند و سپس به دو یا تعداد بیشتری حباب شکافته می‌شوند. این حباب‌ها به رشد، مهاجرت و جدایش ادامه می‌دهند. در تخلیه فشار سریع، جریان فاز گاز پراکنده در امر فروپاشی پیوسته، حباب‌های مهاجرت کرده حاصل می‌شود.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مکانیزم‌های تشکیل حباب، رشد حباب و جریان فاز گاز در فرایند رانش گاز محلول در مخازن نفت سنگین پرداخته می‌شود. نظریه گوناگون به همراه روابط و فرضیات مختلف بیان شده که بطور خلاصه در زیر آورده شده است:

- تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای هسته‌زایی حباب وجود دارد. اختلافات جزئی در فرایندهای آزمایشگاهی می‌تواند منجر به

## مراجع

- [1] Kumar, R., Pooladi-Darvish, M., "Effect of Viscosity and Diffusion Coefficient on the Kinetics of Bubble Growth in Solution-Gas Drive in Heavy Oil", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Volume 40, No 3, (2001).
- [2] Sheng, J. J., Maini, B. B., Hayes, R. E., Tortike, W. S., "Critical Review of Foamy Oil Flow", *Transport in Porous Media*, pp.5-23, (1999).
- [3] Bora, R., Maini, B. B., "Flow Visualisation Studies of Solution Gas Drive Process In Heavy Oil Reservoirs Using a Glass Micromodel"; SPE 37519 Presented at the SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Bakersfield, CA, (1997).
- [4] Kennedy, H. T., Olson, C. R., "Bubble Formation in Supersaturated Hydrocarbon Mixtures; *Trans Transport in Porous Media*, Vol. 195, pp. 271-278, (1952).
- [5] Chatenever, A., Indra, M. K., KYTE, J. R., "Microscopic observations of solution gas drive behavior", *Journal of Petroleum and Technology*, pp. 13-15, (1959).
- [6] Schramm, L. L., Wassmuth, F., "Foams: Basic principles, Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry", *Advances in Chemistry Series 242*, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 3-46, (1994).
- [7] Baibakov, N. K., Garushev, A. R., "Thermal Methods of Petroleum Production", *Developments in Petroleum Section 25*, Translated by Cieslewicz, W. J., Elsevier Science Publishers B. V., pp. 6-21, (1989).
- [8] Richardson, J. G., Kerver, J. K., Hafford, J. A., Osaba, J. S., "Laboratory Determination of Relative Permeability", *Transport in Porous Media*, Vol. 195, pp. 187-196, (1952).
- [9] Fatt, J., Dykster, H., "Relative Permeability Studies", *Transport in Porous Media*, Val. 192, pp. 249 - 256, (1951).
- [10] Zhang, Y., "Temperature Effects on Foamy Solution-Gas Drive", M. Sc. Thesis, University of Calgary, pp.8-30, (1999).
- [11] Laird, A. D. K., Putnam, J. A., "Three Component Saturation in Porous Media by X-Ray Techniques", *Transport in Porous Media*, Vol. 216, pp. 216-220. (1959).
- [12] Meyer, R. F., Attanasi, E. D., "Heavy Oil and Natural Bitumen-Strategic Petroleum Resource", *U.S. Geogical Survey, Fact Sheet*, (2003).
- [13] Firoozabadi, A., Ottesen, B., Mikkelsen, M., "Measurements of super saturation and critical gas saturation", *Society of Petroleum Engineers Journal*, pp. 337-343, (1992).
- [14] Li, X., Yortsos, Y. C., "Critical gas saturation: modeling and sensitivity studies", Paper SPE 26662 presented at the 68th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, Oct. 3-6, (1993).
- [15] Oak, M. J., Baker, L. E., Thomas, D. C., "Three Phase Relative Permeability of Berea Sandstone", *Journal of Petroleum Technology*, pp. 1054-1061, (1990).
- [16] Kalaydjian, F. J. M., "Dynamic Capillary Pressure Curve for Water/Oil Displacement in Porous Media: Theory Vs. Experiment", SPE 24813, presented at the 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in Washington, DC, October 4-7, (1992).

نتایج متفاوتی شود. آزمایشات باید به طور کامل و تحت شرایط کاملاً مشابه انجام شوند تا نتایج تکرار پذیر بدست آیند.

- در نظریه هسته‌زایی همگن، نرخ هسته‌زایی مثبت است. بنابراین هسته‌زایی در تمام مراحل آزمایش حتی اگر افت فشار در یک مرحله لحظه‌ای اتفاق افتاده باشد، مشاهده می‌شود.

- نظریه هسته‌زایی همگن به تشکیل دسته‌هایی از چندین مولکول با شعاع تقریبی یک آنگستروم می‌انجامد که این مقدار به فوق اشباعیتی معادل ۱۰۰۰۰ بار نیازمند است که این مقدار در مقایسه با مشاهدات آزمایشگاهی عدد بسیار بزرگی است.

فوق اشباعیت مشاهده شده در آزمایشات در محدوده چند بار و حداکثر ۱۰ بار می‌باشد.

- تئوری هسته‌زایی غیر همگن نمی‌تواند آستانه‌ای از فوق اشباعیت را که برای شروع هسته‌زایی مورد نیاز است توضیح دهد. همچنین این نظریه به ایده سرعت هسته‌زایی می‌انجامد که با مشاهدات مدل ریز حباب در تضاد است.

- پارامترهایی مثل گرانیوی، تنش سطحی، نفوذپذیری و شعاع اولیه حباب، نقش قابل توجهی در تعیین سرعت رشد حباب بازی می‌کنند. نیروهایی که رشد حباب را کنترل می‌کنند به دو دسته نیروهای هیدرودینامیکی شامل نیروهای اینرسی، فشاری و ویسکوز و نیروهای نفوذی تقسیم می‌شوند. نیروهای اینرسی، فشاری، و نفوذ نیروهایی هستند که به رشد کمک می‌کنند درحالی که نیروی گرانیو مانع رشد می‌شود. اسکریون مسئله رشد حباب را با صرف نظر نمودن از نیروهای هیدرودینامیکی بیان نمود و یک حل تحلیلی برای مسئله رشد نفوذی برای یک محدوده مشخص از نیروی محرکه انتقال جرم ارائه کرد.

- شرایط برای تشکیل جریان حباب‌های پراکنده گازی قویاً به نرخ تخلیه فشار و مهاجرت حباب‌ها بستگی دارد. اگر حباب‌های گاز در محیط متخلخل مهاجرت نکنند، آن‌ها فقط به صورت درجا رشد می‌کنند. این می‌تواند موجب تشکیل سریع فاز گاز پیوسته شود. با این حال اگر حباب‌های گاز شروع به مهاجرت در محیط متخلخل کنند، به وسیله جدایش آهسته، حباب‌های گاز بیشتری ایجاد خواهد شد. درنهایت این حباب‌های پراکنده گازی باعث بازیابی بالا در نفت‌های کف‌آلود می‌شوند. علاوه بر نرخ تخلیه فشار و مهاجرت حباب‌ها، دما نیز می‌تواند بر حباب‌های گاز پراکنده شده اثر بگذارد.

- [17] Chardaire, C., "Simultaneous Estimation of Relative Permeabilities and Capillary Pressures", presented at the 64th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in San Antonio, TX, October 8- 11, (1989).
- [18] Odeh, A. S., "Effect of Viscosity Ratio on Relative Permeability", *Transport in Porous Media*, Vol.216, PP. 346-353, (1959).
- [19] Civan, F., Donaldson, E. C., "Relative Permeabilities from Unsteady-State Displacements: An Analytical Interpretation", SPE 16200, presented at the SPE Production Operations Symposium held in Oklahoma city, Oklahoma, March 8-10, (1987).
- [20] Claridge, E. L., Prats, M., "A proposed model and mechanism for anomalous foamy heavy oil behavior", Paper SPE 29243, Proc. Int. Heavy Oil Symp. Calgary, AB, pp. 9-20, (1995).
- [21] Dumore, J. M., "Development of Gas-Saturation during Solution-Gas Drive in an Oil Layer below a Gas Cap", *Society of Petroleum Engineers Journal*, pp. 211 - 218, September (1970).
- [22] Johnson, E. F., Bossler, D. P., Naumann, V. O., "Calculation of Relative Permeability from Displacement Experiments", *Transport in Porous Media*, Vol. 216, pp. 370-372, (1959).
- [23] Watson, A. T., Mchmond, P. C., Kerig, P. D., Tao, T. M., "A Regression- Based Method for Estimating Relative Permeabilities From Displacement Experiments", *Society of Petroleum Engineers Journal*, pp. 953-958, (1988).
- [24] Huerta, M., Otero, C., Rico, A., Jimenez, I., de Mirabal, M., Rojas, G., "Understanding Foamy Oil Mechanism for Heavy Oil Reservoirs During Primary Production", SPE 36749, Presented at the 71th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, CO, October 6-9, (1996).
- [25] Maini, B. B., "Foamy oil flow", teaching notes at the workshop for the members of Petroleum Recovery Institute, April 27, (1994).
- [26] Firoozabadi, A., Kashchiev, D., "Pressure and volume evolution during gas phase formation in solution gas drive process, *Society of Petroleum Engineers Journal* , pp. 219-227, (1996).
- [27] Kraus, W. P., McCafftey, W. J., Boyd, G. W., "Pseudo-Bubble Point Model for Foamy Oils", presented at the Annual Technical Conference of The Petroleum Society of CIM, Calgary, AB, May 9-12, (1993).
- [28] Geilkman, M. B., Dusseault, M. B., Dulwen, F. A. L., "Dynamic Effects of Foamy Fluid Flow In Sand Production Instability", SPE 30251 Presented at the International Heavy Oil Symposium held in Calgary, AB, Canada, June 19-21, (1995).
- [29] Rapoport, L. A., Leas, W. J., "Relative Permeabiliv to Liquid in Liquid Gas Systems", *Transport in Porous Media*, Vol. 192, pp. 83 - 98, (1951).
- [30] Pooladi – Darvish, M., Firoozabadi, A., "Solution-gas Drive in Heavy oil Reservoirs", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, (1999).
- [31] Bora, R., "Cold production of heavy oil – an experimental investigation of foamy oil flow in porous media", PhD Dissertation, University of Calgary, Calgary, Canada, (1998).