

## بررسی مکانیزم ریزش ثقلی اجباری به کمک اعداد بدون بعد

بهزاد رستمی<sup>۱\*</sup>، ریاض خراط<sup>۲</sup>، سیروس قطبی<sup>۳</sup>

۱- تهران، انستیتو مهندسی نفت، دانشگاه تهران

۲- تهران، مرکز تحقیقات نفت، دانشگاه صنعت نفت

۳- تهران، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

پیام نگار: brostami@ut.ac.ir

### چکیده

در این مطالعه آزمایش‌های ریزش ثقلی اجباری با تغییر گسترده در مشخصه‌های فیزیکی و عملیاتی از جمله نوع سیال، طول مدل، نفوذپذیری و نرخ تزریق انجام شد. در ادامه، نتایج آزمایش‌ها به وسیله اعداد بدون بعد متداول در فرایندهای تزریق گاز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج این مطالعات نشان می‌دهند که میزان بازیافت نفت با عدد بوند رابطه مستقیم و با عدد موینگی رابطه عکس دارد. به علاوه، نتایج نشان می‌دهند که ارزیابی کلی تولید برای تمام نکات مورد مطالعه، تنها و به کمک یکی از اعداد بدون بعد امکان پذیر نیست. برای رفع این مشکل، عدد بدون بعد ترکیبی جدیدی پیشنهاد شد. در این عدد، توان عدد بوند از عدد موینگی بیشتر بوده که خود نشان‌دهنده درجه اهمیت عدد بوند در مقایسه با عدد موینگی است. در انتها نیز کاربرد عدد بدون بعد پیشنهادی با آزمایش‌های متعددی مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: ریزش ثقلی اجباری، اعداد بدون بعد، عدد بوند، عدد موینگی، عدد بدون بعد ترکیبی، ازدیاد برداشت،

### تزریق گاز

### ۱- مقدمه

روشهاست. برای جابجایی غیر امتزاجی، ضریب بازیافت نفت متأثر از خصوصیات ترشوندگی، نفوذپذیری، لزجت، اختلاف چگالی و نرخ تزریق می‌باشد. بررسی‌های تاریخچه‌ای [۸-۱] در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، درباره اهمیت تزریق گاز، تحت مکانیزم ریزش ثقلی، در میان روشهای موجود برای ازدیاد برداشت، گفتگو می‌شود.

برای بررسی نقش پارامترهای مؤثر در میزان تولید، از اعداد بدون بعد جهت کاهش این پارامترها استفاده می‌شود. همچنین استفاده از اعداد بدون بعد امکان ایجاد ارتباط میان نتایج آزمایشگاهی و میدانی را فراهم می‌سازد. در مطالعه ریزش ثقلی آزاد، گراتنی و

نفت باقیمانده از تولید اولیه و ثانویه در حدود دو تریلیون بشکه در مقیاس جهانی گزارش شده است. تقاضای روز افزون برای انرژیهای فسیلی، استفاده از روشهای ازدیاد برداشت را ضروری می‌سازد. تحقیقات نشان می‌دهند که بهره برداری افزوده به کمک تزریق گاز از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۶ به طرز چشمگیری افزایش یافته است (حدود ۵۴ درصد) [۱]. هرچند تزریق گاز با مشکلاتی از قبیل نسبت تحرک نامناسب و خروج سریع گاز همراه می‌باشد، این روش به خصوص زمانی که از نیروی ریزش ثقلی بهره می‌بریم یکی از مفیدترین و کارآمدترین روشهای تولید نفت در مقایسه با سایر

این مطالعه، بررسی آزمایشگاهی فرایند ریزش ثقلی اجباری برای طیف گسترده‌ای از تراوایی مطلق، شدت جریان تزریق گاز و لزجت نفت می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی توسط اعداد بدون بعد در بخش ۴ مورد بررسی قرار می‌گیرند. بعلاوه، نتایج آزمایشگاهی توسط عدد بدون بعد جدیدی که ترکیبی از نسبت نیروهای ثقلی، موینگی و گرانو می‌باشد مورد تحلیل و بررسی قرار خواهند گرفت.

## ۲-۱ اعداد بدون بعد

نسبت نیروهای مؤثر در پدیده ریزش ثقلی توسط اعداد بدون بعد قابل بیان می‌باشند. بزرگنمایی تزریق امتزاجی و غیر امتزاجی تزریق گاز نه تنها تعداد پارامترهای مورد مطالعه را کاهش می‌دهد، بلکه ابزار مناسبی برای تحلیل مکانیزم حرکت سیال در محیط متخلخل است [۱۲]. در پدیده ریزش ثقلی به کمک تزریق غیر امتزاجی گاز، حرکت سیال به نسبت نیروی گرانو و نیروی ثقلی وابستگی شدیدی دارد. در این مکانیزم، نیروی موینگی نیز بر میزان تولید فاز ترشونده تأثیر منفی دارد. برای آنالیز مکانیزم ریزش ثقلی اجباری، اعداد بدون بعد زیر مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

الف) عدد موینگی ( $N_c$ ) که نسبت افت فشار ناشی از نیروهای گرانو به افت فشار ناشی از نیروهای موینگی است.

ب) عدد بوند ( $N_B$ ) که نسبت افت فشار ناشی از نیروهای ثقلی به افت فشار نیروهای موینگی می‌باشد.

این دو عدد به صورت‌های زیر قابل نمایش هستند:

$$N_c = \frac{\Delta P_{vis}}{\Delta P_{cap}} = \frac{\mu_w v}{\sigma} \quad (1)$$

$$N_B = \frac{\Delta P_{grav}}{\Delta P_{cap}} = \frac{\Delta \rho g (k/\phi)}{\sigma} \quad (2)$$

که در این معادلات،  $\mu_w$  لزجت فاز ترشونده،  $v$  سرعت داریسی،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\phi$  و  $k$  میزان تراوایی مطلق و تخلخل است. این دو عدد بی بعد مبنای اصلی تمام محاسبات برای تحلیل آنالیز ابعدی فرایند ریزش ثقلی اجباری و آزاد می‌باشند. در بخش بعدی، پارامترهای مؤثر در فرایند ریزش ثقلی که میزان دو عدد موینگی و بوند را کنترل می‌کند، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

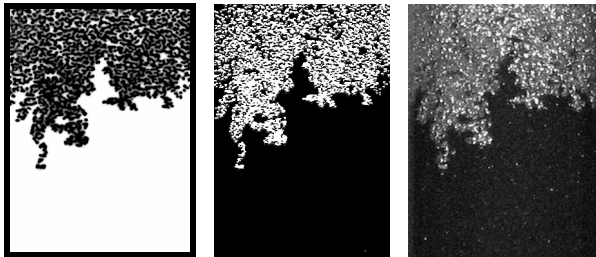
همکارانش [۹] با ترکیب نیروهای ثقلی، گرانو و موینگی، نتایج آزمایش خود را به کمک عدد ترکیبی جدیدی انجام دادند. قریب [۱۰] از اعداد بدون بعد برای بررسی روش جابجایی امتزاجی در مدل دو بعدی ناهمگون کمک گرفت. کولکارنی و رافو [۱۱] تأثیر اعداد بدون بعد را در ضریب بازیافت در مجموعه‌ای از آزمایش‌های امتزاجی و غیر امتزاجی مطالعه کردند. وود و همکارانش [۱۱] با بهره گیری از ده عدد بدون بعد به تفسیر تزریق  $CO_2$  در مخزن شیب‌دار آب گرفته پرداخته و تلاش کردند تا با روش طراحی آزمایشگاهی و عدم قطعیت سنجی به محدودیت‌های مؤثر در توسعه میدان مورد مطالعه خود دست یابند. در مطالعه‌ای دیگر جادهوار و سرما [۸] ارتباط میان گروه‌های بدون بعد و تأثیر آنها بر عملکرد تولید در روش جابجایی غیر امتزاجی با حضور نیروی ثقلی را مورد بررسی قرار دادند.

در این تحقیق روش ریزش ثقلی اجباری در جابجایی غیر امتزاجی به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به این منظور پارامترهای مؤثر از قبیل نفوذپذیری، لزجت سیال و نرخ تزریق گاز به‌طور گسترده تغییر داده می‌شوند تا بازه وسیعی از اعداد بدون بعد را تولید کنند. نتایج آزمایش‌ها به کمک اعداد بدون بعد متداول از قبیل موینگی، ثقلی و بوند، تحلیل می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که میزان تولید با افزایش عدد بوند و کاهش عدد موینگی (کاهش سرعت تزریق) رابطه مستقیم دارد. هر چند که این اعداد نمی‌توانند برای زمانیکه تمامی آزمایش‌ها را با یکدیگر مورد تحلیل قرار می‌دهیم رابطه‌ای ثابت داشته باشند. از این رو، تلاش شده است تا با ترکیب اعداد بدون بعد موجود، روشی مؤثر برای آنالیز و پیش‌بینی عملکرد تولید در روش ریزش ثقلی اجباری ارائه کنیم.

## ۲- آنالیز ابعدی

آنالیز ابعدی ابزار قدرتمندی است که می‌تواند برای کاهش تعداد متغیرهای آزمایشگاهی که بر روی عملکرد فرایند خاصی مؤثرند و یا برای یافتن رابطه‌ای بین پارامترهای کنترل کننده یک فرایند مورد استفاده واقع شود. اهمیت این روش بدان خاطر است که بدانیم از یک طرف روابط ریاضی بین متغیرهای کنترل کننده یک سیستم ناشناخته است و از طرف دیگر طراحی آزمایش‌های مناسب برای بررسی هر یک از این پارامترها غیر ممکن و هزینه بر است. هدف

حرکت سیال را در محیط‌های متخلخل دانه جدا به کمک آنالیز تصاویر بخوبی مورد تحلیل قرار داد. شکل (۱) بیانگر مراحل پردازش تصویر حرکت سیال و جدا کردن فازهای تر شونده و غیر ترشونده است.



شکل ۱- مراحل پردازش تصاویر خام گرفته شده از آزمایش‌ها در حالت دینامیک

### ۳-۲ آزمایش‌های مغزه

آزمایش‌های مغزه در یک دستگاه مغزه نگه‌دار ۶۰ سانتیمتری و بر روی مغزه‌های ماسه سنگی رخنمون از سازند آغاچاری انجام شده‌اند. میزان تخلخل ۱۶/۵ درصد و میزان تراوایی ۷۰ میلی داری است. آزمایش‌ها در حضور و عدم حضور آب همزاد انجام شده‌اند. استفاده از آب همزاد که در آزمایش‌های تزریق گاز در مغزه به صورت محلول آب نمک ۵۰ گرم در لیتر می‌باشد، امکان آنالیز فرایند ریزش ثقلی سه فازی را فراهم می‌سازد. در همه آزمایش‌ها، از گاز نیتروژن به عنوان گاز تزریقی و از نرمال دکان و پارافین به عنوان نفت استفاده شده است. خصوصیات سیال و محیط متخلخل در جدول‌های (۱) و (۲) بیان شده‌اند.

در این جدول‌ها، محیط‌های متخلخل از نوع (a) تا (f) تقسیم بندی شده‌اند. در هر گروه از آزمایش‌ها، گاز تحت سرعت‌های متفاوتی به محیط تزریق شده است. گروه (a) و (b)، محیط‌های متخلخل دانه‌های جدا در مدل فیزیکی ۱۲۰ سانتیمتری مشاهده‌ای و با تراوایی بین ۸ تا ۱۸ داری است. گروه (c)، محیط متخلخل با تراوایی حدود ۳ داری و در دستگاه مغزه نگه‌دار ۶۰ سانتیمتری است. آزمایش‌های گروه (d) در محیط متخلخل مشابه محیط (a) ولی در دستگاه مغزه نگه‌دار ۶۰ سانتیمتری و با نفتی با لزجت بالا می‌باشد. گروه‌های (e) و (f) آزمایش‌های ماسه سنگی با طول ۶۰ سانتیمتر و در فشار ۳۰ بار انجام شده است. در آزمایش‌های (f)، تزریق گاز در حضور آب همزاد انجام شده و تراوایی مؤثر ۵۵ میلی داری است.

### ۲-۲ انتخاب متغیرهای آزمایشگاهی

از معادله (۱) مشخص شده است که عدد موینگی به میزان سرعت گاز تزریقی، کشش سطحی و لزجت نفت بستگی دارد. برای تغییر عدد موینگی در بازه نسبتاً وسیع، لزجت نفت و شدت جریان گاز تزریقی به عنوان پارامترهای کنترل کننده انتخاب شده‌اند. سرعت بحرانی در فرایند ریزش ثقلی به عنوان معیاری برای تعیین شدت جریان گاز تزریقی انتخاب شده است. این معیار، توسط دو گروه از محققین [۱۳ و ۱۴] معرفی شده که به صورت معادله (۳) تعریف می‌شود:

$$v_c = \frac{k}{\mu_o} (\Delta p g) \quad (3)$$

در محدوده این سرعت، نیروی گرانش توسط نیروی ثقلی به تعادل نزدیک می‌شود و اثرات ناشی از پدیده انگشتی شدن به حداقل می‌رسد. در این مطالعه شدت جریان تزریق گاز از عدد بحرانی ریزش ثقلی تا حداقل ۵۰ برابر این عدد تغییر می‌یابد.

همچنین از معادله (۲) مشخص است که اختلاف چگالی و میزان نفوذ پذیری تراوایی می‌توانند به عنوان پارامتر اصلی در عدد بوند انتخاب شوند. از آنجا که میزان تغییرات اختلاف چگالی نفت و گاز تأثیر محسوسی در تعیین عدد بوند ندارد، برای تغییر عدد بوند در بازه نسبتاً وسیع، نمی‌توان از تغییر پارامتر  $\Delta p$  استفاده کرد.

### ۳-۳ آزمایش‌ها

در این بخش برای یادآوری آنچه که در ادامه بایستی مورد تحلیل قرار بگیرد، شرح بسیار مختصری از مواد، مراحل و مشخصات آزمایش‌ها مورد نظر آورده شده است. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها تزریق گاز در محیط متخلخل دانه جدا و مغزه‌های ماسه سنگی برای آنالیز مکانیزم ریزش ثقلی اجباری انجام شده است.

### ۳-۱ مدل فیزیکی برای آزمایش‌ها دانه جدا

برای انجام آزمایش‌ها دانه جدا از یک دستگاه مغزه نگه‌دار به طول ۶۰ سانتیمتر و قطر ۴ سانتیمتر و همچنین یک مدل مشاهده‌ای به طول ۱۲۰ سانتیمتر و قطر ۳ سانتیمتر استفاده شده است. قطر دانه‌های شیشه‌ای بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ میلی‌متر می‌باشد. تخلخل محیط حدود ۳۷ درصد و تراوایی با توجه به اندازه دانه‌ها بین ۳ تا ۲۰ داری می‌باشد. در آزمایش‌ها در مدل‌های مشاهده‌ای می‌توان

جدول ۱- خصوصیات مواد آزمایشگاهی استفاده شده در آزمایشها

چگالی نفت (kg/m <sup>3</sup> )	لزجت نفت (cP)	چگالی گاز (kg/m <sup>3</sup> )	لزجت گاز (cP)	کشش سطحی (mN/m)	آزمایشها
۷۴۰	۰/۸۵	۱	۰/۰۱۸	۲۰	آزمایشها در محیط متخلخل دانه جدا (تحت شرایط محیط (a,b,c)
۸۳۰	۲۳	۱	۰/۰۱۸	۲۰	آزمایشها در محیط متخلخل دانه جدا (تحت شرایط محیط (d)
۷۴۳	۰/۹-۰/۹۵	۳۲	۰/۰۲	۱۲	آزمایشها در مغزه‌های ماسه سنگی (تحت فشار ۳۰ bar (e,f)

\* اعداد کشش سطحی از طریق رابطه استفاده شده در روش PARACHOR به دست آمده‌اند.

جدول ۲- مشخصات آزمایشها ریزش ثقلی اجباری

محیط متخلخل دانه جدا						مغزه‌های ماسه سنگی				
$S_{wir}$	$\phi$ (تخلخل)	A (cm <sup>2</sup> )	$K_o$ (mD)	$Q_i$ (cc/min)	شماره آزمایشها	$Q_i$ (cc/min)	$\phi$ (تخلخل)	A (cm <sup>2</sup> )	$K_o$ (mD)	شماره آزمایشها
۰	۰/۱۶۵	۱۱/۴	۷۰	۰/۳	۱e	۳/۱	۰/۳۸	۷/۰۶	۱۸۵۰۰	۱a
۰	۰/۱۶۵	۱۱/۴	۷۰	۰/۵۲	۲e	۸/۰	۰/۳۷۵	۷/۰۶	۱۷۸۰۰	۲a
۰	۰/۱۶۵	۱۱/۴	۷۰	۰/۹	۳e	۱۶/۵	۰/۳۷۸	۷/۰۶	۱۷۰۰۰	۳a
۰	۰/۱۶۵	۱۱/۴	۷۰	۱/۲	۴e	۵	۰/۳۶۵	۷/۰۶	۸۸۰۰	۱b
۰/۲۸	۰/۱۶۵	۱۱/۴	۵۵	۰/۰۸	۱f	۱۰	۰/۳۷	۷/۰۶	۹۰۰۰	۲B
۰/۲۸	۰/۱۶۵	۱۱/۴	۵۵	۰/۱۵	۲f	۱۶	۰/۳۷۵	۷/۰۶	۸۵۰۰	۲b
۰/۲۸	۰/۱۶۵	۱۱/۴	۵۵	۰/۶	۳f	۲	۰/۳۷۵	۱۲/۵۶	۳۷۰۰	۱c
۰/۲۸	۰/۱۶۵	۱۱/۴	۵۵	۱/۵	۴f	۵/۵	۰/۳۸	۱۲/۵۶	۳۵۰۰	۲c
						۹/۵	۰/۳۷	۱۲/۵۶	۳۸۰۰	۳c
						۰/۹	۰/۳۶۵	۱۲/۵۶	۲۰۰۰۰	۱d
						۱/۲	۰/۳۷	۱۲/۵۶	۲۱۰۰۰	۲d
						۱/۶	۰/۳۷۵	۱۲/۵۶	۱۸۰۰۰	۳d

آنالیز می‌شوند. مقدار اعداد بدون بعد مورد استفاده در هر یک از

#### ۴- نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت، نتایج آزمایشگاهی بر اساس مجموعه اعداد بدون بعد آزمایشها در جدول (۳) گزارش شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی بر اساس مجموعه اعداد بدون بعد

محیط متخلخل دانه جدا					مغزه‌های ماسه سنگی				
RF @ 2 PV & RF نهایی	$Q_i/Q_c$	$N_c$ ( $10^{-7}$ )	$N_B$ ( $10^{-7}$ )	شماره آزمایش‌ها	RF @ 2 PV & RF نهایی	$Q_i/Q_c$	$N_c$ ( $10^{-5}$ )	$N_B$ ( $10^{-5}$ )	شماره آزمایش‌ها
۴۴-۵۶	۷/۷۸	۳/۲۹	۲/۵۶	۱e	۹۰-۷۹	۰/۴۶	۰/۳۱	۱/۷۶	۱a
۴۳-۵۵/۵	۱۳/۴۹	۵/۷۰	۲/۵۶	۲e	۸۶/۵-۷۰	۱/۲۴	۰/۸۱	۱/۷۲	۲a
۳۷/۵-۵۰	۲۳/۳۲	۹/۸۷	۲/۵۶	۳e	۸۵-۶۵/۵	۲/۶۸	۱/۶۵	۱/۶۳	۳a
۳۴/۵-۴۹	۳۱/۱۰	۱۳/۱	۲/۵۶	۴e	۸۵-۶۷	۱/۵۷	۰/۵	۰/۸۷	۱b
۵۰-۵۷/۵	۲/۸۱	۱/۱۲	۲/۴۲	۱f	۸۴-۶۲	۳/۱۰	۱/۰	۰/۸۸	۲B
۴۸-۵۶	۵/۲۸	۲/۱۱	۲/۴۲	۲f	۸۰-۵۸	۵/۲۰	۱/۶	۰/۸۲	۲b
۴۴-۵۱	۲۱/۱۱	۸/۴۲	۲/۴۲	۳f	۸۵/۵-۶۴/۵	۰/۸۴	۰/۱۱	۰/۳۶	۱c
۳۸/۵-۴۸	۵۲/۷۸	۲۱/۱	۲/۴۲	۴f	۷۹-۵-۵۵	۲/۴۴	۰/۳۱	۰/۳۳	۲c
					۵۴-۷۸/۵	۳/۸۸	۰/۵۳	۰/۳۷	۳c
					۵۷/۵-۷۹	۱/۵۸	۱/۳۱	۲/۲۸	۱d
					۵۱-۷۷	۲/۰۰	۱/۷۵	۲/۲۶	۲d
					۴۷/۵-۷۳	۳/۱۱	۲/۳۳	۲/۰۰	۳d

#### ۱-۴ عدد بوند

تغییرات عدد بوند با تغییر در تراوایی محیط متخلخل حاصل می‌شود و نتایج در حالی آنالیز می‌شود که عدد موینگی تقریباً ثابت است. به عنوان مثال، در بررسی نتایج در شکل (۲) و در قسمت (a)، نتایج آزمایشات 1a و 1b و 2c که از عدد موینگی تقریباً ثابتی برخوردار هستند و در عین حال عدد بوند آنها متفاوت می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته اند.

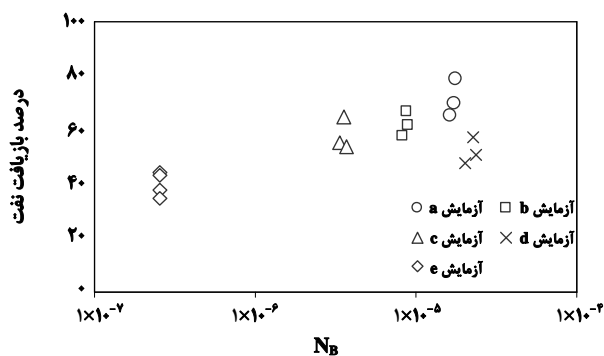
در محیط دانه جدا تغییر تراوایی با تغییر اندازه دانه ایجاد می‌شود، که هر چه دانه‌ها درشت تر باشد میزان تراوایی و عدد بوند بزرگتر می‌شود. برای مطالعه اعداد بوند بسیار کوچک، از مغزه‌های ماسه سنگی استفاده شده است. برای آنالیز داده ها، میزان تولید پس از تزریق نسبت حجم معینی از گاز به حجم خالی محیط گزارش شده

و وابستگی نتایج به عدد بوند در شکل (۲) نمایش داده شده است. این شکل از سه قسمت تشکیل شده و در هر قسمت میزان تولید در شرایطی که عدد موینگی و نسبت لزجت سیال تزریقی به نفت ثابت است بررسی می‌شود. همچنین میزان تولید در حالی که نسبت حجم گاز تزریقی دو برابر حجم فضای خالی محیط متخلخل می‌باشد گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهند، زمانی که نیروی ثقلی و اختلاف چگالی نفت و گاز حرکت سیال را در محیط متخلخل کنترل می‌کنند، میزان تولید نفت با افزایش عدد بوند افزایش می‌یابد. در این حالت، ارتفاع آستانه موینگی نسبت به ارتفاع کل ستون محیط متخلخل ناچیز است. در این آزمایش‌ها، نیروی موینگی، نیروی مقاوم در تولید نفت است و به صورت منفی بر روند تولید نفت در اثر تزریق گاز اثر می‌گذارد.

افزایش می‌یابد، کم می‌شود. برای تعمیم کاربرد آنالیز داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از عدد بوند، میزان تولید نفت تحت مکانیزم ریزش ثقلی برای تمامی داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان داده شده است. به‌طور روشن، امکان هیچ نوع برازش منحنی خاصی بر روی داده‌های تولیدی و عدد بوند، دیده نمی‌شود. آنالیز داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از عدد بوند دو محدودیت عمده دارد:

۱. تأثیر نیروی گرانش در داده‌ها دیده نمی‌شود. نیروی گرانش بر روی عدد بوند تأثیری ندارد و در نتیجه آنالیز تعیین اثر شدت جریان تزریقی بر روی داده‌های تولیدی با استفاده از عدد بوند، در حالی که عدد موینگی متغیر است، امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۲. آنالیز تأثیر نسبت لزجت سیال تزریقی بر روی لزجت نفت با استفاده از عدد بوند بر روی داده‌ها میسر نیست.

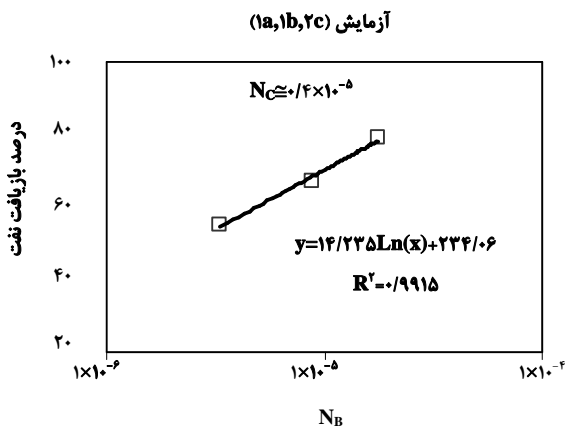


شکل ۳- رابطه عدد بوند با نفت تولیدی برای تمامی آزمایش‌ها

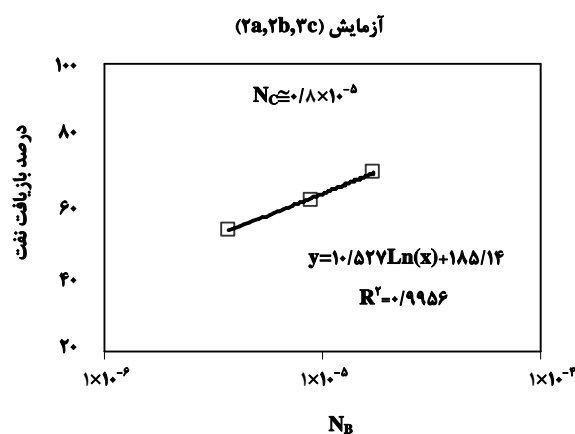
#### ۲-۴ عدد موینگی

عدد موینگی یک پارامتر کلیدی در آنالیز تولید نفت تحت تأثیر تزریق گاز می‌باشد. در اکثر فرایندهای تزریق گاز، نسبت تحرک گاز به نفت نامساعد بوده، که موجب پیدایش نواحی انگشتی در جبهه تزریق گاز می‌شود. افزایش نیروی گرانش (عدد موینگی) در فرایندهای تزریق گاز باعث گسترده شدن تأثیر منفی نسبت تحرک گاز به نفت و گسترش نواحی انگشتی می‌شود. افزایش نیروی گرانش و شدت جریان گاز تزریقی بر روی مکانیزم تولید نفت دو اثر به دنبال خواهد داشت:

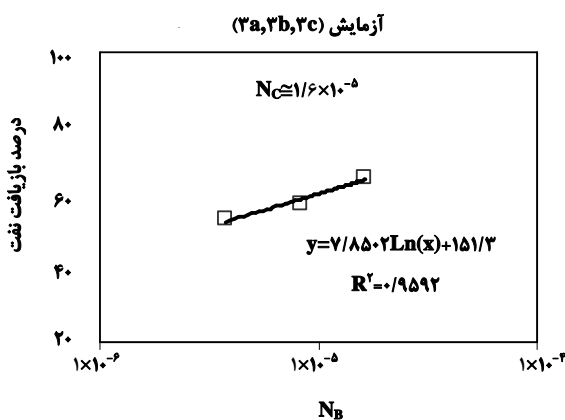
۱. باعث تولید نفت از ناحیه آستانه موینگی و تقابل بهتر با نیروی مخالف موینگی می‌گردد و میزان تولید از این جهت افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

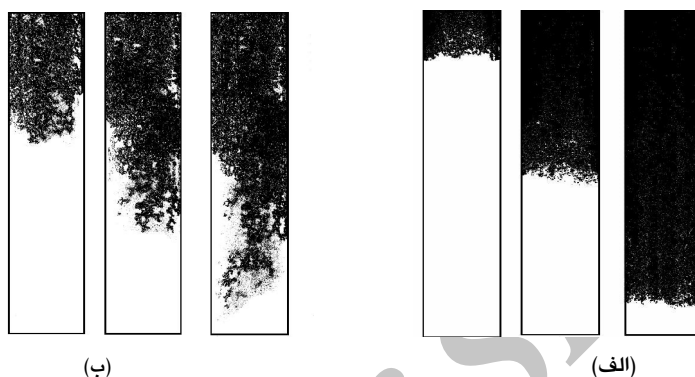
شکل ۲- رابطه عدد بوند با نفت تولیدی در عدد

#### موینگی تقریباً ثابت

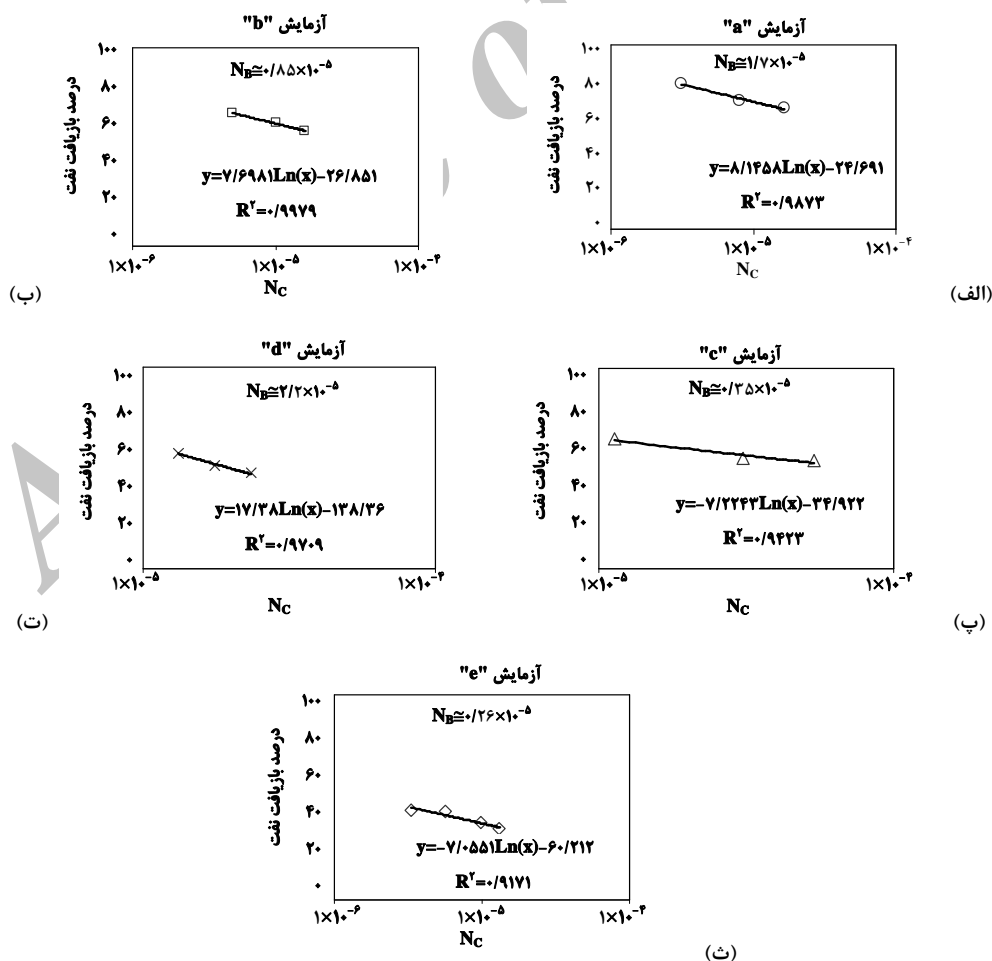
شیب خطوط برازش شده بر روی داده‌ها نشان می‌دهد که تأثیر عدد بوند بر روی داده‌های آزمایشگاهی در حالی که عدد موینگی

حرکت ناپایداری شده و میزان قابل توجهی از نفت در پشت جبهه تزریق گاز باقی می‌ماند. ضریب بازیافت نفت بعد از تزریق دو برابر فضای خالی محیط متخلخل بر حسب عدد موینگی، در حضور عدد بوند تقریباً ثابت، ارزیابی شده است. نتایجی که در شکل (۵) آورده شده نشان می‌دهد که میزان تولید برای مقادیر پایین عدد موینگی، که در آن جبهه تزریق گاز پایدار است، بیشترین مقدار می‌باشد.

۲. باعث گسترش ناپایداری جبهه تزریقی گاز گسترش نواحی انگشتی می‌گردد و از این جهت تولید نفت کاهش می‌یابد. شکل (۴) ساختار حرکت گاز در محیط متخلخل را در حالی نشان می‌دهد که نیروی گرانش داده‌های تولیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و پدیده انگشتی شدن به علت افزایش نیروی گرانش رخ داده است. بر اساس این تصاویر در سرعت‌های پایین، جبهه تزریق گاز پایدار است. در حالی که هر چه سرعت گاز تزریقی افزایش می‌یابد، جبهه



شکل ۴- حرکت جبهه سیال تزریقی در (الف) سرعت پایدار (ب) سرعت ناپایدار



شکل ۵- رابطه عدد موینگی با نفت تولیدی در عدد بوند تقریباً ثابت

همچنین مطالعات آزمایشگاهی متعددی [۱۵-۱۸] بر اساس نظریه تراوش برای تعیین میزان ناپایداری در جبهه حرکت دو فاز در مکانیزم ریزش ثقیلی وجود دارد. این نظریه، رابطه زیر را برای پایداری جبهه دو فاز غیر قابل امتزاج پیش بینی می‌کند:

$$w \approx (N_B - N_C)^{-(v/1+v)} \quad (5)$$

در این معادله  $w$  مقدار جبهه نفوذ و  $v$  یک توان همبستگی است. بر این اساس، می‌هاسست و همکارانش [۱۹] به‌مراه لوول و همکارانش [۲۰] عدد بوند عمومی را به صورت زیر تعریف کردند:

$$N_B - N_C = N_B^* \quad (6)$$

و نشان دادند که اگر  $N_B^* \rightarrow 0$ ، میزان  $w$  در معادله نامتناهی می‌شود. بنابراین رابطه زیر بایستی برای متناهی بودن  $w$  و پایداری جبهه تزریق برقرار باشد:

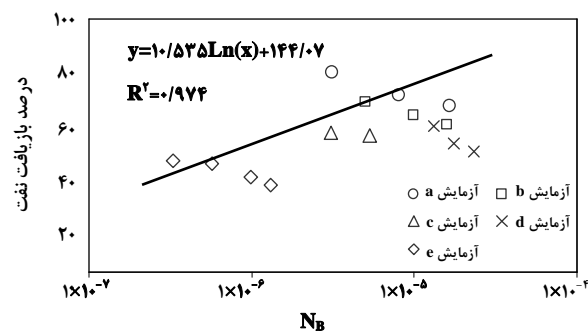
$$N_B - N_C = N_B^* > 0 \quad (7)$$

بعد از ساده سازی رابطه فوق، معیار زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta \rho g k / \mu_o > v \quad (8)$$

این رابطه مشابه رابطه (۴) است و صحت آن را می‌توان در مشاهدات شکل جبهه تزریق مورد بررسی قرار داد. شکل (۷)، جبهه تزریق گاز را زمانی که میزان گاز تزریقی ۰/۵، ۱/۳ و ۲/۶ برابر حداکثر شدت جریان تولیدی می‌باشد، نشان می‌دهد. بر اساس آنالیزهای تصویری در شکل (۷)، زمانی که نسبت شدت جریان تزریقی به شدت جریان بحرانی نزدیک باشد ( $v/v_c = 0/5$ )، جبهه حرکت گاز، پایدار است و زمانیکه این نسبت افزایش می‌یابد ( $v/v_c = 1/3$ )، ناپایداری آغاز می‌شود و با افزایش این نسبت ناپایداری تشدید می‌گردد ( $v/v_c = 2/6$ ).

برای تعمیم کاربرد آنالیز داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از عدد موینگی، میزان تولید نفت تحت مکانیزم ریزش ثقیلی برای تمامی داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، امکان هیچ نوع برازش خاصی بر روی داده‌های تولیدی که بر حسب نیروی موینگی ترسیم شده اند وجود ندارد. هر چند که از بخشی از داده‌ها می‌توان خط برازش نسبتاً خوبی رسم کرد، باید توجه داشت که این خط کماکان نمی‌تواند در برگزیده تمامی داده‌های آزمایشگاهی باشد.



شکل ۶- رابطه عدد موینگی با نفت تولیدی برای تمام آزمایش‌ها

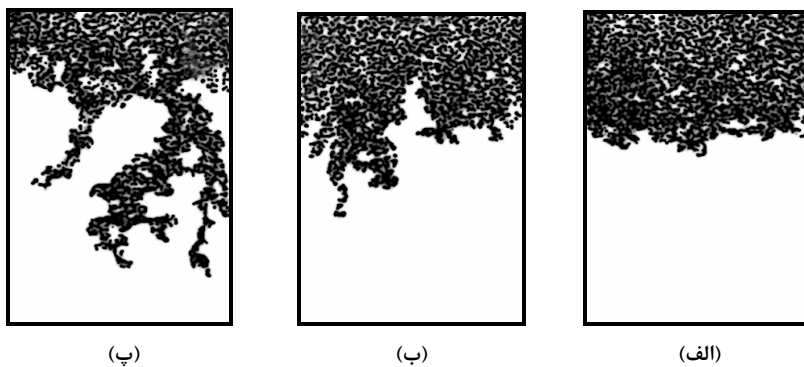
#### ۴-۳ نفوذ گاز تحت تأثیر نیروی ثقیلی

در صورتی که نیروی ثقیلی بزرگتر از نیروی گرانشی باشد، نفوذ فاز غیر ترشونده در فاز ترشونده، به صورت پایدار صورت می‌گیرد. این مفهوم با استفاده از ترکیب قانون داری و نظریه تراوش قابل توجیه است. برای آنالیز پدیده ریزش ثقیلی در حالیکه جابجایی بین دو فاز گاز و نفت که اختلاف لزجت شدیدی دارند، تعدادی مطالعات آزمایشگاهی متعددی صورت گرفته است. به عنوان مثال، هاگورت [۲] در سال ۱۹۸۰ نشان داد که از معیار زیر برای پایداری جبهه تزریق گاز استفاده کرده است:

$$v_c > v \quad (4)$$

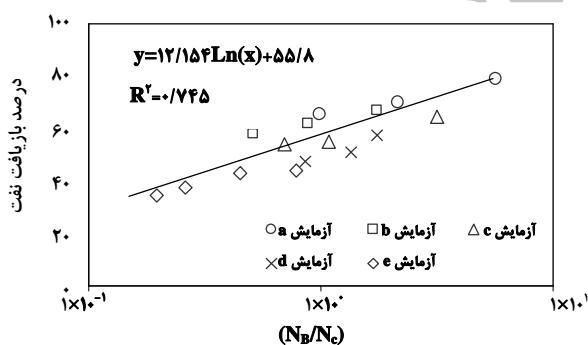
که در آن  $v_c$  شدت جریان بحرانی در ریزش ثقیلی و  $v$  سرعت گاز تزریقی می‌باشد. پارامتر  $v_c$  در رابطه (۳) تعریف شده است.





شکل ۷- شکل حرکت گاز در سرعت‌های مختلف: (الف)  $(v/v_c) = 0.5$  (ب)  $(v/v_c) = 1/3$  (پ)  $(v/v_c) = 2/6$

که در آن،  $\mu_T = (\mu_g/\mu_o)$ ، مقادیر A, B نیز مقادیر برازش می‌باشند که در این تحقیق  $A=B=0.5$  بهترین برازش را می‌دهد. شاید بهترین تعبیر فیزیکی از این عدد آن باشد که به دلیل کم بودن توان پارامترهای  $\mu_T$  و  $N_C$  اهمیت این اعداد در مکانیزم مورد مطالعه کمتر از  $N_B$  است. به عبارت دیگر در عدد به‌دست آمده تأثیر نسبت نیروهای ثقلی به موینگی از نسبت نیروهای گرانشی به موینگی بیشتر است.



شکل ۸- رابطه نسبت عدد بوند به موینگی با نفت تولیدی در آزمایش‌های مختلف

نتایج آنالیز داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از عدد  $N_{CO}$  در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. این عدد بی بعد به خوبی اثر نیروهای موینگی، ثقلی و گرانشی را مشخص می‌سازد. این نتایج نشان می‌دهند که در طیف آزمایش‌های انجام شده، یک رابطه لگاریتمی بین داده‌های تولیدی و عدد بی بعد معرفی شده وجود دارد.

### ۵- عدد بی بعد ترکیبی جدید

آنالیز داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از اعداد بدون بعد مطرح شده نشان می‌دهد که استفاده مجزا از هر یک از این اعداد نمی‌تواند برای پیش بینی نرخ تولید در مکانیزم ریزش ثقلی اجباری کافی باشد. در ادامه یک عدد بدون بعد ترکیبی جدید که در بردارنده تمامی اعداد قبلی نیز هست، برای آنالیز همه داده‌ها معرفی می‌گردد. در ابتدا اهمیت فیزیکی این عدد بدون بعد ترکیبی که در آن تمامی اعداد ذکر شده مطرح شده اند مورد بحث قرار می‌گیرد. معادلات زیر نشان می‌دهند که تولید نفت با عدد بوند مستقیم و با عدد موینگی رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر:

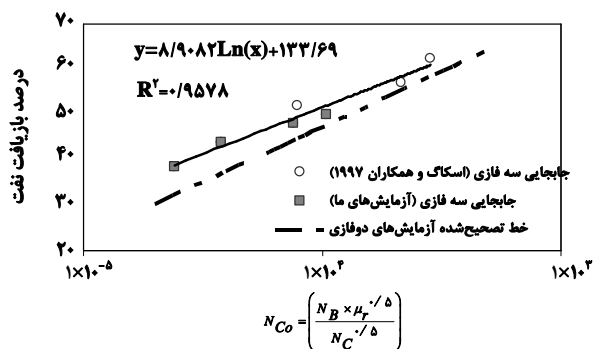
$$RF \propto 1/N_C$$

$$RF \propto N_B$$

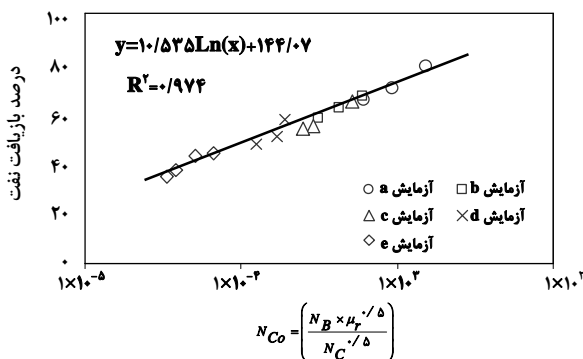
شکل (۸) نشان می‌دهد، میزان تولید نفت پس از تزریق گاز به میزان دو برابر فضای خالی (وقتی که داده‌های نفت با لزجت بالا حذف شده‌اند) ارتباط مستقیمی با نسبت  $\frac{N_B}{N_C}$  دارد.

برای آنالیز داده‌های تولیدی نفت با لزجت بالا و همچنین یافتن نسبت مناسب عدد بوند به موینگی، یک عدد ترکیبی جدید به صورت زیر معرفی شده است:

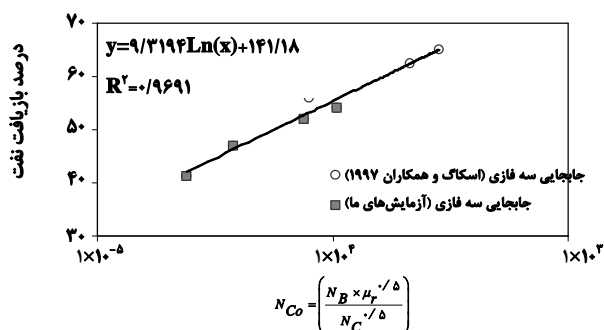
$$N_{CO} = \frac{N_B \times (\mu_T)^A}{N_C^B} \quad (9)$$



(الف)



شکل ۹- رابطه عدد بدون بعد ترکیبی جدید با نفت تولیدی



(ب)

شکل ۱۰- رابطه عدد بدون بعد ترکیبی با نفت تولیدی در

سیستمهای سه فاز از تزریق (الف) PV ۲ (ب) PV ۴

✓ بر اثر افزایش نرخ تزریق گاز، میزان تولید نفت در زمان رسوخ گاز و یا بر حسب حجم مشخصی از گاز تزریقی برای تمامی آزمایش‌ها کاهش می‌یابد. در این آزمایش‌ها، بر اثر افزایش نیروی گرانش، نسبت تحرک (نفت/گاز) نامناسب شده که این خود موجب افزایش ناپایداری در حرکت جبهه تزریق و بوجود آمدن و تشدید پدیده انگشتی می‌شود. هرچند که ضریب بازیافت در انتهای برخی از محیط‌هایی که تحت سرعت‌های مختلف جریان داده شده بودند، بسیار بهم نزدیک بوده‌اند و این خود مؤثر بودن حرکت فیلمی سیال غیر ترشونده در جایجایی ثقلی را نشان می‌دهد.

✓ نتایج نشان می‌دهند که نرخ تولید با افزایش لزجت فاز نفت رابطه عکس دارد و همچنین افزایش نفوذپذیری نیز موجب افزایش نیروی ثقلی در برابر نیروی بازدارنده مویینگی و موجب افزایش تولید می‌شود.

✓ تحلیل جامع از مطالعه عوامل مؤثر بر ریزش ثقلی اجباری و

### ۵-۱ بررسی کارآیی عدد بدون بعد ترکیبی با سایر آزمایش‌ها

برای بررسی صحت اعتبار عدد بی بعد ترکیبی پیشنهادی، از داده‌های آزمایشگاهی گروه (f) استفاده شده است. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که میزان تولید آزمایش‌های سه فاز و عدد ترکیبی ارتباط مناسبی دارند. همچنین از نتایج آزمایش‌ها اسکائوجی [۲۱] که بر روی مغزه‌های بلند صورت گرفته است، برای بررسی اعتبار عدد بدون بعد معرفی شده، استفاده شده است. بین این داده‌ها و عدد بدون بعد جدید نیز یک رابطه مناسب با میزان پراکتندگی پایین دیده می‌شود. در بخش (الف) از شکل (۱۰) علاوه بر داده‌های سه فاز، داده‌های دو فاز نیز تحلیل شده است. علت اختلاف بین داده‌های دو فاز و سه فاز به خاطر وجود فیلم نفت و ضریب پخش شوندگی مثبت در آزمایش‌های سه فاز است که به تولید نفت در انتهای فرایند تزریق گاز کمک می‌کند.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آزمایش‌های تزریق گاز به کمک ریزش ثقلی اجباری در جایجایی به روش غیر امتزاجی در مدل‌های کم فشار مشاهده‌ای و فشار بالا در حضور مغزه‌های ماسه سنگی انجام پذیرفت. هدف از این تحقیق نگاهی نو و تازه بر چگونگی روند تولید و ارزیابی عوامل مؤثر بر ضریب بازیافت به روش ریزش ثقلی اجباری بوده است. از این رو با تغییر پارامترهای مؤثر از جمله نفوذپذیری محیط، نرخ تزریق و نوع سیال، سعی در تحلیل عوامل حاکم بر جریان و تفسیر جدیدی در عملکرد این روش داشتیم. در انتها نیز با استفاده از اعداد بدون بعد، مطالعات روشمندی در جهت آنالیز آزمایش‌های انجام شده صورت پذیرفت. از این رو بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل‌های صورت گرفته، نتایج زیر به دست آمده است:

شدت جریان تزریق	$Q_i$	بررسی نتایج به کمک اعداد بدون بعد نشان می‌دهد که ضریب
شدت جریان بحرانی ریزش ثقلی	$Q_c$	تولید نفت با نسبت نیروهای ثقلی به موینگی (عدد بوند) و
عدد بوند	$N_B$	همچنین نسبت نیروهای ثقلی به گرانش را رابطه مستقیم و با
عدد بوند نرمال شده	$N_B^*$	نسبت نیروهای گرانش به موینگی (عدد موینگی) نسبت عکس
عدد موینگی	$N_c$	دارد. اما هیچ یک از اعداد بدون بعد موجود به تنهایی نمی‌توانند
عدد بدون بعد ترکیبی	$N_{co}$	پیش‌بینی‌کننده روند تولید نفت در بازه وسیعی از آزمایش‌ها
نسبت عدد موینگی به ثقلی	$N_{cg}$	باشند. از این رو، و پس از انجام آنالیزهای متفاوت، به عدد بدون
اختلاف فشار ثقلی	$\Delta P_{grav}$	بعد ترکیبی جدیدی دست یافتیم که می‌تواند تمام داده‌ها و
اختلاف فشار موینگی	$\Delta P_{cap}$	نتایج به دست آمده را در بازه آزمایش‌های انجام شده به خوبی
		تفسیر و پیش‌بینی کند. در طیف آزمایش‌های انجام شده، یک
		رابطه لگاریتمی بین داده‌های تولیدی و عدد بدون بعد معرفی
		شده وجود دارد.

### مراجع

- [1] Kulkarni, M.M. and Rao, D.N., "Characterization of Operative Mechanisms in Gravity Drainage Field Projects through Dimensional Analysis", Louisiana State University, USA, SPE paper103230, (2006).
- [2] Hagoort, J., "Oil Recovery by Gravity Drainage", Society of Petroleum Engineers Journal, 20(3), pp. 139-150, (1980).
- [3] Chatzis, I., Kantzas, A., Dullien, F.A.L., "On the Investigation of Gravity-Assisted Inert Gas Injection Using Micro models", Long Berea Sandstone Cores, and Computer-Assisted Tomography, SPE 18284, Houston, U.S.A., (1988).
- [4] Da Sle, W.J., Guo, D.S., "Assessment of vertical hydrocarbon miscible flood in the West perm Nisku D Reef", SPE Reservoir Engineering (May): 147-154, (1990).
- [5] Bangla, V.K., Yau, F., "Hendricks, G.R. Reservoir performance of a Gravity stable vertical CO2 miscible flood: Wolf camp reservoir", Wellman Unit. SPE 22898, (1991).
- [6] Kantzas, A., Chatzis, I., Dullien, F. A. L., "Enhanced Oil Recovery by Inert Gas Injection", SPE 17379, SPE/DOE Symposium of Oil Recovery, Tulsa, U.S.A., (1998).
- [7] Rao, D.N., Ayirala, S.C., Kulkarni, M.M., Sharma, A.P., "Development of Gas Assisted Gravity Drainage (GAGD) process for Improved Light Oil Recovery", SPE Paper 89357, presented at the SPE/DOE Symposium on improved oil recovery, Tulsa, April 17-21, (2004).
- [8] Jadhawar, P.S., Sarma, H.K., "Scaling and sensitivity analysis of Gas-oil gravity drainage EOR", SPE 115065, Perth, Australia, (2008).

### ۷- تشکر و قدردانی

در ابتدا از آقای دکتر مهران پولادی درویش که در طول این تحقیق ما را از حمایت‌های علمی و مشاوره‌های کارساز خویش بهره‌مند ساختند، کمال تشکر را داریم. از تکنیسین آزمایشگاه، آقای حسن سلیمی، بدلیل زحمات فراوان، دقت عمل و پیگیری‌های مستمر در بخش آزمایشگاهی قدردانی می‌شود. همچنین از خانم مهندس خسروی و آقای مهندس علیپور بدلیل همکاری در انجام آزمایش‌ها و تحلیل نتایج تشکر می‌گردد. از مرکز پژوهش و توسعه شرکت ملی نفت ایران نیز به خاطر حمایت‌های مالی از این تحقیق قدردانی می‌شود.

### ۸- فهرست متغیرها

$\phi$	تخلخل
$g$	ثابت گرانش
$k$	نفوذ پذیری مطلق
$\mu$	گرانروی
$\sigma$	کشش سطحی
$w$	پهنای جبهه نفوذ
$v$	سرعت
$v_c$	سرعت بحرانی ریزش ثقلی

- [9] Grattoni, C.A., Jing, X.D, Dawe, R.A., "Dimensionless groups for three-phase gravity drainage flow in porous media", *J. Petrol. Sci. Eng.*, 29, pp. 53-65, (2001).
- [10] Gharbi, R., "Dimensionally scaled miscible displacement in heterogeneous permeable media", *Transp. Porous Media*. 48, 271, (2002).
- [11] Wood, D.J., Lake, L.W., Johns, R.T., Nunez, V., "A screening model for CO2 flooding and storage in gulf coast reservoirs based on dimensionless groups", *SPE Res. Eval. Eng.* 11 (3), 513-520, (2008).
- [12] Shook, M., Li, D., Lake, L.W., "Scaling immiscible flow through permeable media by inspectional analysis", *In-Situ*. 4, 311-349, (1992).
- [13] Blackwell, J.T., Terry, M.W., "Factors influencing the efficiency of miscible displacement", *Trans AIME*, 216, 1-8, (1959)
- [14] Dumore, J. M., "Stability Considerations in Downward Miscible Displacements", *SPE Journal*, pp. 356 – 362, *Trans AMIE* 231, December, (1964).
- [15] Wilkinson, D., "Percolation effects in immiscible displacement", *Phys. Rev. A.*, 34, pp. 1380–1391, (1986).
- [16] Stauffer, D, Aharony, A., "Introduction to percolation theory", 2nd edition. Taylor & Francis, (1991).
- [17] Auradou, H., Maloy, K.J., Schmittbuhl, J., Hansen, A., Bideau, D., "Competition between correlated buoyancy and uncorrelated capillary effects during drainage", *Phys. Rev. E.* 60(6), 7224-34, (1999).
- [18] Birovljev, A., Furuberg, L., Feder, J., Jossang, T., Maloy, K.J., Aharony, A., "Gravity invasion percolation in two dimensions: experiment and simulation", *Phys. Rev. Lett.* 67, 584–587, (1991).
- [19] Meheust Y., Lovoll G., Maloy K.J., Schmittbuhl J., "Interface scaling in a 2d porous medium under combined viscous, gravity and capillary effects", *Physical Review E.*, 66, pp. 51603-15, (2002).
- [20] Lovoll G., Meheust Y., Maloy K.J., Aker E., "Competition of gravity, capillary and viscous forces during drainage in a two-dimensional porous media", a pore scale study. *Energy J.*, 30, (6), pp. 861-872, (2005).
- [21] Skauge, A., Eleri, O., Graue, A., Monstad, P., "Influence of Connate Water on Oil Recovery by Gravity Drainage", *SPE/DOE 27817*, presented at the *SPE/DOE Ninth Symposium on Improved Oil Recovery*, Tulsa, OK Apr 17 – 20, (1994).