

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر پدیده مارانگونی گرمایی در بازیافت نفت پسمانده

محمد مسعودی

انستیتو مهندسی نفت، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مریم خسروی

پژوهشکده ازدیاد برداشت، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

بهزاد رستمی\*، پژمان ابوالحسینی

انستیتو مهندسی نفت، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

**چکیده:** در این مطالعه اثر گرادیان تنش میان رویه ناشی از تغییر دما (پدیده مارانگونی گرمایی)، بر ازدیاد برداشت نفت به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نظر به تعداد کم مطالعه‌های انجام شده در این حوزه، برای شناخت و درک درست این مکانیسم در محیط متخلخل از میکرومدل شیشه‌ای استفاده شد. طراحی آزمایش‌ها با استفاده از آنالیز عددی بدون بعد و بررسی نمودارهای تغییر تنش میان رویه نسبت به دما و فشار به روشی انجام شد، که افزون بر نزدیک بودن شرایط آزمایش‌ها به شرایط محیط متخلخل در مخزن‌های نفتی و قابل مقایسه بودن آزمایش‌های گوناگون، جریان مارانگونی نیز در بین مکانیسم‌های فعال دیگر قابل تمیز بوده و جریان غالب باشد. در این آزمایش‌ها گاز کربن دی‌اکسید و متان به طور جداگانه و در دمای پایین، به میکرومدل اشباع از نفت در دمای بالا تزریق شدند تا با ایجاد شوک گرمایی لازم در سطح تماس گاز و نفت، باعث به وجود آمدن جریان همرفتی مارانگونی شوند. در پایان احتمال وقوع هر مکانیسم به طور جداگانه و به صورت کمی و کیفی بررسی شد. آزمایش‌های انجام شده، نشان می‌دهد که جریان همرفتی مارانگونی ناشی از تغییر دما، تأثیر به سزایی در بازیافت نفت داشته و می‌تواند با غلبه بر نیروی موئینه سبب ورود گاز به ماتریس‌های اشباع از نفت پس مانده و تولید از آن‌ها شود. شدت این جریان متناسب با عدد مارانگونی می‌باشد. افزایش یا کاهش میزان بازیافت نسبت به آزمایش‌های هم‌دما، نشانگر نقش این مکانیسم درون محیط متخلخل است. بر اساس نتیجه‌های این مطالعه در نظر گرفتن وجود جریان مارانگونی در شرایط تزریق سیال به مخزن (به ویژه مخزن‌های کم فشار) می‌تواند دارای اهمیت باشد.

**کلمات کلیدی:** تزریق گاز سرد؛ تزریق گاز درون شکاف؛ جریان همرفتی مارانگونی گرمایی؛ میکرومدل.

**KEYWORDS:** Cold gas injection, Gas injection in the fracture, Thermal Marangoni convection, Micromodel

## مقدمه

ریزش ثقیلی، مکانیسم فعال تولیدی در ناحیه مورد هجوم گاز قرار گرفته<sup>۱</sup> در مخازن شکاف دار می باشد. ولی سرعت تخلیه نفت با اتکا به این مکانیسم بسیار کم است. افزون بر این پس از مدتی نیروهای موئینه و ثقیلی هم ارز شده و نیروهای موئینه اجازه تولید با مکانیسم ریزش ثقیلی را نمی دهند [۱].

یکی از مکانیسم های افزایش برداشتی که می تواند باعث تولید نفت به جامانده در سامانه های ماتریس - شکاف شود، پدیده ی مارانگونی<sup>۲</sup> است [۲]. اثر مارانگونی به پدیده انتقال جرمی اطلاق می شود که در طول فصل مشترک دو سیال به سبب وجود "گرادیان" تنش میان رویه رخ می دهد و جریان های همرفتی نیرومند از نقطه های با تنش میان رویه کم تر به سمت نقطه های با تنش میان رویه بیش تر ایجاد می کند. این اثر که ممکن است به خاطر انتقال گرما، جرم و یا بار الکتریکی به وجود بیاید [۳]، می تواند باعث چند برابر شدن انتقال جرم شود. هنگامی که اختلاف دما وجود دارد، از این پدیده با نام همرفت گرمایی - موئینی نیز یاد می شود. (همچنین به این پدیده جابه جایی بنارد<sup>۳</sup> - مارانگونی نیز گفته می شود.)

پدیده مارانگونی گرمایی برای اولین بار توسط هانری بنارد در اوایل قرن ۲۰ میلادی دیده شد. او یک دستگاه آزمایشگاهی برای مطالعه رفتار یک لایه نازک از موم سفید بر روی یک صفحه فلزی معلق در بالای حمام آب جوش طراحی کرد. بنارد دید که دور از مرزهای ظرف، سلول های شش ضلعی شکل می گیرند. او به درستی تشخیص داد که سیال گرم به سمت مراکز سلول های گرمایی جریان می یابد [۴]. در ادامه لرد رایلی<sup>۴</sup> با تجزیه و تحلیل پایداری خطی، بیان کرد که نیروهای شناوری عامل تولید سلول های همرفتی است؛ ولی سامانه ای که رایلی در نظر گرفته بود، با سامانه مورد استفاده بنارد متفاوت بوده و نتیجه های این دو قابل تعمیم به یکدیگر نبودند [۵]. در سال ۱۹۵۶ میلادی بلاک<sup>۵</sup> [۶] به طور تجربی و در سال ۱۹۵۸ میلادی پیرسون<sup>۶</sup> [۷] از لحاظ نظری، ثابت کردند که در واقع تغییر در کشش سطحی، به خاطر تغییرهای دمایی سطح مایع، باعث ایجاد سلول های همرفتی بنارد شده است. از آن زمان به بعد پژوهش های فراوانی در این زمینه انجام و کاربردهای فراوان این پدیده در دانش های گوناگون اثبات شد.

گروتیوس و زویدروگ<sup>۷</sup> در سال ۱۹۶۰ میلادی برای اولین بار این فرضیه را مطرح کردند که همرفت مارانگونی می تواند با ایجاد نوسان در سطح تماس دوفاز، باعث افزایش انتقال جرم و در نتیجه افزایش تولید نفت شود [۸]. کم<sup>۸</sup> در سال ۱۹۸۳ میلادی [۹] و پرت<sup>۹</sup> در سال ۱۹۹۱ میلادی [۱۰]، در یک کار آزمایشگاهی همانند به بررسی اثر مارانگونی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مارانگونی باعث بازیافت بیش تر نفت می شود. لو و همکاران در سال ۱۹۹۶ میلادی در مطالعه ی حلال های الکلی گوناگون به این نتیجه رسیدند که مارانگونی، انتقال جرم را ۳ تا ۴ برابر می کند [۱۱]. لیفور<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۹۸ میلادی، به این نتیجه رسید که میزان گرادیان کشش سطحی نقش کنترل کننده ای در بازیافت نفت دارد [۱۲]. دیتیر و داسیلوا<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۰۵ میلادی، به محاسبه عدد مارانگونی برای سامانه الکل (مایع) های گوناگون در برابر کربن دی اکسید (گاز) پرداختند. آن ها اثر مارانگونی را با این عدد مشخص ساخته و گزارش کردند که براساس جهت انتقال جرم، مارانگونی می تواند به ازدیاد برداشت کمک کند و یا از آن جلوگیری نماید [۳]. در سال ۲۰۱۴ میلادی خسروی و همکاران با تزریق کربن دی اکسید به یک مدل ماتریس - شکاف، نشان دادند که جریان مارانگونی بازیافت نفت به جامانده درون ماتریس را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد و افزایش بازیافت نفت متناسب با عدد مارانگونی است [۱۳].

شدت جریان مارانگونی با عدد بدون بعد مارانگونی (معادله (۱)) مشخص می شود. این عدد معیاری برای تأثیر متقابل نیروهای موئینی و نیروهای اصطکاک مولکولی (تنش های برشی سطحی) است. این عدد پدیده موئینی حرارتی در سطح آزاد سیال و تأثیر کشش سطحی بر پیدایش جریان همرفتی در یک لایه سیال نازک را مشخص می کند [۱۴].

$$Ma = \frac{\partial IFT}{\partial T} \frac{L \Delta T}{\mu \alpha} \quad (1)$$

در این معادله  $Ma$  بیانگر عدد مارانگونی،  $\frac{\partial IFT}{\partial T}$  گرادیان تنش میان رویه نسبت به دما (N/m/K)،  $L$  طول مشخصه (m)،  $\Delta T$

(۱) Gas Invaded Zone

(۲) Marangoni phenomenon

(۳) Benard

(۴) Lord Rayleigh

(۵) Block

(۶) Pearson

(۷) Groothuis and Zuideweg

(۸) Lam

(۹) Pratt

(۱۰) Lyford

(۱۱) D'Aubeterre, Da Silva

داده شد. با توجه به این که نتیجه‌های آزمایشگاهی موجود برای مقادیرهای تنش میان‌رویه، محدود به دما و فشارهای خاصی می‌باشد، لازم است که مدلی مورد اعتماد برای پیش بینی خواص فیزیکی و رفتار فازی سیالات در شرایط گوناگون تهیه شود. برای ساخت این مدل از شبیه‌ساز تجاری PVTi استفاده شده است. با توجه به تطبیق خوب نتیجه‌های شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی تنش میان‌رویه در پژوهش‌های موجود [۱۶، ۱۵]، برای مقادیرهای تنش میان‌رویه برای طراحی آزمایش‌ها، از مدل شبیه‌سازی شده استفاده شد.

شمای تجهیزهای آزمایشگاهی در شکل ۱ آمده است که شامل آن (با قابلیت تنظیم دما)، حمام آب سرد و یخ، پمپ برای به گردش در آوردن آب جهت سرد نگه داشتن ورودی گاز به میکرومدل، میکرو پمپ با قابلیت تزریق نرخ کم سیال، پمپ برای تثبیت فشار، سیلندر انتقال، شیر یک سوپه برای تثبیت فشار، دوربین و منبع نور می‌باشد.

برای انجام آزمایش‌ها پس از رسیدن دمای میکرومدل اشباع از دکان به دمای مورد نظر، با توجه به شرایط آزمایش و در صورت لزوم، میکرومدل به فشار می‌رسد. پس از آن تزریق گاز با نرخ ثابت به شکاف آغاز می‌شود. با توجه به این که قسمتی از لوله انتقال گاز از آن می‌گذرد، این لوله درون لوله‌ای دیگر قرار می‌گیرد که در آن آب سرد در جریان است. بنابراین از سرد ماندن گاز تا ورودی میکرومدل اطمینان ایجاد می‌شود. آزمایش‌ها تا زمانی که دکان در حال تخلیه است، ادامه می‌یابند. در طول تزریق با استفاده از دوربین عکاسی تصویرهای میکرومدل ضبط شده و سپس آنالیز می‌شوند. پس از هر آزمایش، میکرومدل با تولوئن، متانول و آب مقطر شسته شده تا از تمیز بودن میکرومدل و برابر بودن شرایط آزمایش‌ها اطمینان به دست آید.

برای انجام آزمایش‌ها، با استفاده از الگوی همگن شکل ۲، تأثیر جریان مارانگونی بر بازیافت نفت از ماتریس در مجاورت شکاف مطالعه می‌شود. مطابق شکل تزریق و تولید گاز به ترتیب از مجراهای ۱ و ۲ انجام می‌شوند و مجرا ۳ تنها برای اشباع ماتریس استفاده می‌شود و در حین آزمایش‌های اصلی بسته خواهد بود.

شکل ۳ بیانگر نتیجه‌های آزمایشگاهی تغییرهای تنش میان‌رویه نسبت به فشار برای سامانه کربن دی‌اکسید / دکان می‌باشد [۱۵]. در فشارهای گوناگون روند تغییرهای تنش میان‌رویه با دما متفاوت است. در فشارهای کم و پیش از برخورد خطوط دما ثابت با هم، با افزایش دما تنش میان‌رویه کاهش می‌یابد و در فشارهای بالاتر این روند برعکس می‌باشد.

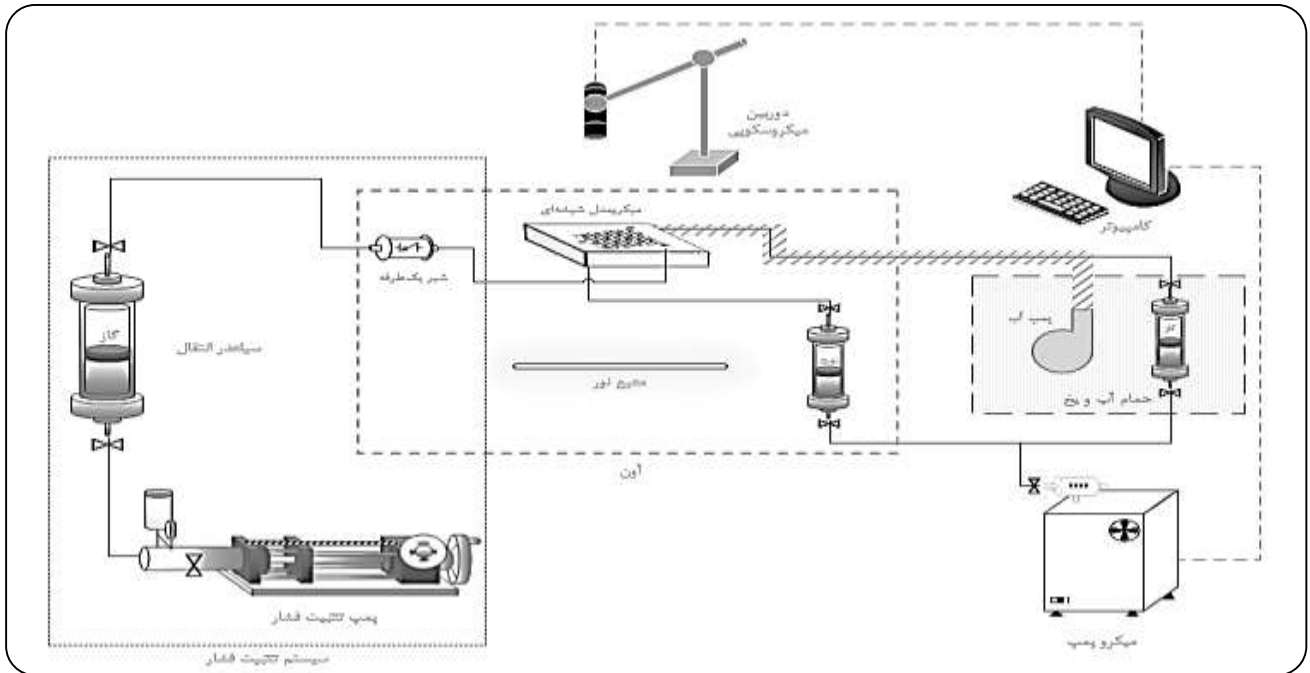
اختلاف دما در سطح تماس سیالات (K)،  $\mu$  گرانیوی (Pa.s) و ضریب نفوذ گرمایی ( $m^2/s$ ) می‌باشد. از آنجا که محاسبه طول مشخصه برای آزمایش‌ها به آسانی میسر نیست، پیشنهاد شده است که برای جلوگیری از وارد شدن عدم قطعیت به نتیجه‌های آزمایش‌ها، از عدد مارانگونی در واحد طول مشخصه (Ma/L) به جای عدد مارانگونی استفاده شود [۱۳، ۲].

همه کارهای یاد شده در زمینه مهندسی نفت و مهندسی مخازن در زمینه مارانگونی غلظتی انجام شده‌اند و تاکنون مطالعه‌ای در رابطه با تأثیرات مارانگویی گرمایی بر بازیافت نفت انجام نشده است. در این مطالعه، پدیده مارانگونی ناشی از اختلاف دما (بنارد - مارانگونی) به عنوان یک مکانیسم تولیدی و روش ازدیاد برداشت نفت، بررسی شده است. به منظور بررسی عمیق تأثیر این پدیده همرفتی بر تخلیه نفت پسمانده و دیدن وقایع در مقیاس روزنه‌ها، از میکرومدل شیشه‌ای استفاده شد. برای مدل کردن ناهمگنی‌های موجود در مخازن شکاف‌دار، سامانه ماتریس - شکاف طراحی شده است و به منظور کمینه کردن اثرهای نیروهای ثقلی، میکرومدل‌ها در حالت افقی قرار گرفته‌اند. آزمایش‌های تزریق گاز در دو حالت انجام شده است: (۱) تزریق گاز هم‌دما با نفت (حالت صفر مارانگونی) (۲) تزریق گاز سرد. با توجه به اینکه جریان همرفتی مارانگونی در اثر گرادیان تنش میان‌رویه در سطح تماس دو سیال ایجاد می‌شود، پس برای مطالعه این پدیده همواره نیاز به وجود سطح تماس بین دو سیال می‌باشد. بنابراین از نظر رژیم تزریق تمامی آزمایش‌ها در شرایط غیرامتزاجی انجام شده‌اند. پس از آنالیز تصویرهای ضبط شده از آزمایش‌ها، تأثیر وجود و شدت جریان مارانگونی گرمایی بررسی و با دیگر مکانیسم‌های فعال مقایسه شده است. برای تأیید نقش جریان همرفتی مارانگونی در بازیافت نفت به‌جامانده از محاسبه عدد مارانگونی گرمایی استفاده شده است.

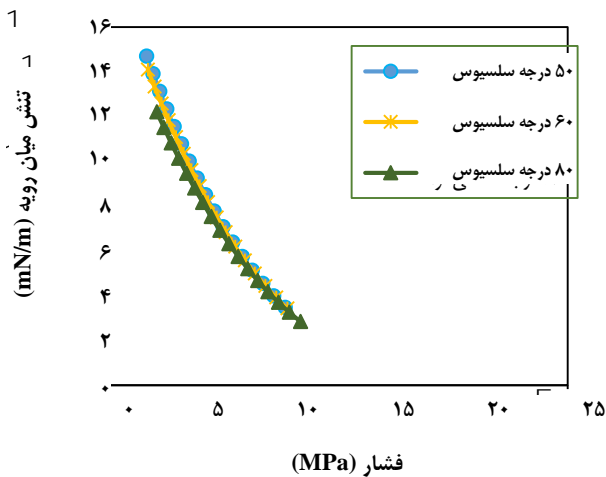
## بخش تجربی

در این پژوهش از سیال دکان و گاز دی‌اکسید کربن و متان با خلوص ۹۹/۹٪ استفاده شده است. برای حذف پیچیدگی‌های تأثیر گذار در نتیجه‌ها، از سیال دکان برای اشباع ماتریس استفاده شده است. گاز کربن دی‌اکسید و متان در آزمایش‌های مجزا به شکاف تزریق می‌شوند. رنگ دکان را با استفاده از ۰/۶ درصد جرمی ماده‌ی رنگی قابل حل در مواد نفتی، سودان رد<sup>۱</sup>، به قرمز تغییر

(۱) Sudan Red

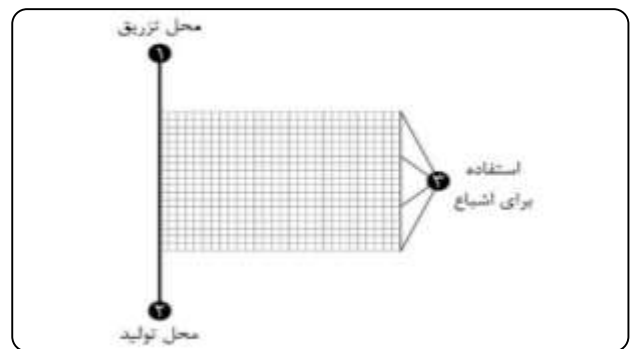


شکل ۱- شمای تجهیزهای آزمایشگاهی.

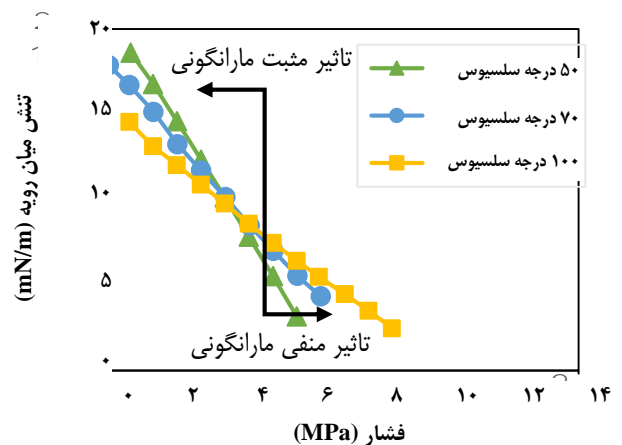


شکل ۴- تغییر تنش میان‌رویه نسبت به فشار در دماهای گوناگون برای سامانه متان/دکان [۱۶].

بنابراین در آزمایش‌های سامانه کربن دی‌اکسید / دکان بر اساس جهت جریان مارانگونی، سه ناحیه وجود خواهند داشت. در ناحیه "تأثیر مثبت مارانگونی" تزریق گاز سرد به شکاف باعث سرد شدن ناحیه نزدیک شکاف شده و تنش میان‌رویه در نزدیک شکاف افزایش می‌یابد. بنابراین جریان همرفتی مارانگونی به سمت شکاف ایجاد شده و می‌تواند به تولید کمک کند. ولی در ناحیه‌ی "تأثیر منفی مارانگونی"



شکل ۲- الگوی استفاده شده در آزمایش‌ها



شکل ۳- تغییر تنش میان‌رویه نسبت به فشار در دماهای گوناگون برای سامانه کربن دی‌اکسید/دکان [۱۵].

که در این معادله  $N_{Ca}$  عدد بی بعد موئینگی،  $\sigma_{gas-oil}$  تنش میان رویه نفت و گاز،  $v_{gas}$  سرعت گاز درون شکاف و  $\mu_{gas}$  گرانیوی گاز می باشد. به طور معمول مقدار این عدد در مخازن نفتی کمتر از  $10^{-6}$  است. با توجه به عددهای گزارش شده در جدول ۱ نتیجه های آزمایش های انجام شده نشان دهنده آنچه در مخزن اتفاق می افتد هستند.

### نتیجه ها و بحث

آزمایش های انجام شده در این مطالعه در جدول ۱ معرفی شده است. همچنین چگونگی رسیدن به این میزان بازیافت برای آزمایش هایی که تولید داشته اند (آزمایش های شماره ۱، ۳، ۷ و ۹)، بر حسب زمان در شکل ۵ گزارش شده است. شکل ۶ شامل تصویرهای حالت پایانی آزمایش های ۱، ۲، ۳ و ۹ است.

### بحث و بررسی

همه آزمایش های این پژوهش در شرایط غیر امتزاجی انجام شده اند و میکرومدل در حالت افقی قرار داشته است. بنابراین احتمال وقوع مکانیسم های غلبه نیروی گرانیو بر نیروی موئینگی، تبخیر سطحی، نفوذ مولکولی گاز به درون نفت (تورم نفت و کاهش گرانیوی و چگالی)، انحلال گاز در نفت (تورم نفت و کاهش گرانیوی و چگالی) و مارانگونی در تولید نفت می تواند وجود داشته باشد. در ادامه به بررسی هر یک از مکانیسم های یاد شده و امکان فعال یا غالب بودن آن ها پرداخته شده است.

### غلبه نیروی گرانیو بر نیروی موئینگی

برای این که گاز تزریق شده به شکاف بتواند وارد روزنه ها شود، باید اختلاف فشار ناشی از حرکت (نیروی گرانیو) بر نیروی ناشی از تنش میان رویه (نیروی موئینه) غلبه کرده و باعث به وجود آمدن جریان متقاطع نفت از ماتریس به شکاف شود [۱۷]. بنابراین با توجه به مقدارهای بسیار زیاد نسبت نیروی موئینه به گرانیو ( $N_{cv}$ ) که در جدول ۱ گزارش شده است، غلبه نیروی گرانیو بر موئینه نمی تواند عامل تولید باشد. از سویی به طور معمول هدف از روش های معمول افزایش برداشت از میان برداشتن تنش میان رویه و غلبه بر نیروهای موئینه و در نتیجه کاهش نسبت نیروی موئینه به گرانیو است، تا سیال تزریقی به روزنه هایی که نفت در آن ها به دام افتاده وارد شده و آن ها را جاروب کند [۱۸]. اما در آزمایش های این پژوهش، با وجود این که در حالت های نبود مارانگونی نسبت نیروی موئینه به گرانیو کم تر است، سامانه ها تولیدی نداشته اند که نشان از بی اثر بودن مکانیسم نیروی گرانیو می باشد.

این روند برعکس می باشد و جریان مارانگونی در خلاف جهت شکاف خواهد بود و در مقابل تولید مقاومت می کند. در محل برخورد نمودارهای هم دما، گرادیان تنش میان رویه وجود ندارد. بنابراین این ناحیه، ناحیه " نبود مارانگونی " است. همان گونه که از شکل ۴ مشخص است، برای سامانه متان/دکان، عوض شدن روند تغییرهای تنش میان رویه با دما دیده نشده است [۱۶]. بنابراین در آزمایش های این سامانه ناحیه تأثیر منفی مارانگونی وجود ندارد.

از آنجا که در همه آزمایش ها از وجود نیروی گرانش صرف نظر شده است، نیروی موئینه و نیروی گرانیو، دو نیروی فعال دیگر در آزمایش ها هستند. برای توصیف ارتباط بین این نیروها و تأثیر آن ها بر حرکت و تولید نفت از عدد بدون بعد موئینه به گرانیو ( $N_{cv}$ ) استفاده می شود. برای ورود گاز به درون روزنه ها، نیروی گرانیو باید بر نیروی موئینه غلبه کند.

$$N_{CV} = \frac{\Delta P_{capillary}}{\Delta P_{viscose}} = \frac{2\sigma_{gas-oil}}{\frac{r_{throat}}{q_{gas}\mu_{gas}L_{frac}} \frac{K_{frac}A_{frac}}{K_{frac}A_{frac}}} \quad (2)$$

که در این معادله  $N_{cv}$  عدد بی بعد موئینه به گرانیو،  $\sigma_{gas-oil}$  تنش میان رویه نفت و گاز،  $r_{throat}$  شعاع گلوگاه،  $L_{frac}$  طول شکاف،  $K_{frac}$  تراوایی شکاف،  $q_{gas}$  شدت جریان تزریق گاز،  $\mu_{gas}$  گرانیوی گاز و  $A_{frac}$  سطح مقطع جریان در شکاف می باشد.

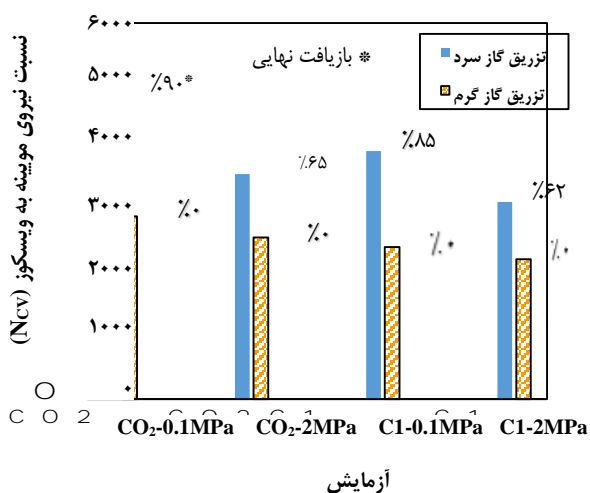
آزمایش های سامانه دکان / کربن دی اکسید در ۳ بازه ی فشاری طراحی شده اند. ۲ بازه در ناحیه اثر مثبت مارانگونی (مارانگونی قوی و مارانگونی ضعیف) و یکی در ناحیه نبود مارانگونی است. آزمایش های سامانه دکان/متان نیز در ۲ ناحیه اثر مثبت مارانگونی قرار دارند. برای هر فشار، یک آزمایش نبود مارانگونی و یک آزمایش وجود مارانگونی در نظر گرفته شده است. در آزمایش نبود مارانگونی گاز ۸۰ درجه و در آزمایش وجود مارانگونی گاز صفر درجه با نرخ تزریق ۰/۰۰۱ میلی لیتر در دقیقه به سامانه ماتریس - شکاف در ۸۰ درجه تزریق می شود. خلاصه آزمایش های طراحی شده در جدول ۱ آمده است.

برای این که آزمایش ها به شرایط مخزن نزدیک باشند، باید عدد موئینگی (معادله (۳)) در شرایط آزمایش، با آنچه که به طور معمول در مخازن اتفاق می افتد برابر باشد.

$$N_{ca} = \frac{v_{gas}\mu_{gas}}{\sigma_{gas-oil}} \quad (3)$$

جدول ۱ - خلاصه آزمایش‌ها.

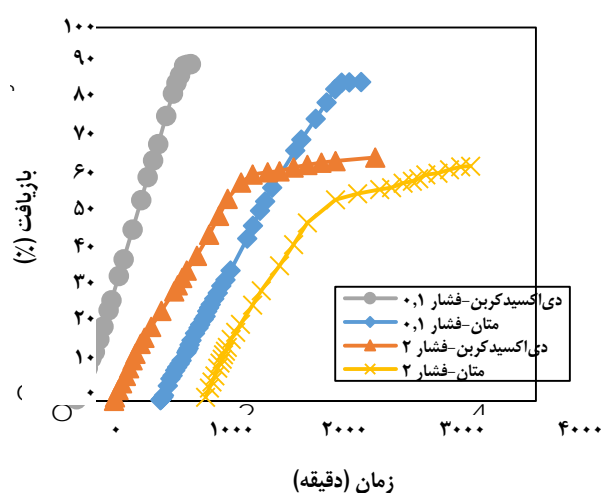
زمان (min)	بازیافت نهایی (%)	$N_{ca}$	$N_{cv}$	گرانروی گاز (Pa/S)	تنش میان‌رویه (mN/m)	فشار (MPa)	دمای نفت ( $^{\circ}C$ )	دمای گاز ( $^{\circ}C$ )	شماره آزمایش	گاز تزریقی
۱۰۲۰	۹۰/۰	۹/۴۷E-۰۸	۴۸۲۶/۴	۱/۳۷E-۰۵	۲۲/۰۰	۰/۱	۸۰	۰/۰	۱	CO <sub>2</sub>
۱۴۴۰	۰/۰۰	۱/۵۷E-۰۷	۲۹۱۳/۸	۱/۷۵E-۰۵	۱۷/۰۰	۰/۱	۸۰	۸۰	۲	
۲۶۴۰	۶۵/۰	۱/۲۷E-۰۷	۳۵۷۸/۹	۱/۵۲E-۰۵	۱۸/۱۴	۲/۰۰	۸۰	۰/۰	۳	
۱۴۴۰	۰/۰۰	۱/۷۷E-۰۷	۲۵۷۶/۵	۱/۷۷E-۰۵	۱۵/۲۰	۲/۰۰	۸۰	۸۰	۴	
۱۴۴۰	۰/۰۰	۳/۵۰E-۰۷	۱۳۵۷/۷	۱/۶۳E-۰۵	۱۱/۳۰	۴/۵۰	۸۰	۰/۰	۵	
۱۴۴۰	۰/۰۰	۳/۸۷E-۰۷	۱۲۲۷/۹	۱/۸۳E-۰۵	۱۱/۵۰	۴/۵۰	۸۰	۸۰	۶	
۲۵۲۰	۸۵/۰	۱/۲۰E-۰۷	۳۹۵۷/۹	۱/۰۴E-۰۵	۲۱/۰۰	۰/۱	۸۰	۰/۰	۷	CH <sub>4</sub>
۲۱۶۰	۰/۰۰	۱/۹۶E-۰۷	۲۴۳۲/۲	۱/۲۹E-۰۵	۱۶/۰۰	۰/۱	۸۰	۸۰	۸	
۳۴۲۰	۶۲/۰	۱/۵۱E-۰۷	۳۱۴۲/۹	۱/۰۷E-۰۵	۱۷/۲۰	۲/۰۰	۸۰	۰/۰	۹	
۲۱۶۰	۰/۰۰	۲/۱۳E-۰۷	۲۲۳۲/۱	۱/۳۱E-۰۵	۱۵/۰۰	۲/۰۰	۸۰	۸۰	۱۰	

شکل ۷ - کاهش  $N_{cv}$  در آزمایش‌های بدون بازیافت.

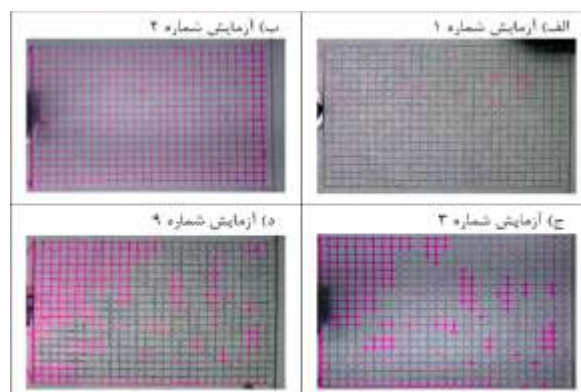
همچنین بازیافت نهایی نفت در حالت‌هایی که جریان مارانگونی در آن‌ها فعال است، از ۶۲ تا ۹۰ درصد بوده است (شکل ۷). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که غلبه نیروی گرانروی به نیروی موئینه، مکانیسم غالب برای تولید نفت نبوده است.

#### تبخیر سطحی و نفوذ مولکولی گاز به درون نفت

تبخیر سطحی فرآیندی است که در سطح فاز مایع رخ می‌دهد و طی آن مولکول‌های سطح مایع به فاز گاز می‌روند. یکی از شرط‌های رخداد این فرآیند اشباع نبودن فاز گاز از مولکول‌های فاز



شکل ۵ - میزان بازیافت نفت با زمان در آزمایش‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۹.



شکل ۶ - حالت نهایی آزمایش‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۹.

نسبت به دما در فشار ثابت آزمایش به دست آمده است. ضریب نفوذ گرمایی از تقسیم داده‌های آزمایشگاهی [۲۴] ضریب هدایت پذیری گرمایی بر ظرفیت گرمایی ویژه سیال‌ها به دست می‌آید. با توجه به این که گرادیان دما در لایه نازکی از مایع ایجاد می‌شود، می‌بایست از مقادیر ضریب هدایت پذیری نفت استفاده شود. مقادیر محاسبه شده در جدول ۲ آورده شده است.

همان‌گونه که از جدول ۲ مشخص است، در آزمایش‌هایی که تولید داشته‌اند (آزمایش‌های ۱، ۳، ۷ و ۹)، میزان تغییرهای بازیافت پایانی متناسب با عدد مارانگونی بوده و عامل بازیافت دکان از ماتریس، جریان همرفتی مارانگونی است. بدین ترتیب که شوک گرمایی وارد شده به سامانه به خاطر تزریق گاز سرد، باعث به وجود آمدن گرادیان تنش میان‌رویه و در نتیجه ایجاد جریان همرفتی مارانگونی به سمت شکاف و ورود گاز به روزنه می‌شود. ولی در آزمایش‌هایی که گاز به صورت هم‌دما به شکاف تزریق می‌شود، گرادیان تنش میان‌رویه وجود ندارد؛ بنابراین جریان همرفتی مارانگونی ایجاد نمی‌شود و عدد مارانگونی نیز صفر است و از آنجا که اثرهای مکانیسم‌های تولیدی دیگر بسیار کم می‌باشد، هیچ‌گونه تولیدی از ماتریس انجام نمی‌گردد. بنابراین جریان مارانگونی مکانیسم غالب تولیدی در آزمایش‌های این مطالعه است.

با مقایسه آزمایش‌های شماره ۱ با ۷ و ۳ با ۹، می‌توان نتیجه گرفت که در سامانه‌های کربن‌دی‌اکسید/دکان به خاطر داشتن اختلاف تنش میان‌رویه بیش‌تر نسبت به سامانه متان/دکان، عدد مارانگونی بیش‌تر و در نتیجه جریان مارانگونی قوی‌تر است. بنابراین تزریق کربن‌دی‌اکسید تأثیر بیش‌تر و بهتری بر زمان و میزان بازیافت دکان از ماتریس می‌گذارد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از آزمایش‌های میکرومدل، برای نخستین بار تأثیر پدیده مارانگونی ناشی از دما (بنارد - مارانگونی) بررسی شد. برای رسیدن به این مهم ۱۰ آزمایش میکرومدل انجام شده است. بدین صورت که گاز کربن‌دی‌اکسید و متان به طور جداگانه به شکافی که در مجاورت ماتریس اشباع از دکان قرار داشت، تزریق شدند. تزریق گاز هم به صورت هم‌دما (حالت صفر مارانگونی) و هم به صورت تزریق گاز سرد (حالت مارانگونی) انجام و عدد مارانگونی برای هر سامانه محاسبه شد.

مایع است. مقدار ضریب تبخیر سطحی دکان با دما رابطه مستقیم داشته و با افزایش دما، افزایش می‌یابد [۱۹]. نفوذ مولکولی نیز از جمله مکانیسم‌های فعال و مؤثر در مخزن‌های شکاف دار است. این مکانیسم باعث حل شدن گاز در نفت، به ویژه نفت‌های سنگین شده و با کاهش گرانروی و تورم نفت باعث تولید آن می‌شود. ضریب نفوذ مولکولی گاز کربن‌دی‌اکسید و متان در سیال‌های نفتی، با دما و فشار رابطه مستقیم دارند [۲۱، ۲۰]. ولی مقایسه نتیجه‌های آزمایش‌ها نشان دهنده افزایش چشم‌گیر میزان بازیافت دکان با افزایش دمای گاز تزریقی است (آزمایش‌های شماره ۱-۲، ۳-۴، ۷-۸ و ۹-۱۰)؛ که این روند مخالف روند حاکم بر تغییر ضریب تبخیر سطحی دکان و ضریب نفوذ مولکولی گازها است. بنابراین، نقش بازدارنده مکانیسم تبخیر سطحی و نفوذ مولکولی در تخلیه نفت در دماهای کم‌تر، بیانگر وجود مکانیسم دیگری است که باید تأثیر منفی مکانیسم تبخیر سطحی را نیز جبران کند.

### انحلال گاز در نفت

گاز حل شده در نفت باعث کاهش گرانروی و چگالی نفت و افزایش حجم آن (تورم نفت) می‌شود. در نتیجه با افزایش حرکت پذیری نفت، به تولید آن کمک می‌کند. میزان انحلال پذیری کربن‌دی‌اکسید در دکان با کاهش دما، افزایش می‌یابد [۲۲]. بنابراین تأثیر تغییرهای این پدیده با دما، بر بازیافت نفت، موازی با اثرهای جریان مارانگونی است. در نتیجه، نمی‌توان تأثیر جریان مارانگونی بر میزان بازیافت نفت با کاهش دما را، در حضور این مکانیسم پژوهش کرد. ولی با مطالعه انحلال پذیری گاز با تغییر فشار، می‌توان وجود جریان مارانگونی را بررسی نمود؛ زیرا با توجه به نتیجه‌های آزمایشگاهی انحلال پذیری کربن‌دی‌اکسید و متان در نفت خام [۲۳]، با افزایش فشار، میزان انحلال پذیری این گازها به شدت افزایش می‌یابد. ولی در آزمایش‌های انجام شده، در دما و شرایط ثابت با افزایش فشار میزان بازیافت نفت کاهش یافته و حتی با رسیدن به بازه‌ی فشاری تقاطع نمودارهای هم‌دمای تنش میان‌رویه، میزان بازیافت دکان به صفر رسیده است. بنابراین انحلال گاز در نفت، نمی‌تواند مکانیسم غالب در آزمایش‌های این تحقیق باشد.

### مارانگونی

شدت جریان مارانگونی با عدد بدون بعد مارانگونی (معادله ۱) مشخص می‌شود.  $\frac{\partial IFT}{\partial T}$  با شیب خط گذرنده از داده‌های تنش میان‌رویه

(۱) Mobility

جدول ۲- مقادیر عدد مارانگونی در واحد طول مشخصه

شماره آزمایش	گاز تزریقی	دمای گاز (°C)	دمای نفت (°C)	فشار (MPa)	مدت زمان آزمایش (min)	بازیافت نهایی (%)	عدد مارانگونی در واحد طول (1/m)
۱	CO <sub>2</sub>	۰	۸۰	۰/۱	۱۰۲۰	۹۰	۲/۸۹E+۰۸
۲		۸۰	۸۰	۰/۱	۱۴۴۰	۰	۰
۳		۰	۸۰	۲/۰	۲۶۴۰	۶۵	۱/۶۴E+۰۸
۴		۸۰	۸۰	۲/۰	۱۴۴۰	۰	۰
۷	CH <sub>4</sub>	۰	۸۰	۰/۱	۲۵۲۰	۸۵	۲/۳۱E+۰۸
۸		۸۰	۸۰	۰/۱	۲۱۶۰	۰	۰
۹		۰	۸۰	۲/۰	۳۴۲۰	۶۲	۱/۲۲E+۰۸
۱۰		۸۰	۸۰	۲/۰	۲۱۶۰	۰	۰

(۱) مقایسه عدد مارانگونی با مقادیرهای بازیافت نهایی دکان، نشان دهنده این است که وجود جریان مارانگونی ناشی از تغییرهای دما، عامل تخلیه نفت در این آزمایش‌ها می‌باشد. (۲) در سامانه کربن‌دی‌اکسید/دکان به خاطر داشتن اختلاف تنش میان رویه بیش‌تر نسبت به سامانه متان/دکان، عدد مارانگونی بیش‌تر و در نتیجه جریان مارانگونی قوی‌تر است. بنابراین تزریق کربن‌دی‌اکسید تأثیر بیش‌تر و بهتری بر زمان و میزان بازیافت دکان از ماتریس می‌گذارد.

در پایان از مقایسه نتیجه‌های آزمایشگاهی با یک‌دیگر و تحلیل آن‌ها بر اساس حذف مکانیزم‌های بی‌اثر نتیجه‌های زیر به دست آمده است:

(۱) در این آزمایش‌ها دیده شد که با بهره‌گیری از جریان مارانگونی دمایی می‌توان در نسبت‌های بالاتر نیروی موئینه به گرانو، بازیافت بیش‌تری داشت.

(۲) روند تغییرهای بازیافت دکان در آزمایش‌ها با روند تغییرهای ضریب نفوذ مولکولی، ضریب تبخیر سطحی و انحلال پذیری گاز در نفت نسبت عکس داشته و این امر بیانگر وجود مکانیسمی قدرتمند است که نقش منفی مکانیسم‌های یاد شده را نیز جبران می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۶

## مراجع

- [1] Van Golf-Racht T. D., "Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering", Elsevier, 1982.
- [2] M. Khosravi, A. Bahramian, M. Emadi, B. Rostami, and E. Roayaie, Effect of Marangoni Flow on Recovery of Bypassed Oil During CO<sub>2</sub> Injection, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **114**: 91-98 (2014).
- [3] D'Aubeterre A., Da Silva R., Aguilera M., Experimental Study on Marangoni Effect Induced by Heat and Mass Transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **32**: 677-684 (2005).
- [4] Bernard H., Les Tourbillons Cellulaires Dans Une Nappe Liquide [The Cellular Vortices in a Liquid Layer], *Rev Gén Sci Pure Appl*, **11**: 1261-1271 (1900).
- [5] Rayleigh L., LIX. on Convection Currents in a Horizontal Layer of Fluid, When the Higher Temperature is on the Under Side, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **32**: 529-546 (1916).



- [6] Block M.J., [Surface Tension as the Cause of Bénard Cells and Surface Deformation in a Liquid Film](#), *Nature*, **178**: 650-651 (1956).
- [7] Pearson J., [On Convection Cells Induced by Surface Tension](#), *J. Fluid Mech*, **4**: 489-500 (1958).
- [8] Groothuis H., Zuiderweg F., [Influence of Mass Transfer on Coalescence of Drops](#), *Chemical Engineering Science*, **12**: 288-289 (1960).
- [9] Lam A.C., Schechter R.S., Wade W.H., [Mobilization of Residual Oil Under Equilibrium and Nonequilibrium Conditions](#), *Society of Petroleum Engineers Journal*, **23**: 781-790 (1983).
- [10] Pratt H., [Marangoni Flooding with Water Drives: a Novel Method for EOR?](#), in *SPE Asia-Pacific Conference*, 1991.
- [11] Lu H.-H., Yang Y.-M., Maa J.-R., [Effect of Artificially Provoked Marangoni Convection at a Gas/Liquid Interface on Absorption](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **35**: 1921-1928 (1996).
- [12] Lyford P.A., Pratt H., Shallcross D.C., Grieser F., [The Marangoni Effect and Enhanced Oil Recovery Part 1. Porous Media Studies](#), *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **76**: 167-174 (1998).
- [13] Khosravi M., Rostami B., Emadi M., Roayaei E., [Marangoni Flow: An Unknown Mechanism for Oil Recovery During Near-Miscible CO<sub>2</sub> Injection](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **125**: 263-268 (2015).
- [14] Kuneš J., "Dimensionless Physical Quantities in Science and Engineering", Elsevier, (2012).
- [15] Georgiadis A., Llovel F., Bismarck A., Blas F.J., Galindo A., Maitland G.C., Trusler J.P.M., Jackson G., [Interfacial Tension Measurements and Modelling of \(carbon dioxide+n-alkane \(and \(carbon dioxide+ water\) Binary Mixtures at Elevated Pressures and Temperatures](#), *The Journal of Supercritical Fluids*, **55**: 743-754 (2010).
- [16] Amin R., Smith T.N., [Interfacial Tension and Spreading Coefficient under Reservoir Conditions](#), *Fluid Phase Equilibria*, **142**: 231-241 (1998).
- [17] Conn C. A., Ma K., Hirasaki G.J., Biswal S.L., [Visualizing Oil Displacement with Foam in a Microfluidic Device with Permeability Contrast](#), *Lab on a Chip*, **14**: 3968-3977 (2014).
- [18] Thomas S., [Enhanced Oil Recovery-an Overview](#), *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP*, **63**: 9-19 (2008).
- [19] Verschuere K., "Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals", John Wiley & Sons, Inc., (2001).
- [20] Upreti S.R., Mehrotra A.K., [Diffusivity Of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> and N<sub>2</sub> in Athabasca Bitumen](#), *Journal of Chemical Engineering*, **80**: 116-125 (2002).
- [21] Civan F., Rasmussen M.L., [Determination of Gas Diffusion and Interface-mass Transfer Coefficients for Quiescent Reservoir Liquids](#), *SPE Journal*, **11**: 71-79 (2006).
- [22] Fogg P.G., "Carbon Dioxide in Non-Aqueous Solvents at Pressures Less Than 200 Kpa", vol. 50, Elsevier, (2013).
- [23] Nguele R., Sasaki K., Ghulami M.R., Sugai Y., Nakano M., [Pseudo-Phase Equilibrium of Light and Heavy Crude Oils for Enhanced Oil Recovery](#), *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **6**: 419-432 (2016).
- [24] Naziev Y.M., Aliev M., [Thermal Conductivity and Specific Heat of N-Decane at Various Temperatures and Pressures](#), *Journal of Engineering Physics*, **24**: 717-720 (1973).