

# اثر فشار و مقدار گاز CO<sub>2</sub> تزریقی روی میزان بازیافت نفت در فرایند تزریق گاز

سعید عباسی\*<sup>+</sup>، مهدی جاهدی

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، واحد ازدیاد برداشت از مخازن هیدروکربوری، صندوق پستی ۴۱۶۳-۱۸۷۴۵

**چکیده:** تزریق گاز، روشی است که به طور عمده ضریب بازیافت از میدان‌های نفتی را افزایش می‌دهد. به طوری که می‌توان گفت از لحاظ اقتصادی در برخی از حالت‌ها خیلی مناسب است، به ویژه هنگامی که دسترسی به ذخایر گازی آسان باشد. در این پژوهش، نتیجه‌های عملکرد تزریق گاز به نمونه‌های مغزه یکی از مخازن نفتی ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه ۳ سری آزمایش انجام شد که هر کدام از آنها طی فشارها و ترکیب‌های متفاوتی صورت گرفتند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده مشخص شد که فشار تزریق نقش به نسبت زیادی در میزان بازدهی دارد. البته ذکر این نکته نیز لازم است که اضافه کردن یک عامل امتزاج پذیر به ترکیب گاز تزریقی می‌تواند میزان بازیافت را افزایش دهد. اما اضافه کردن این عامل باید به مقدار مناسب انجام گیرد تا بتواند اثر خود را نشان دهد. هر چند اضافه کردن عامل امتزاج پذیر ممکن است شرایط امتزاج پذیری را ایجاد نماید، اما می‌تواند تا حدودی ضریب بازیافت را افزایش دهد. در انتها با کمک نرم افزار شبیه ساز، حداقل فشار امتزاجی آزمایش‌های انجام شده شبیه سازی شد. این شبیه سازی با ترکیب‌های متفاوت کربن دی اکسید صورت گرفت که نتیجه‌های به دست آمده از شبیه سازی‌ها نیز نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌ها را تأیید می‌کند. بدین مفهوم که هرچه میزان کربن دی اکسید اضافه شده به ترکیب گاز بیشتر شود، حداقل فشار امتزاجی کاهش پیدا می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** تزریق گاز، فشار تزریق، امتزاج پذیری، فشار امتزاجی، حداقل فشار امتزاجی.

**KEY WORDS:** Gas injection, Gas enrichment, Miscibility, Miscibility pressure, Minimum miscibility pressure (MMP).

## مقدمه

تازیب به کار رفت. طرح‌های پژوهشی تزریق گاز در شرایط اولیه به منظور افزایش فراوری آنی طراحی شده بودند و باید مانند طرح‌های پژوهشی ازدیاد برداشت در نظر گرفته شوند و مانند یک فن ازدیاد برداشت، سیال تزریق شده باید افزون بر افزایش انرژی مخزن، نفت را نیز جابه‌جا کرده و آنرا به طرف چاه‌های تولیدی حرکت دهد. تزریق گاز (به ویژه تزریق گاز امتزاجی)، روشی است

تزریق گاز، یکی از قدیمی ترین فرایندهای تزریق سیال به مخازن نفتی است. انجام این کار در سال ۱۸۶۴ و تنها چند سال پس از حفاری چاه Drake پیشنهاد شده بود. هدف از این کار حفظ فشار مخزن و برگرداندن تولید به شرایط اولیه بود. بعد از این زمان، تزریق گاز طبیعی یا گازهای دیگر با موفقیت در تعداد زیادی از مخازن در سراسر جهان و به‌عنوان یک روش بازیافت

\*عهده دار مکاتبات

+E-mail: abbasi@ripi.ir

کشش سطحی وارد شده در سیستم سیال سه تایی ( $C_5$ ،  $C_1$ ،  $N_2$ ) نسبت داده می‌شود. به خاطر این گرادیان، تعادل موئینگی در یک درجه پایین‌تر از اشباع گاز در نزدیک شکاف به دست می‌آید [۶]. آزمایش‌های *Morel* توسط *Hu Hua* شبیه‌سازی شد که این مدل ترکیبی، از یک محاسبه تحلیلی در شکاف و یک واحد عددی در داخل نمونه بود [۷]. این پژوهش‌گران اهمیت محاسبه‌های نفوذ و تفاوت‌های فشار موئینگی همراه با کشش سطحی ناشی از اثرهای ترکیبی را نشان دادند.

*Wylie* و همکارانش آزمایش‌های انتقال جرم و تزریق گاز را انجام دادند. آنها تایید کردند که هر چه میزان اشباع آب بالاتر باشد بنابراین بازیافت پایین‌تر است [۸]. اثر نفوذ گاز توسط *Romancer* و همکارانش بررسی شده است. آنها اثر متان، نیتروژن و کربن دی‌اکسید را مقایسه کردند. آزمایش‌های آنها نشان داد که گرادیان کشش سطحی در میان حجم فضای خالی و شکاف، هم می‌تواند مطلوب و هم نامطلوب باشد. تفاوت فشار موئینگی باعث ایجاد جریان از شکاف یا به سمت شکاف می‌شود که این پدیده را پمپاژ موئینگی<sup>(۳)</sup> می‌نامند.

اگر کشش سطحی از حجم فضای خالی ماتریکس به سمت شکاف افزایش پیدا کند (در مورد تزریق نیتروژن)، پمپاژ موئینگی به حفظ یک شدت تولید ثابت برای یک مدت زمان طولانی کمک می‌کند، زیرا جریان مایع به سمت شکاف زیاد شده است. برعکس اگر کشش سطحی نزدیک شکاف کاهش پیدا کند (در مورد تزریق کربن دی‌اکسید)، پمپاژ موئینگی به سمت زدودن نفت از شکاف کمک می‌کند و بازیافت متوقف می‌گردد [۹]. در نتیجه در مورد پایین بودن پتانسیل ریزش ثقی، *Sorbie* و *Darman* نتیجه گرفتند که کشش سطحی برای نگه داشتن بالاترین میزان اشباع نفت نزدیک شکاف لازم است و تزریق نیتروژن توصیه شده است [۹]. همچنین *Burger* و همکارانش نشان دادند که پمپاژ موئینگی به‌طور اساسی برای افزایش انتقال جرم شرکت نمی‌کند. افزون بر این، نتیجه گرفتند که انتقال جرم می‌تواند به‌وسیله جهت یابی سیستم شکاف نمونه، خیلی زیاد تغییر پیدا کند [۱۰].

### کار آزمایشگاهی

در این تحقیق، عملکرد تزریق گاز به منظور بالا بردن ضریب بازیافت یکی از مخازن نفتی ایران بررسی شده است.

که به طور عمده ضریب بازیافت نفت را افزایش می‌دهد. با در نظر گرفتن این‌که ایران دارنده دومین ذخایر گازی در جهان است، چنین روش‌هایی از لحاظ اقتصادی خیلی مناسب هستند. به طور کلی گاز در داخل مخزن برای دو منظور تزریق می‌شود: ۱- برای ثابت نگه داشتن فشار ۲- برای ایجاد جبهه ای از نفت و جاروب آن به سمت چاه‌های تولیدی.

گاز ممکن است به‌صورت یک فرایند امتزاجی و یا یک فرایند غیرامتزاجی نفت را جابه‌جا کند. مشخصه‌ها و ویژگی‌های نفت و گاز و شرایط دما، فشار تزریق، نوع فرایند را مشخص می‌کنند. به‌طور کلی امتزاج پذیری به فشار، دما، ترکیب نفت و سیال تزریقی (جابه‌جاکننده) بستگی دارد [۱].

*Musku* در سال ۱۹۴۶ نشان داد حفظ فشار باعث افزایش بازیابی نفت می‌شود. به ویژه این‌که ضریب تشکیل حجمی نفت بالاتر باشد [۲]. براساس آزمایش‌های انجام شده توسط *Elkins* در سال ۱۹۶۹ حجم گاز تزریق شده، گرانیوی نفت و ضریب تشکیل حجمی نفت سه فاکتور اصلی در فرایندهای بازیافت نفت هستند. تماس بیشتر گاز تزریقی با نفت مخزن موجب افزایش تغییرها در ترکیب نفت شده و منجر به تولید بیشتر نفت می‌شود. برای مخازن کربنات عظیم با تراوایی خوب، به نظر نمی‌رسد که فشار تزریق در نهایت تأثیر زیادی بر بازیافت نهایی نفت داشته باشد [۳].

فرایندهای امتزاج پذیر هیدروکربنی به طور وسیع و در طی سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ در آمریکا و کانادا انجام شد. بیش از ۱۵۰ پروژه در این تناوب زمانی آغاز شد و بیشتر این پروژه‌ها به صورت آزمایش‌های پایلوت و در مقیاس کوچک انجام شدند که تنها در یک یا چند چاه تزریقی وارد می‌شدند. با وجود این، تعدادی از طرح‌ها در مقیاس‌های وسیع انجام پذیرفتند [۴].

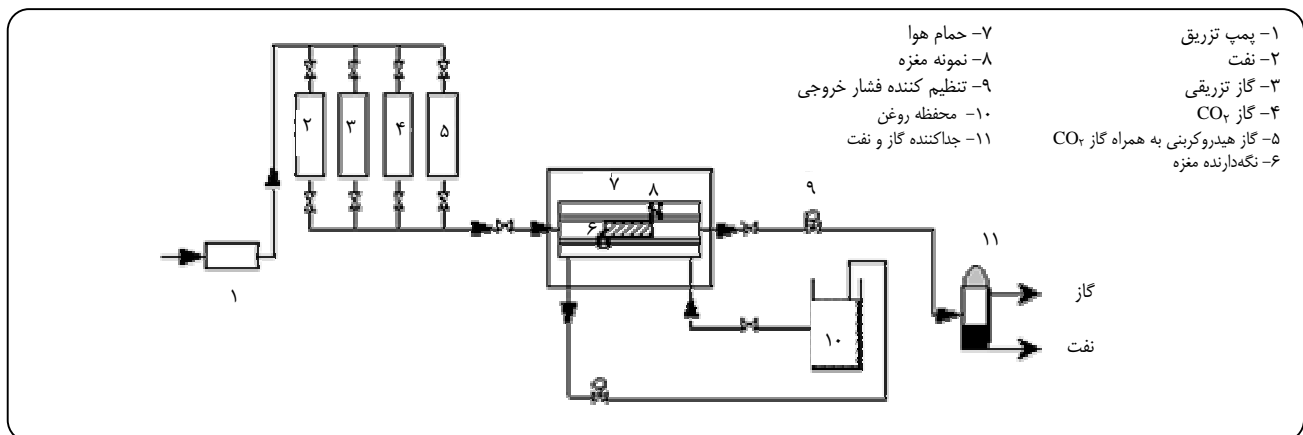
در سال ۱۹۶۰ نشان داده شد که بازیافت نفت بیشتر از روش‌های پیش بینی شده به وسیله‌ی پیشروی جبهه<sup>(۱)</sup> است، چرا که این روش‌ها تعادل تبخیری درمیان فاز نفتی مخزن و گاز تزریق شده را در نظر نمی‌گیرند. توصیف ریاضی جریان گاز در محیط متخلخل - شکاف‌دار بر مبنای مجسم ساختن انتقال جرم در سیستم تخلخل دوگانه است [۵].

*Morel* و همکاران، آزمایش‌های نفوذ<sup>(۲)</sup> را همراه با مخلوط‌های ترکیبی انجام دادند. آنها نشان دادند که تزریق نیتروژن به سمت تجمع مایع در نزدیک شکاف هدایت می‌شود. این اثر به گرادیان

(۱) Conventional frontal drive

(۳) Capillary pumping

(۲) Diffusion



شکل ۱- شمای ساده ای از سیستم تزریق در آزمایش‌های انجام گرفته.

۴۸ ساعت عمل شستشو با تولوئن روی نمونه مورد نظر انجام شد. پس از اطمینان از تمیز بودن نمونه، آن را در داخل کوره قرارداده تا به طور کامل خشک شود. پس از خشک شدن نمونه، وزن خشک آن یادداشت می شود. سپس نمونه برای اشباع شدن با آب مخزن در داخل دستگاه قرار گرفته و پس از این که به مدت ۳ ساعت تحت خلأ قرار گرفت، اشباع نمونه با فشاری معادل ۱۲۰۰۰ psi انجام شد. پس از اشباع، نمونه را وزن کرده و سپس تا شروع آزمایش، در داخل آب مخزن قرار داده می شود. با استفاده از ویژگی‌های نمونه و وزن‌های اندازه گیری شده، میزان حجم<sup>(۴)</sup> به دست آورده می‌شود:

$$\text{میزان حجم} = \left( \frac{\text{وزن خشک شده سنگ}}{\text{دانسیتته آب}} \right) - \left( \frac{\text{وزن اشباع شده سنگ}}{\text{دانسیتته آب}} \right)$$

سپس نمونه در داخل نگه‌دارنده مغزه قرار گرفته و فشار پوشان سنگ لازم بر آن اعمال شده و تزریق آب به نمونه آغاز می‌شود. پس از اطمینان از پایدار شدن جریان خروجی و همچنین گذشتن تزریق یک برابر حجم فضای خالی از آن، تزریق آب قطع می شود. سپس تزریق نفت آغاز می‌شود. در این مورد نیز آن قدر زمان داده می‌شود تا این که به اندازه یک PV نفت از نمونه خارج شود و دیگر آبی خارج نشود. میزان آبی که خارج شده است، نشان دهنده میزان نفت جایگزین شده در داخل نمونه می‌باشد (V<sub>o</sub>) بنابراین، حجم نفتی که در داخل نمونه است نیز مشخص می‌شود. به منظور مشخص کردن میزان بازیافت، تزریق گاز به نمونه آغاز می‌شود.

در آزمایش‌های انجام گرفته میزان بازیافت نفت در اثر تزریق گاز به نمونه‌های نفتی مورد نظر که تهیه شده اند اندازه گیری شده و با تغییر پارامترهای موثر، میزان بازیافت تخمین زده شده‌اند. همچنین شرایط امتزاج پذیری فرایند نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها، دستگاه تزریق به گونه ای طراحی شده که محدوده گسترده ای از تزریق را تحت سناریوهای متفاوت از جمله دما، فشار و ترتیب فاز تزریقی در برمی‌گیرد. این دستگاه دارای ویژگی‌هایی است که می‌تواند تحت شرایط مخزن از نظر حرارت و فشار عمل تزریق سیال را انجام دهد. با توجه به طراحی‌های دستگاه می‌توان در آزمایشگاه، به روش‌ها و مدل‌های متفاوت، تزریق روی مدل‌های فیزیکی (سنگ آهکی - ماسه سنگ) مختلف را انجام داد. دستگاه از دو بخش عمده تشکیل شده است:

#### ۱- بخش مدول هیدرولیکی

نگه‌دارنده مغزه، حمام هوا<sup>(۱)</sup> و سیستم اتصالات، سیستم تزریق (پمپ و مخازن سیالات تزریقی)، مجموعه ایجاد فشار پوشان سنگ<sup>(۲)</sup>، سیستم کنترل فشار خروجی<sup>(۳)</sup> (پمپ و بافرها) و فشار سنج‌هاست.

#### ۲- بخش الکتریکی

مجموعه‌ای از کنترل کننده‌ها، امکانات ثبت فشار و دمای نقاط متفاوت است. شمای ساده ای از نصب این تجهیزات در شکل ۱ آورده شده که موقعیت هر یک از تجهیزات نشان داده شده است.

### نحوه آماده سازی مدل و شرح کلی آزمایش‌ها

برای همه آزمایش‌ها، ابتدا برای اطمینان از تمیز بودن،

(۱) Air bath

(۲) Over burden pressure

(۳) Back pressure regulator

(۴) Pore volume

$$t_D = \frac{t}{t_{ch}}$$

که  $t_D$  زمان بدون بعد و  $t$  زمان‌های محاسبه شده برحسب ثانیه در آزمایش‌ها می‌باشند.

### تجزیه و تحلیل نتیجه‌های آزمایش‌ها

#### مرحله اول (تزریق گاز طبیعی در فشار ۳۰۰۰ psi)

در این مرحله گاز به‌طور خالص و با فشار ۳۰۰۰ psi و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به نمونه تزریق شد. همان‌طور که از نمودار بازیافت بر حسب حجم گاز تزریق شده در شکل ۲ مشخص است، میزان بازیافت در حدود ۷۰ درصد است که نشان می‌دهد جابه‌جایی به نسبت خوبی در نمونه صورت گرفته است. همچنین این میزان بازیافت در مقایسه با تزریق آب خیلی قابل توجه می‌باشد. بنابراین، در صورت در دسترس بودن منابع عظیم گازی، روش تزریق گاز در مقایسه با تزریق آب هم اقتصادی‌تر و هم مقرون به صرفه‌تر است. با توجه به نمودارهای تولید گاز و تولید نفت بر حسب  $t_D$  در شکل ۳ متوجه می‌شویم که در  $t_D = ۳۸۰$ ، تولید گاز به شدت افزایش یافته است که در این زمان تولید نفت نیز به حالت ثابت درآمده است. البته نقطه شروع تولید<sup>(۲)</sup> گاز در زمان  $t_D = ۵۰$  به انجام رسیده و سپس به حالت ثابت درآمده و پس از آن به شدت افزایش یافته است. البته همان‌طور که ملاحظه می‌شود در زمان شروع تولید گاز، تولید نفت نیز کاهش یافته و پس از ثابت شدن تولید گاز، تولید نفت به یک‌باره افزایش یافته است. علت کاهش تولید نفت در زمان شروع تولید گاز نیز به روشنی مشخص است، زیرا گاز با ایجاد مسیری از میان نفت، خود را به انتهای نمونه رسانده و خارج می‌شود. در نتیجه گاز تزریقی از همین مسیر حرکت کرده و نمی‌تواند نفت را جابه‌جا کند. با دقت به نمودار اشباع نفت بر حسب  $t_D$  در شکل ۴ نیز مشخص است که میزان نفت از مقدار اولیه خود در داخل نمونه ( $S_{oi} = ۰.۷۴$ ) به تدریج کاهش یافته تا وقتی که تولید گاز اتفاق می‌افتد. از این زمان به بعد روند کاهش در  $S_{oi}$  به شدت نزول پیدا کرده تا این که به یک مقدار ثابت ( $S_{or}$ ) برسد. این مقدار ثابت، همان میزان اشباع نفت باقی‌مانده در داخل نمونه است که طی انجام فرایندهای بعدی ازدیاد برداشت قابل بازیافت می‌باشد. همان‌طور که از نمودار نرمال شده اشباع نفت برحسب حجم گاز تزریق شده در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد، پس از تزریق گاز، میزان اشباع نفت نرمال شده

از آنجا که میزان بازیافت نفت در اثر تزریق آب در بیشتر موارد ۳۰ تا ۴۰ درصد می‌باشد، بنابراین، از میزان نفت بیرون آمده می‌توان نتیجه گرفت که تزریق گاز، چه میزان بازیافتی در مقایسه با تزریق آب دارد. البته در این آزمایش‌ها، هر مرحله با فشار و یا ترکیب متفاوت با مرحله قبلی انجام می‌شود که در نهایت نتیجه‌های بازیافت طی نموداری مقایسه می‌شوند.

#### نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌ها

در این پژوهش، نتیجه‌های عملکرد تزریق گاز به شاخص یکی از مخازن نفتی ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. ویژگی‌های نفت استفاده شده در این آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین ترکیب‌های نفت مخزن مورد استفاده در این آزمایش‌ها و همچنین گازهای تزریقی در جدول ۲ آمده است. در این مطالعه ۳ سری آزمایش در فشارها و ترکیب‌های متفاوتی انجام شد. ذکر این نکته لازم است که ترکیب نفت مخزن در تمام آزمایش‌ها یکسان بوده تا بتوان نتیجه‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. جزئیات مربوط به این آزمایش‌ها در جدول ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است که فشار خروجی سیستم در فشار ۷۰ بار قرار داده شد، به عبارتی کل سیستم در این فشار قرار گرفت که شاخصی از فشار مخزن فرض شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود سری اول آزمایش‌ها با ترکیب گاز طبیعی خالص و در فشار ۳۰۰۰ psi و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به انجام رسید. سری دوم آزمایش‌ها با همان ترکیب و فشار ۴۰۰۰ psi و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به انجام شد. در سری سوم به ترکیب گاز، ۶ درصد کربن دی‌اکسید اضافه شد و آزمایش‌ها در فشار ۱۵۰۰ psi انجام شد. بازیافت حاصل از این مرحله تحت تأثیر دو عامل قرار گرفت که یکی اضافه کردن کربن دی‌اکسید و دیگری انجام آزمایش‌ها در فشار پایین‌تر بود. همچنین در این آزمایش‌ها برای تجزیه نتیجه‌ها از زمان بی‌بعد استفاده شده است. قبل از بحث درباره آزمایش‌ها، چگونگی محاسبه  $t_D$  به این شرح است:

$$q_{max} = \frac{KAp_0g}{\mu_0}$$

$$t_{ch} = \frac{PV}{q_{max}} = \frac{A.H.\phi}{KAp_0g/\mu} = \frac{H.\phi.\mu}{K.p_0g}$$

در این رابطه  $H$  طول (سانتی‌متر)،  $\phi$  تخلخل (درصد) و  $t_{ch}$  زمان مشخصه<sup>(۱)</sup> (ثانیه) می‌باشد و در نهایت داریم:

(۱) Characterization time

(۲) Breakthrough

جدول ۱ - ویژگی‌های نفت (سیال) مورد مطالعه در این پژوهش.

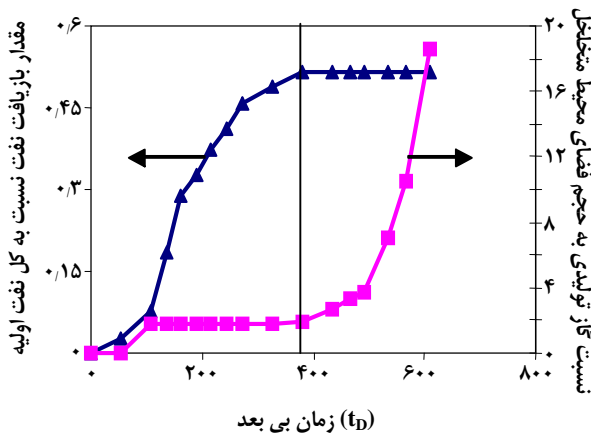
وزن مولکولی نفت مخزن	۱۱۳	B <sub>0</sub> در فشار اشباع (bbl/STB)	۱/۴۲
چگالی نسبی نفت مخزن	۰/۷۸	در فشار اشباع GOR (SCF/STB)	۴۵۹/۲۱
وزن مولکولی C <sub>12+</sub>	۲۱۰	گرانروی نفت (CP)	۱۰/۹۳
چگالی نسبی C <sub>12+</sub>	۰/۹۱	فشار نقطه حباب (psi)	۱۷۳۱
میزان آسفالتین	۱/۳۰	دمای مخزن (°C)	۱۸۱
API	۳۳/۱۷	فشار مخزن (psi)	۲۰۷۹

جدول ۲ - تجزیه نفت مخزن و ترکیب گاز طبیعی تزریق شده با ۶ درصد کربن دی اکسید.

ترکیبات	نفت مخزن (درصد مولی)	گاز تزریقی (درصد مولی)	گاز تزریقی با ۶ درصد مولی CO <sub>2</sub> (درصد مولی)
H <sub>2</sub> S	۰/۱۲	۰/۴۷	۰/۳۲
N <sub>۲</sub>	۰/۰۴	۴/۱۴	۳/۴۵
CO <sub>۲</sub>	۱/۲۵	۲/۱۷	۸/۲۳
C <sub>۱</sub>	۲۵/۳	۸۴/۹	۸۰/۰۱
C <sub>۲</sub>	۵/۷	۵/۱۶	۴/۹
C <sub>۳</sub>	۴/۷۱	۱/۷۳	۱/۶۶
iC <sub>۴</sub>	۱/۱۷	۰/۳۴	۰/۳۳
nC <sub>۴</sub>	۳/۲۳	۰/۵۱	۰/۵
iC <sub>۵</sub>	۱/۰۲	۰/۱۷	۰/۱۷
nC <sub>۵</sub>	۱/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۴
C <sub>۶</sub>	۳/۹۸	۰/۱۳	۰/۱۵
C <sub>۷</sub>	۳/۵۱	۰/۱	۰/۱۱
C <sub>۸</sub>	۳/۳	۰/۰۳	۰/۰۵
C <sub>۹</sub>	۳/۳۹	مجموع = ۱۰۰	مجموع = ۱۰۰
C <sub>۱۰</sub>	۳/۰۸	وزن مولکولی	وزن مولکولی
C <sub>۱۱</sub>	۲/۶۶	وزن مخصوص	وزن مخصوص
C <sub>۱۲+</sub>	۳۶/۴۱	Net Heat Value	Net Heat Value
مجموع	۱۰۰	Gross Heat Value	Gross Heat Value

جدول ۳ - جزئیات آزمایش‌های انجام شده.

شماره نمونه	مدل فیزیکی	طول (cm)	سطح (cm <sup>۲</sup> )	حجم فضای خالی (cc)	تخلخل (درصد)	نفوذپذیری (md)	اشباع اولیه نفت	فشار گاز تزریقی (psi)	مقدار کربن دی اکسید (درصد)	مقدار نفت تولیدی بعد از تزریق گاز
۱	M <sub>۱</sub>	۴/۹	۳۲/۱۷	۲۹/۶۱۷۷	۰/۱۸۷۸	۱۵	۰/۷۴۲۷	۳۰۰۰	۰	۶۹/۵۵۳۳
۲	M <sub>۲</sub>	۵	۳۲/۱۷	۲۷/۸۵	۰/۱۷۳۱	۱	۰/۷۶۴۸	۴۰۰۰	۰	۷۴/۱۷۹۷
۳	M <sub>۳</sub>	۵	۳۲/۷۴۶	۲۸/۷۴۵۶	۰/۱۷۸۷	۱	۰/۷۴۸۰	۱۵۰۰	۶	۴۶/۵۱۱۶



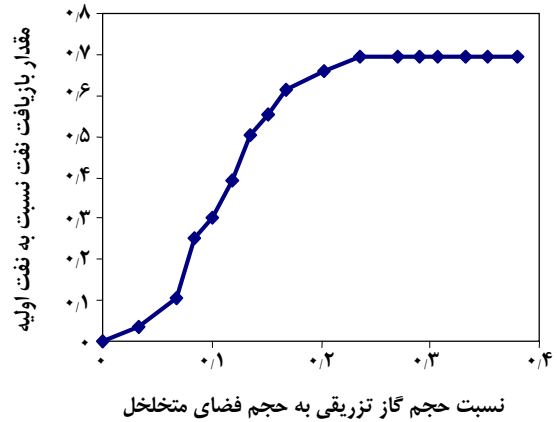
شکل ۳- مقایسه بین تولید نفت و گاز در آزمایش‌های سری اول.

از گاز، میزان اشباع نفت نرمال شده به صفر رسیده است.

### مرحله سوم (تزریق گاز طبیعی + ۶ درصد کربن دی اکسید در فشار ۱۵۰۰ psi)

در این مرحله به ترکیب گاز طبیعی، ۶ درصد کربن دی اکسید نیز اضافه و سپس در فشار ۱۵۰۰ psi و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به نمونه تزریق شد. با توجه به نمودار بازیافت در شکل ۱۰، در این مرحله بازیافتی در حدود ۴۷ درصد به دست آمده است. همان‌طور که در پیش گفته شد، میزان بازیافت در این حالت تحت تاثیر دو عامل قرار گرفته است. عامل اول اضافه کردن گاز کربن دی اکسید به نمونه است که تا حدودی باعث سنگین تر شدن گاز طبیعی می‌شود. از طرفی کربن دی اکسید با نفت مخزن تا حدودی قابلیت امتزاج‌پذیری دارد. این عامل باعث می‌شود تا این‌که گاز در نفت حل شده و در نتیجه گاز و نفت به صورت محلول خارج شوند و بنابراین، احتمال وقوع پدیده انگشتی<sup>(۱)</sup> کاهش می‌یابد و در نتیجه این عامل باید باعث افزایش بازیافت شود. ولی در اینجا چون میزان کربن دی اکسید اضافه شده خیلی کم است و به ویژه این‌که فشار تزریق خیلی کاهش یافته است، بنابراین، میزان بازیافت نیز کم شده است. در مقایسه این دو عامل باید گفت که کاهش شدید فشار، اثر بیشتری در مقایسه با اضافه کردن میزان نا چیز کربن دی اکسید داشته است. با دقت در نمودارهای تولید گاز و تولید نفت بر حسب  $t_D$  در شکل ۱۱ واضح است که وقتی گاز شروع به تولید کرده است ( $t_D=16$ ) میزان تولید نفت نیز کاهش پیدا کرده است تا این‌که به یک مقدار ثابت برسد.

(۱) Fingering



شکل ۲- بازیافت برحسب میزان حجم گاز تزریق شده در آزمایش‌های سری اول، ( $P=3000 \text{ psi}$ ،  $t_{BI}=50$ ).

به تدریج کاهش پیدا می‌کند تا این‌که پس از تزریق PV ۰٫۲۴ از گاز، میزان اشباع نفت نرمال شده به صفر می‌رسد.

### مرحله دوم (تزریق گاز طبیعی در فشار ۴۰۰۰ psi)

با توجه به نمودار بازیافت در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که بازیافتی در حدود ۷۵ درصد از تزریق گاز به دست آمده است که میزان قابل توجهی است. این امر نشان دهنده این است که در این فشار، گاز عمل جابه‌جایی را به خوبی انجام داده و حتی مقداری از نفت موجود در خلل و فرج‌های ریزتر که فشار ۳۰۰۰ psi قادر به خارج کردن آنها نبوده را خارج کرده است. با دقت به نمودارهای تولید گاز و تولید نفت بر حسب  $t_D$  در شکل ۷ نیز مشخص می‌شود که در  $t_D = 39$  نرخ تولید گاز به شدت افزایش یافته است که این پدیده مصادف با زمانی است که تولید نفت به حالت ثابت در آمده است. البته باید به این نکته توجه داشت که اولین تولید گاز در  $t_D = 31$  صورت پذیرفته است که در این زمان نیز تولید نفت رو به کاهش گذاشته است.

با توجه به نمودار اشباع نفت بر حسب  $t_D$  شکل ۸ نیز مشخص است که میزان نفت از میزان اولیه خود در داخل نمونه ( $S_{oi}=0.76$ ) به تدریج کاهش پیدا کرده تا این‌که در زمان اولین تولید گاز، این کاهش به تدریج کم‌تر شده و پس از مدتی ثابت می‌ماند ( $S_{or}$ ). ثابت شدن میزان  $S_o$  در  $t_D = 40$  صورت می‌گیرد. با دقت در نمودار نرمال شده اشباع نفت بر حسب حجم گاز تزریق شده در شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که پس از تزریق PV ۰٫۲۵

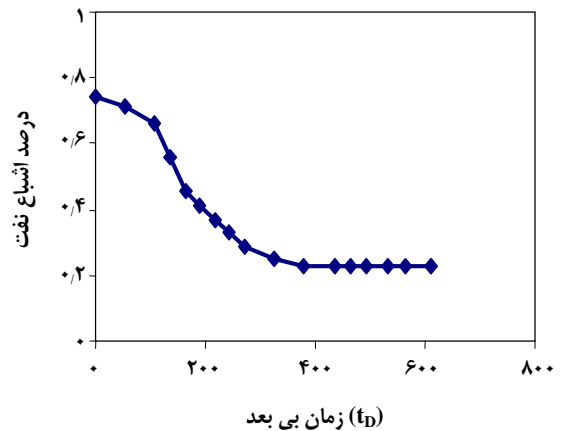
با توجه به نمودار اشباع نفت بر حسب  $t_D$  در شکل ۱۲ نیز مشخص است تولید نفت از میزان اولیه خود ( $S_{oi}=0.74$ ) به تدریج کاهش یافته و در اولین زمان تولید گاز این کاهش خیلی کمتر شده تا این که به  $S_{or}$  رسیده است. با دقت به نمودار نرمال شده اشباع نفت بر حسب حجم گاز تزریق شده که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، می توان فهمید که پس از تزریق PV ۰.۲۶ از گاز، میزان اشباع نفت نرمال شده به صفر رسیده است.

### مقایسه سه سری آزمایش ها با یکدیگر

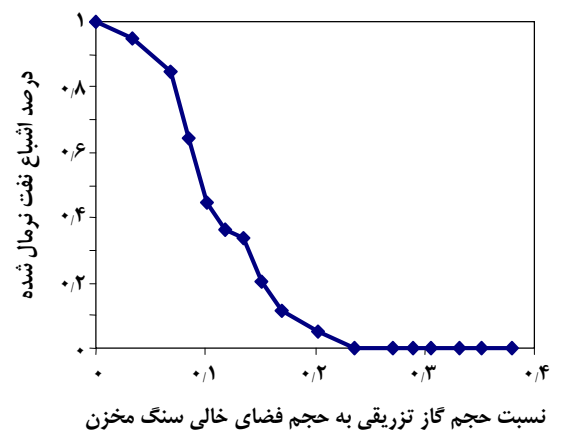
با توجه به آنچه گفته شد مشخص می شود که فشار تزریق نقش به نسبت زیادی در میزان بازدهی دارد. همان طور که از آزمایش های سری اول و دوم مشخص است، افزایش فشار باعث به وجود آمدن بازده بالاتری شده است. دلیل این امر به خاطر آن است که افزایش فشار باعث می شود که سیال تزریقی به درون خلل و فرج های کوچک تر هم نفوذ کرده و نفت آنها را جابه جا کند. البته این مطلب به آن معنی نیست که همیشه افزایش فشار باعث به وجود آمدن بازده بالاتری خواهد شد. این افزایش باید تا حداقل فشار امتزاج پذیری (MMP) صورت گیرد تا نسبت به ایجاد بازده بالاتر عمل کند. در موردهایی افزایش فشار بیش از MMP به تشکیل پدیده انگشتی کمک کرده و باعث افت بازده می شود. همچنین این افزایش فشار باعث می شود تا گرانیوی سیال افزایش یافته و جابه جایی به کندی صورت گیرد.

اضافه کردن کربن دی اکسید به گاز باید تا حدودی باعث ایجاد شرایط امتزاج پذیر شود، اما این عامل در مقایسه با کاهش شدید فشار بسیار ناچیز بود و میزان بازده افت قابل توجهی در مقایسه با دو حالت قبلی دارد. بنابراین، اضافه کردن عامل امتزاج پذیر باید در محدوده MMP صورت گیرد تا بتواند اثر خود را نشان دهد. اثری که در پاره ای از موردها باز یافت بالای ۹۰ درصد را در مطالعات آزمایشگاهی نتیجه می دهد. شکل ۱۴ نتیجه های حاصل از مقایسه ۳ آزمایش انجام شده را نشان می دهد.

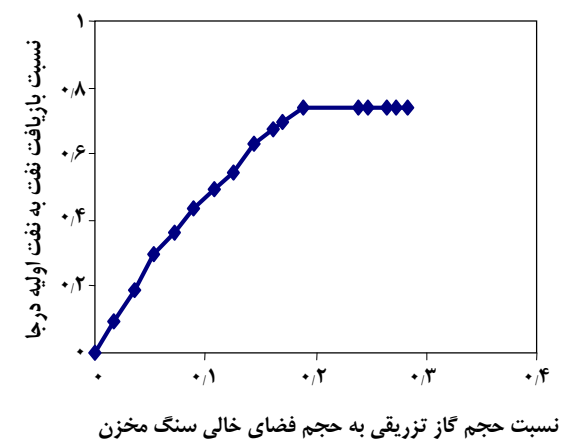
در آزمایش های انجام شده در این پژوهش سعی شده تا حداقل خطا موجود باشد، اما موردهایی را در این آزمایش باید مورد توجه قرارداد که می توانند باعث تفاوت در نتیجه ها و ایجاد خطا کنند. در فرایندهای امتزاجی طول نمونه یکی از پارامترهای مهم برای امتزاجی شدن فرایند است. بنابراین، با افزایش طول مغزه احتمال رسیدن به شرایط امتزاجی بیشتر است. همچنین محدودیت های عملیاتی باعث شد که فشار تا مقدار محدودی افزایش یابد.



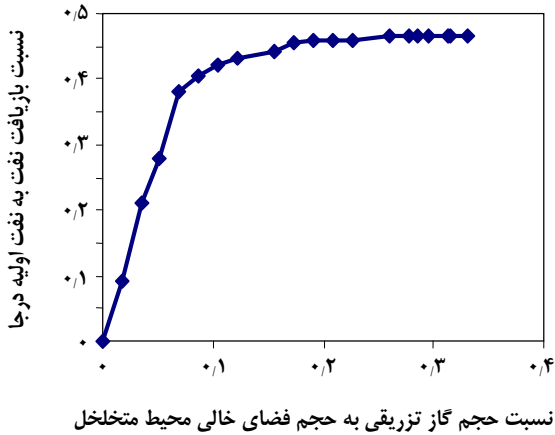
شکل ۴- میزان اشباع نفت بر حسب  $t_D$  در آزمایش های سری اول، ( $P=3000 \text{ psi}$ ،  $t_{Bi}=50$ ).



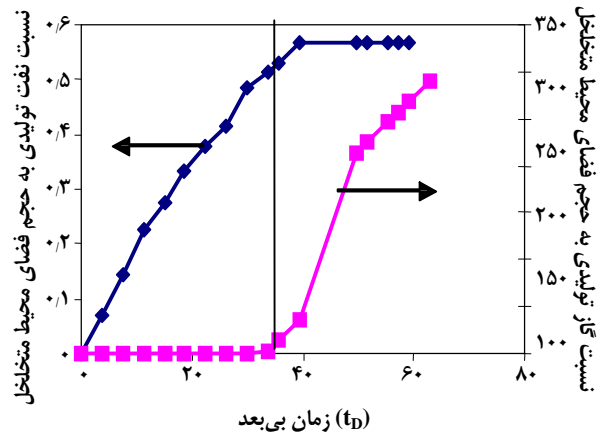
شکل ۵- میزان اشباع نفت نرمال شده بر حسب میزان حجم گاز تزریق شده برای آزمایش های سری اول، ( $P=3000 \text{ psi}$ ،  $t_{Bi}=50$ ).



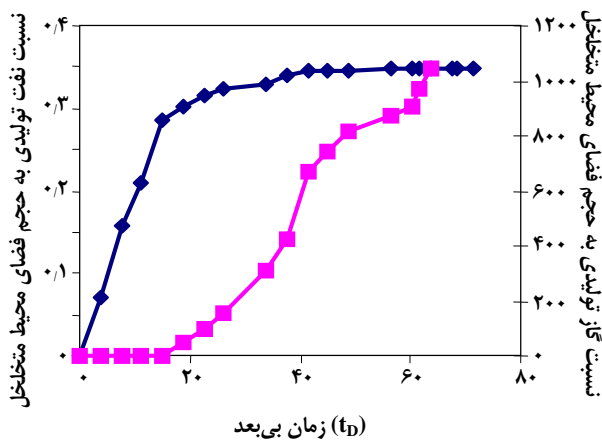
شکل ۶- باز یافت بر حسب میزان حجم گاز تزریق شده برای آزمایش های سری دوم، ( $P=4000 \text{ psi}$ ،  $t_{Bi}=31$ ).



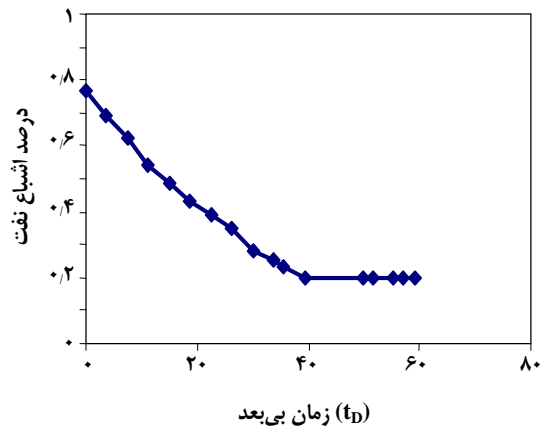
شکل ۱۰- باز یافت برحسب میزان حجم گاز تزریق شده، آزمایش سوم، (۶ درصد  $\text{CO}_2$ ،  $P = 1500 \text{ psi}$ ).



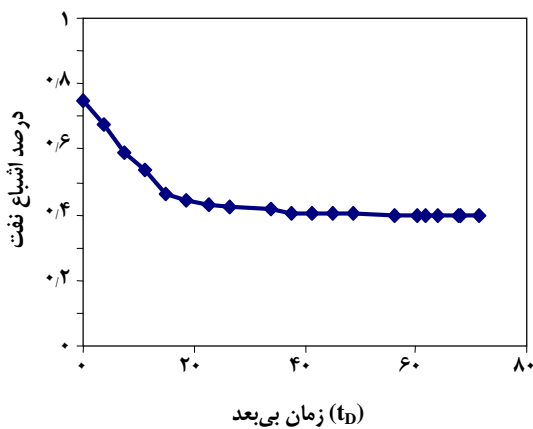
شکل ۷- مقایسه بین تولید نفت و گاز برای آزمایش‌های سری دوم، (۳۱  $t_{Bt}$ ،  $P=4000 \text{ psi}$ ).



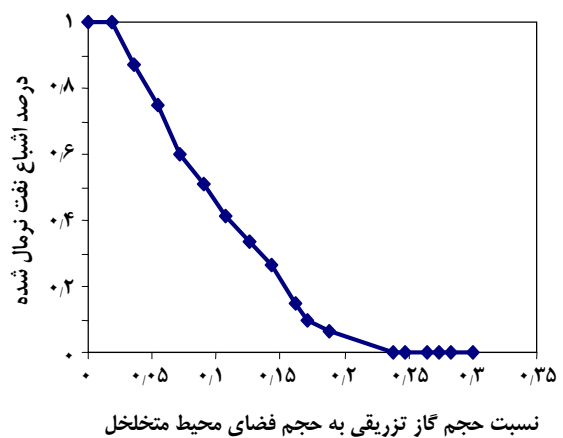
شکل ۱۱- مقایسه بین تولید نفت و گاز، آزمایش سوم، (۶ درصد  $\text{CO}_2$ ،  $P = 1500 \text{ psi}$ ).



شکل ۸- میزان اشباع نفت بر حسب  $t_D$  برای آزمایش‌های سری دوم، (۳۱  $t_{Bt}$ ،  $P=4000 \text{ psi}$ ).

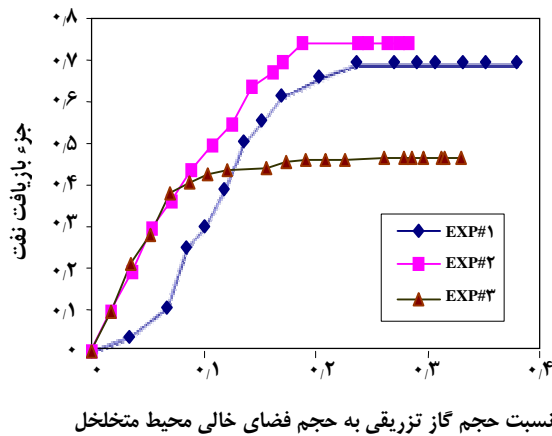


شکل ۱۲- میزان اشباع نفت بر حسب  $t_D$ ، آزمایش سوم، (۶ درصد  $\text{CO}_2$ ،  $P = 1500 \text{ psi}$ ).



شکل ۹- میزان اشباع نفت نرمال شده برحسب میزان حجم گاز تزریق شده، آزمایش دوم.



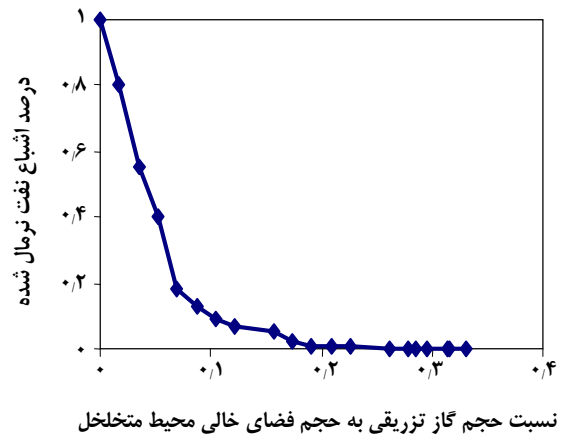


شکل ۱۴- مقایسه ضریب برداشت نفت در سه آزمایش انجام شده.

### نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی با نرم افزار

محاسبه‌های انجام شده برای تخمین MMP، به وسیله‌ی نرم‌افزار محاسبه‌های مربوط به به‌دست آوردن Cricondenbar و Cricondenterm انجام شد و سپس نمودار فشار برحسب دما<sup>(۳)</sup> نیز به‌دست آورده شد. نرم افزار استفاده شده در این مطالعه WinProp است که از مجموعه‌های نرم افزار CMG است. طبق محاسبه‌های نرم افزار Cricondenbar به‌دست آمده برای این ترکیب نفت مخزن برابر با ۶۰۹ psia گزارش شده است که در این فشار، دمای مخزن ۸۱۱ درجه فارنهایت بوده است. همچنین Cricondenterm این ترکیب، ۸۷۲ درجه فارنهایت گزارش شده که در این دما، فشار مخزن ۴۹۶ psia بوده است.

در ادامه محاسبه‌ها برای ترکیب‌های متفاوت گاز و در فشارهای متفاوت انجام شد. این محاسبه‌ها شامل پنج مرحله بوده در هر کدام از این مراحل، ترکیب گاز تزریقی متفاوت بود. در مرحله اول ترکیب گاز طبیعی خالص در شبیه‌سازی به کار رفت. در مراحل دوم تا پنجم به ترتیب: ۶، ۲۸، ۴۸، ۷۸ درصد کربن دی اکسید به ترکیب گاز نیز اضافه شد. دلیل این امر این بود که کربن دی اکسید به خاطر ویژگی امتزاج‌پذیری که با نفت دارد، باعث افزایش بازیافت شده و نیز سبب می‌شود تا MMP کاهش پیدا کند. مزیت کاهش MMP این است که به فشار تزریق آزمایش‌های انجام شده نزدیک‌تر شده و می‌توان بیان کرد که آیا



شکل ۱۳- میزان اشباع نفت نرمال شده برحسب میزان حجم گاز تزریق شده، آزمایش سوم.

بدون تردید در صورت عدم محدودیت و با افزایش فشار تزریق و بالا بردن مقدار CO<sub>2</sub> نتیجه‌های مطلوب‌تری خواهیم داشت.

### شبیه‌سازی حداقل فشار امتزاج‌پذیری

طراحی فرایندهای تزریق گاز<sup>(۱)</sup> بیشتر شامل یک سری محاسبه‌های چند مرحله‌ای برای محاسبه فرایند تبخیر یا استخراج هستند. در نهایت یک نمودار سه گانه (مثلثی) ساختگی از این محاسبه‌ها به وجود می‌آید که به تفسیر نتیجه‌ها کمک می‌کند. بیشتر عملیات تزریق گاز به سمت امتزاج‌پذیری کامل پیش نمی‌روند، بلکه شرایط نزدیک امتزاج‌پذیری را تحقق می‌بخشد. حتی با وجود این که امتزاج‌پذیری به طور کامل تحقق پیدا نکند، بازیافت‌های ذکر شده می‌توانند به انجام برسند. به وسیله‌ی تجزیه نمودار سه گانه (مثلثی) امتزاج‌پذیری ترکیبات در ارتباط با لوله قلمی<sup>(۲)</sup> یا آزمایش‌های تزریق به مغزه، شرایط عملیاتی بهینه یا ترکیب فرایندهای تزریق گاز می‌تواند تعیین شود. همچنین MCM option در نرم افزار شبیه‌سازی می‌تواند برای تعیین حداقل فشار امتزاج‌پذیری (MMP) یا امتزاج‌پذیری در نخستین تماس (FCM) برای یک نفت و فرایند تزریق گاز معلوم در یک دمای مشخص به کار رود، همچنین می‌تواند حداقل تراز غنی‌سازی امتزاج‌پذیری (MME) مورد نیاز برای امتزاج‌پذیری یک یا چند مرحله‌ای را در یک دما، فشار، ترکیب نفت و ترکیب‌های گاز اولیه و ترکیبی معلوم تعیین کند.

(۱) Solvent

(۲) Slim tube

(۳) Phase envelop

جدول ۴- نتیجه‌های MMP به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها برای ترکیب‌های متفاوت.

کربن دی اکسید (درصد مول)	MMP(psia)	
	FCM	MCM
—	۱۱۸۲۰	۹۷۸۰
۶	۱۱۲۰۰	۹۳۰۰
۲۸	۹۵۰۰	۸۱۰۰
۴۸	۸۵۵۰	۷۱۵۰
۷۸	>۷۰۰۰	>۷۰۰۰

استفاده از شبیه ساز حداقل فشار امتزاجی نفت مخزن با گاز نیز شبیه‌سازی شده است. در طی این شبیه‌سازی به ترکیب گاز طبیعی خالص، مقداری کربن دی اکسید نیز اضافه شده است و شبیه سازی‌ها در فشارهای متفاوت هدایت شده اند. اکنون با توجه به آنچه که گفته شد می توان نتیجه‌های زیر را بیان کرد:

۱- با توجه به آزمایش‌های انجام شده و محدودیت‌های آزمایش، مشخص شد که ترکیب گاز طبیعی خالص در فشار ۴۰۰۰ psia بالاترین میزان بازیافت را در مقایسه با ترکیب‌های دیگر نتیجه می دهد.

۲- هدف از اضافه کردن مقادیر متفاوت کربن دی اکسید به ترکیب گاز، به دست آوردن شرایط مطلوب برای امتزاج پذیری است. این شرایط شامل فشار و ترکیب گاز تزریقی است که با تعدیل هرکدام از آنها می توان به شرایط ایده ال حداقل فشار امتزاج پذیری دست پیدا کرد.

۳- اضافه کردن کربن دی اکسید به گاز باید به مقدار مناسب انجام شود تا بتواند اثر خود را نشان دهد. اما از آنجایی که میزان کربن دی اکسید اضافه شده در آزمایش‌ها خیلی محدود بود و از طرف دیگر افت فشار در مقایسه با مراحل دیگر آزمایش‌ها خیلی زیاد بود، بنابراین میزان بازیافت در مقایسه با مراحل قبل افت محسوسی داشت.

۴- اضافه کردن عامل امتزاج پذیر باید در محدوده فشار امتزاجی انجام پذیرد. البته هرچه میزان عامل امتزاج پذیر بیشتر باشد، به طبع حداقل فشار امتزاج پذیری نیز افت خواهد کرد.

۵ - با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از شبیه سازی می توان گفت هر چند که آزمایش‌ها تا حدی امتزاج پذیری را نشان می‌دهند، اما هیچ یک از آزمایش‌های انجام شده به طور کامل و صد در صد امتزاج‌پذیر نبوده اند. چرا که حداقل فشار

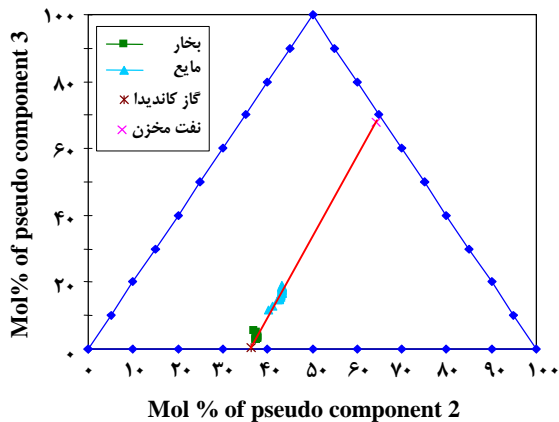
آزمایش‌های انجام شده امتزاج پذیر بوده است یا خیر. البته با توجه به این که در آزمایش‌های انجام شده تنها ترکیب ۶ درصد کربن دی اکسید مورد استفاده قرار گرفته است، بنابراین، با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده از شبیه سازی‌های MMP می‌توان گفت که ترکیب گاز طبیعی افزون بر ۶ درصد کربن دی اکسید و در فشار ۱۵۰۰ psia غیر امتزاجی بوده است.

همان‌طور که در پیش نیز گفته شد، شبیه‌سازی روی ترکیب‌های متفاوت گاز و در فشارهای متفاوت انجام شده است. نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی که با ترکیب‌های متفاوت گاز انجام شد نشان داد، اضافه شدن کربن دی اکسید به امتزاج پذیری گاز کمک می‌کند، بنابراین، هرچه میزان آن بیشتر باشد، دستیابی به شرایط امتزاج پذیر راحت‌تر و سریع‌تر خواهد شد. این روند به وضوح در نتیجه‌های به‌دست آمده در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ قابل مشاهده است، به گونه ای که هرچه میزان کربن دی اکسید اضافه شده به ترکیب گاز طبیعی بیشتر بوده دستیابی به شرایط امتزاج پذیری در فشار پایین‌تری محقق شده است. (MMP کاهش یافته است). نتیجه‌های MMP به‌دست آمده برای ترکیب‌های متفاوت در جدول ۴ نیز تأیید کننده این مطلب هستند.

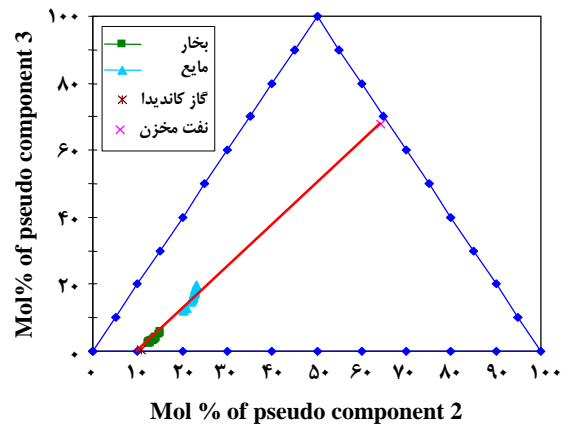
فشارهای آزمایش‌های انجام شده خیلی پایین بودند، بنابراین، ترکیب گاز طبیعی افزون بر ۷۸ درصد کربن دی اکسید با فشار ۷۰۰۰ psia نزدیک‌ترین ترکیب برای انجام امتزاج پذیری است.

## نتیجه‌ها

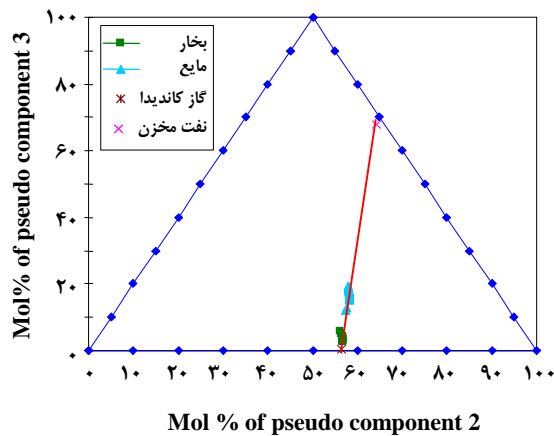
به‌طور کلی فرایند تزریق گاز از جنبه های گوناگون قابل بررسی است. در تحقیق حاضر فرایند تزریق گاز شاخص به نمونه مغزه تهیه شده از یکی از مخازن نفتی ایران در طی ترکیب‌ها و فشارهای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین با



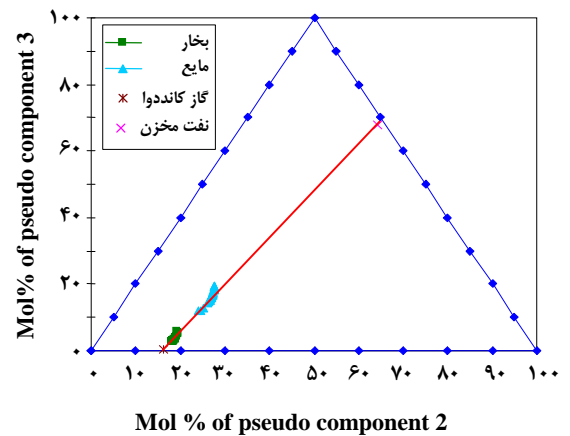
شکل ۱۷- نمودار سه گانه (مثلثی) گاز طبیعی با ۲۸ درصد کربن دی اکسید در فشار ۸۱۰۰ psia.



شکل ۱۵- نمودار سه گانه (مثلثی) گاز طبیعی خالص در فشار ۹۷۸۰ psia.



شکل ۱۸- نمودار سه گانه (مثلثی) گاز طبیعی با ۴۸ درصد کربن دی اکسید در فشار ۷۱۵۰ psia.



شکل ۱۶- نمودار سه گانه (مثلثی) گاز طبیعی با ۶ درصد کربن دی اکسید در فشار ۹۳۰۰ psia.

- برای به دست آوردن میزان بازیافت بالاتر، در صورت نداشتن محدودیت‌های عملیاتی، پیشنهاد می‌شود که آزمایش‌ها در فشار بالاتر (فشار امتزاجی) انجام گیرند.  
 - پیشنهاد می‌شود افزودن بر کربن دی اکسید، آزمایش‌ها با نیتروژن و یا دیگر گازهای هیدروکربنی انجام شوند تا بتوان اثرهای آنها را با یکدیگر مقایسه کرد.  
 - برای فراهم کردن شرایط مناسب‌تر امتزاج پیشنهاد می‌شود آزمایش‌ها با مدل‌های فیزیکی با طول بیشتر انجام شوند.

### فهرست علائم

$\rho$	چگالی (Kg/cm <sup>۳</sup> )
$g$	شتاب ثقل (cm/s <sup>۲</sup> )

امتزاجی گاز طبیعی خالص با نفت مخزن در حدود ۹۷۸۰ psia بوده است. اما نزدیک‌ترین ترکیب به شرایط آزمایش، ترکیب گاز طبیعی افزون بر آن ۷۸ درصد کربن دی‌اکسید و با فشار تقریبی ۷۰۰۰ psia می‌باشد که امتزاج پذیری بیشتری را نشان داده و به دنبال آن بالاترین بازیافت را خواهد داشت.  
 ۶- با توجه به نتیجه شبیه‌سازی، هرچه میزان کربن دی اکسید اضافه شده بیشتر بوده، دستیابی به شرایط امتزاج پذیری راحت‌تر و سریع‌تر مهیا شده است.

از آنجایی که فرایند تزریق گاز، به عنوان یکی از راه‌کارهای مناسب برای ازدیاد برداشت از مخازن نفتی ایران محسوب می‌شود، با توجه به کارهای انجام شده در این پژوهش، پیشنهادهای زیر به منظور تکمیل نتیجه‌های به‌دست آمده در این کار ارایه می‌شوند:

$\mu_0$	گرانروی (cp)	q	دبی ماکسیمم (cc/sec)
$9.678 \times 10^{-1}$	$(\text{kg/cm}^2) \backslash \text{atm}$	k	تراوایی (darcy)
		A	سطح مقطع ( $\text{cm}^2$ )
تاریخ پذیرش: ۸۵/۸/۲۹	تاریخ دریافت: ۸۴/۶/۱۳	$\rho_0$	دانسیته نفت (atm/cm)

## مراجع

- [1] Benham, A.L., Dowden, W.E. and Kunzman, W.J., Miscible Fluid Displacement - Prediction of Miscibility, *Trans, AIME*, (21a: 22a), 229 (1960).
- [2] Musku, T. W., Pressure Maintenance by Gas Injection in Opelika Field of Henderson County, *Oil & Gas Journal*, Repr; Ser; Su: 55 (1946).
- [3] Elkins, M., Cook, M., Miscible Gas Injection in Fractured Reservoirs, *JPT*, **14**(1), 33, (1969).
- [4] "Oil Research Program Implementation", Department of Energy (DOE), U.S., Report at Site/ [www.doe.gov/](http://www.doe.gov/). Washington, U.S.A. (1982).
- [5] Barrenblatt, G., Zheltov, Y., Kochina, I., Experimental and Mathematical Investigation for Miscible and Immiscible Gas Injection in Porous Media, *Oil & Gas Journal*, Repr, 130 (1945).
- [6] Morel, M., Immiscible and Miscible Gas-Oil Displacement in Porous Media; Presented at SPE Conference, Washington, U.S.A., *JPT Journal*, **20**, 122 (1991).
- [7] Hua Hu, A., Pore - Scale Network Modeling of Water Flood Residual Oil Recovery by Gas Flooding, SPE/DOE Conference, Texas U.S.A. (1991).
- [8] Wylie, A., Billiot, J., Modeling of Water Flood Residual Oil Recovery by Gas Flooding, paper SPE / DOE 27814, Department of Energy, University of Houston, U.S.A. (1994).
- [9] Sorbie, K.S., Darman, N.H., The Development of Pseudo Functions for Gravity- Dominated Immiscible Gas Displacements, paper SPE 51941, Heriot-Watt University (1999).
- [10] Burger, P., Evtyukin, A., Mathematical Model and Laboratory Study of The Miscible Gas Injection in Fractured Porous Reservoirs, Paper SPE 36131, Moscow State Oil & Gas Academy (1996).
- [11] Marcel Latil, Enhanced Oil Recovery, Reprint series, SPE (1980).
- [12] Green, W. and Paul Willhite, G., "Enhanced Oil recovery", Reprint Series, SPE.
- [13] Donaldson, E.C. and Chilingarian, G.V., "Enhanced Oil Recovery II", Imprinti Elsevier (1989).
- [14] Saidi, A.M., "Reservoir Engineering of Fractured Reservoirs", Total Edition Press, Paris, (1987).
- [15] CSmith, C.R., "Mechanics of Secondary Oil recovery", Reinhold Publishing CO, Newyork City, (1966).