

## بررسی و روشهای EOR با استناد به آزمایشهای شبیه سازی شده و مطالعه موردی تزریق CO<sub>2</sub> در مخازن بمنظور ازدیاد برداشت

علی کمایی<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، جمشید مقدسی<sup>۲</sup> دکتری مهندسی نفت استادیار دانشگاه صنعت نفت

### چکیده

از آن جا که بیشتر مخازن کشور ایران در نیمه دوم عمر خود بسر می برند و هر چه از عمر مخزن می گذرد برداشت از آن دشوارتر می شود صیانت از مخازن نفتی بمنظور افزایش طول عمر آنها، همواره از دغدغه های صنعت نفت کشور بشمار می رود. سالانه مبالغ زیادی صرف بودجه های تحقیقاتی در جهان بر روی روشهای از دیاد برداشت از مخازن نفتی می شود که ایران نیز از این حیث مستثنی نبوده و دارندگان این ذخایر می کوشند تا با بکارگیری روشهای مختلف با هزینه کم ولی با کارایی بالاتر از منابع خود بهره جویند. زمانی که انرژی اولیه مخزن در حال تخلیه شدن است، حفظ فشار مخزن برای افزایش تولید و به حداکثر رساندن بازیافت نهایی نفت یک امر ضروری است. لذا برای دستیابی به چنین هدفی از روشهای بهبود برداشت نفت استفاده میکنند. در این مقاله به بیان انواع روشهای ازدیاد برداشت پرداخته شده است. مقایسه ای آماری بین روشها با توجه به خصوصیات آنها صورت گرفته است. بیان انجام آزمایشات متفاوت جهت مشخص کردن بهترین روش از جمله آزمایشهای دوموره، تخلیه نفت با روش گرانیوی و فشار موئینگی توسط انستیتو نفت فرانسه و آزمایش سروس و سعیدی ذکر شده اند و در نهایت سناریوی روش تزریق دی اکسید کربن مورد ارزیابی قرار گرفته است که بیانگر انحلال دی اکسید کربن در نفت بوده که با افزایش حجم و اشباعیت فاز نفت باعث کاهش گرانیوی گردیده و نیروی رانش گاز محلول در نفت را افزایش می دهد.

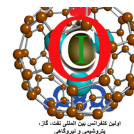
واژه های کلیدی: ازدیاد برداشت- گازهای امتزاج پذیر- گاز کربنیک رومی - تزریق غیرامتزاجی - نیتروژن رومی

### 1- مقدمه

در دوره ای که برداشت به روش طبیعی از مخازن کشور دلیل افت فشار کاهش یافته است رو آوردن به روشهای ازدیاد برداشت بمنظور صیانت از مخازن تنها راه موجود میباشد. ایران نیز بعنوان چهارمین تولید کننده نفت برای تثبیت جایگاه خود در جهان نباید از تحقیقات در این زمینه غافل بماند. ازدیاد برداشت میحتی راجع به روشهای مورد استفاده برای بازیافت بیشتر نفت از مخازن نفتی است، که جدا از برداشت اولیه و ثانویه می باشد. در برداشت اولیه، استخراج نفت بیشتر با استفاده از انرژی داخلی مخزن، که توسط گازهای تحت فشار یا رانش طبیعی توسط آب ایجاد می شود، صورت می گیرد. در برداشت ثانویه، بیشتر از تزریق آب یا آبرویی استفاده می شود. به این ترتیب ازدیاد برداشت به عنوان سومین مرحله برداشت مطرح می شود. ازدیاد بازیافت نفت (Recovery IOR) Improved Oil) و بازیافت پیشرفته نفت (Advanced Oil Recovery) (AOR) معانی مشابهی با ازدیاد برداشت دارند بجز آنکه آنها روشهای مقدماتی و ثانویه برداشت را نیز در برمی گیرند، در ضمن گاهی اوقات ازدیاد برداشت می تواند زودتر از مراحل قبل بکار رود. قبل از تهیه این پژوهش، آبرویی نوعی

1- خوزستان - امیدیه - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه ali.kamaei.b@gmail.com

2- خوزستان - امیدیه - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه

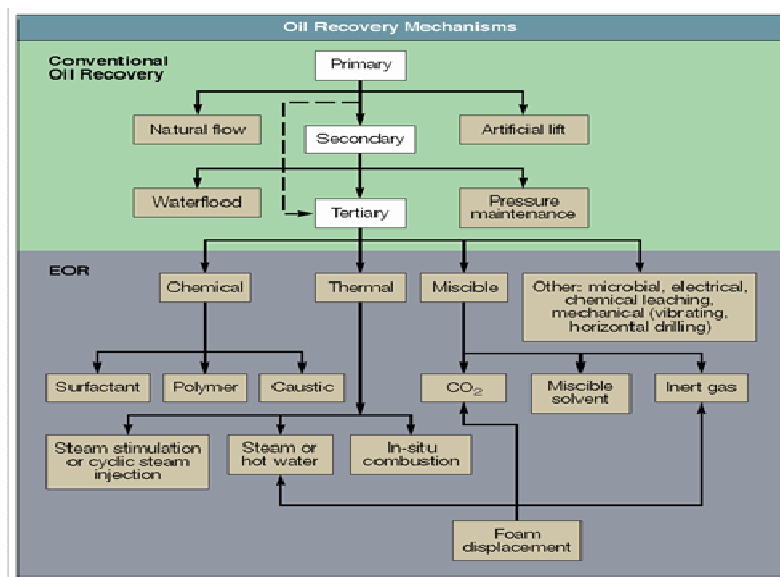


از ازدیادبرداشت شناخته میشود ولی الان ازدیادبرداشت به عنوان مرحله‌ای پس از آن به شمار می‌رود. در ادامه روشهای مختلف ازدیادبرداشت را ذکر خواهیم کرد و مقایسه ای بین آنها صورت خواهیم داد و در نهایت بطور مفصل در رابطه با تزریق گازهای دی اکسید کربن و ازت در مخازن از منابع گرفته تا روشهای تولید و مزایا و معایب آنها از هر نظر پرداخته شده است. همچنین در یک مطالعه میدانی اثر تزریق این گازها در چاه های متعدد از لحاظ تئوری بررسی و نتایج آن ارائه شده است. [1]

## 2- فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت :

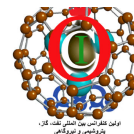
فرآیند ازدیاد برداشت نفت به فرآیندهایی اطلاق می گردد که طی آن سعی می شود با استفاده از انرژی یا مواد تزریقی سیالاتی را که تولید آنها با روش های معمولی امکان پذیر یا مقرون به صرفه نیست استخراج و مورد بهره برداری قرار دهند. روش های مختلف ازدیادبرداشت به صورت کلی به 4 دسته تقسیم بندی می گردند که در ذیل بطور خلاصه به آنها می پردازیم.

بازیافت حرارتی (Recovery Thermal) ، امتزاج گاز (Miscible Gas) ، رانش شیمیایی (Flooding Chemical) و رانش میکروبی (Flooding Microbial) [2].



شکل 1 - شماتیک روشهای کلی ازدیاد برداشت

- 1-2- روشهای بازیافت حرارتی عبارتند از: بخارروبی (Flooding Steam) ، تحریک دوره‌ای با بخار (Cyclic Stimulation Steam) و احتراق درجا (In situ Combustion) .
- 2-2- روشهای امتزاج گاز برای بازیافت نفت عبارتند از: گاز کربنیک رویی (flooding Carbon Dioxide) ، تحریک دوره‌ای با دی اکسید کربن (Stimulation Cyclic Carbon Dioxide) ، نیتروژن رویی (Flooding Nitrogen) و نیتروژن - گاز کربنیک رویی (Nitrogen-CO2 Flooding) .



3-2- همچنین روشهای رانش شیمیایی عبارتند از: پلیمر رومی (Polymer Flooding) شامل پلیمرهای ژلاتینی، رانش با پلیمرهای میسلی (Flooding Micellar-Polymer) و قلیارومی (Alkaline Flooding).

4-2- روشهای میکروبی عبارتند از: رانش میکروبی (Microbial Flooding) و بازیافت میکروبی دوره‌ای (Cyclic Microbial Recovery).

روشهای آبرویی، گرمایی، شیمیایی و روش تزریق گازهای امتزاجی با افزایش فشار مخازن بطور فیزیکی باعث جابجایی نفت در مخزن از محل چاههای تزریقی به سمت چاههای تولیدی می‌گردد. همچنین با کاهش ویسکوزیته نفت باعث جابجایی بهتر نفت در مخزن می‌گردد. لازم به ذکر است که هدف همه روشهای ازدیادبرداشت به حرکت واداشتن نفت‌های باقیمانده درون مخزن می‌باشد. ضریب جابجایی نفت در اثر کاهش ویسکوزیته (در روشهای گرمایی) یا به علت کاهش نیروی موئینگی و کشش سطحی (پلیمر رومی، تزریق متناوب آب و گاز) بهبود می‌یابد. در یک پروژه ازدیادبرداشت تعیین مقدار نفت باقیمانده در مخزن، مکانیسم‌های لازم برای بهبود برداشت و تجهیزات مورد استفاده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. [3]

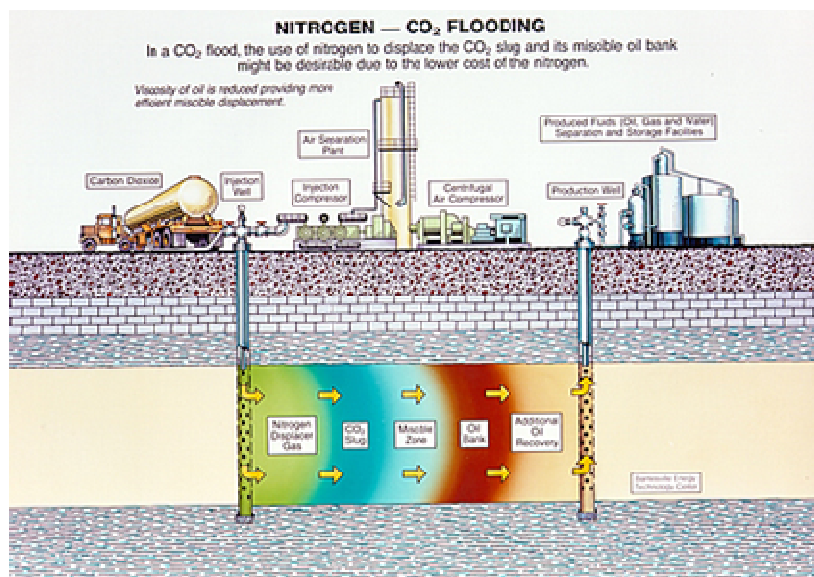
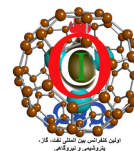
## 2-2-1- گاز احتراق - نیتروژن رومی (Nitrogen / Flue Gas Flooding):

نیتروژن یا گاز احتراق رومی عبارتست از تزریق مقدار زیادی گاز نیتروژن یا گازهای حاصل از سوختن، سوخت‌های مختلف در مخزن که می‌تواند با توجه به فشار و ترکیبات موجود به صورت امتزاج پذیر یا غیر امتزاجی انجام گردد. به دلیل ارزان بودن گازهای مورد نظر تزریق مقادیر زیاد امکان پذیر است. تزریق نیتروژن یا گاز احتراق اغلب در پی تزریق گاز کربنیک یا هیدروکربن‌های امتزاج پذیر صورت می‌گیرد.

مکانیزم بهبود ضریب بازیافت: چنانچه فشار به اندازه کافی زیاد باشد، مقداری از ترکیبات سبک نفت خام که تبخیر گردیده‌اند باعث ایجاد رانش امتزاجی می‌گردند. گاز رومی توسط گازهای ارزان قیمتی صورت می‌گیرد که می‌توانند قسمت زیادی از حجم مخزن را اشغال نمایند.

## 2-2-2- گاز کربنیک رومی (Carbon Dioxide Flooding):

دی اکسیدکربن بطور طبیعی در بعضی مخازن به صورت همراه با گاز طبیعی یا به طور تقریباً خالص ممکن است موجود باشد. دی اکسیدکربن را می‌توان از کارخانه‌های تولید محصولات شیمیایی یا جداسازی از گازهای حاصل از احتراق نیروگاهها بدست آورد. وقتی فشار مخزن طی برداشتهای اولیه و آب رومی کاهش می‌یابد، قبل از آغاز تزریق دی اکسیدکربن به مخزن باید این فشار به حالت اولیه بر گردد که برای این کار آب از طریق چاههای تزریق به درون مخزن پمپ می‌شود تا فشار به حد قابل قبولی برسد، در این هنگام دی اکسیدکربن از طریق همان چاههای تزریق به درون مخزن وارد می‌شود.



شکل 2- شمانیک تزریق دی اکسید کربن در مخزن

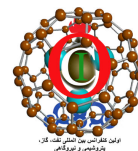
در ابتدا حتی دی اکسید کربن با نفت امتزاج نمی یابد ولی با افزایش فشار تزریق، عمل امتزاج با مولکولهای کوچک هیدروکربنهای سبک بطور آهسته صورت می گیرد و موجب تشکیل یک جبهه امتزاجی می شود. این جبهه امتزاجی ذاتاً یک توده گاز غنی است که حاوی دی اکسید کربن و هیدروکربنهای سبک می باشد. در شرایط مناسب دما و فشار، این جبهه قابلیت انحلال در نفت را دارد که باعث تسهیل حرکت نفت به سمت چاههای تولیدی می شود. این توده اولیه دی اکسید کربن اغلب به وسیله تزریق متناوب آب و دی اکسید کربن دنبال می شود. بکار بردن آب برای افزایش ضریب رانش و کاهش میزان دی اکسید کربن مصرفی است. تولید از توده نفتی، که در جلوی جبهه امتزاجی تجمع می یابد، صورت می گیرد. در حین برداشت سیالات مخزن از چاههای تولیدی دی اکسید کربن به شکل گازی خود بر می گردد و باعث انجام عمل مشابه گازرانی (gas lift) با گاز طبیعی مخزن می گردد. در سطح زمین دی اکسید کربن را می توان از سایر سیالات استخراج شده جدا کرده و دوباره در چاه تزریق نمود که به کاهش مصرف دی اکسید کربن کمک کرده و یک سیکل بازیافتی دی اکسید کربن ایجاد می کند. این مراحل می تواند بطور مکرر اجرا شود تا زمانی که دیگر استخراج مقرون به صرفه نباشد. [4]

### 2-2-3- نیتروژن رویی (Nitrogen Flooding):

نیتروژن رویی در صورتی می تواند به عنوان روش بازیافت نفت برای یک مخزن انتخاب شود که شرایط زیر در مخزن مورد نظر موجود باشد:

- 1- نفت مخزن باید غنی از اتان تا هگزان (C2-C6) یا هیدروکربنهای سبک باشد. این ترکیبات نمایانگر نفت سبک با درجه API بالاتر از 35 می باشد.
- 2- ضریب حجمی نفت باید بالا باشد که قابلیت جذب گاز اضافه را تحت شرایط مخزن داشته باشد.
- 3- نفت باید در شرایط زیر اشباع و یا میزان کم متان (C1) باشد.
- 4- مخزن باید دارای عمق حداقل 5000 فوت باشد توانایی تحمل فشار تزریق بالا (بالاتر از 5000 PSI) برای امتزاج کامل نیتروژن با نفت را بدون شکسته شدن سازند داشته باشد.

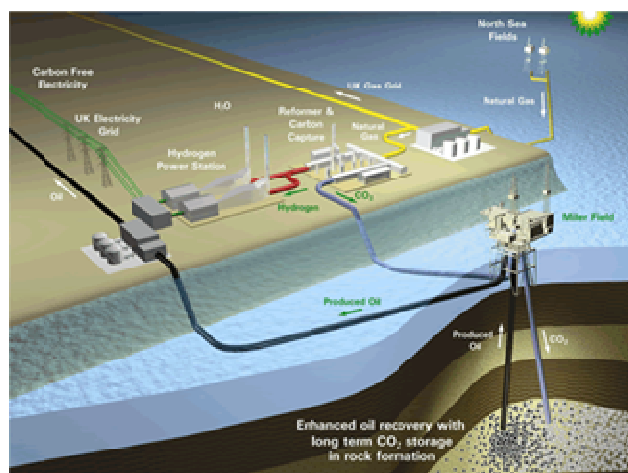
استفاده از نیتروژن گازی شکل (N<sub>2</sub>) برای مخازنی با این مشخصات به این دلیل مطلوب است که نیتروژن با هزینه ای کمتر از دیگر گزینه های ممکن قابل دسترسی است. نیتروژن را می توان به وسیله جداسازهای سرمایشی از هوا بدست آورد و هوا هم



یک منبع نامحدود است ضمن آنکه نیتروژن یک گاز خنثی است و باعث خوردگی نمی‌شود. معمولاً وقتی نیتروژن در مخزن تزریق می‌شود با تبخیر برخی ترکیبات سبکتر نفتی باعث تشکیل یک جبهه امتزاجی می‌شود. این جبهه گاز که تا حدودی از ترکیبات سبک غنی است، به حرکت خود درون سازند ادامه داده و با مقدار بیشتری نفت برخورد کرده و باعث تبخیر ترکیبات بیشتری می‌شود و خود را غنی‌تر می‌کند. همینطور که این حرکت ادامه می‌یابد، لبه پیشرونده این جبهه گازی چنان غنی می‌شود که به حالت محلول یا امتزاجی در نفت مخزن وارد می‌شود. در این موقع فصل مشترک بین گاز و نفت از بین رفته و سیالات با هم مخلوط می‌شوند. ادامه تزریق نیتروژن باعث هل دادن جبهه امتزاجی (که به طور مداوم در حال نوسازی خود است) درون مخزن و جابجایی توده نفت به سمت چاههای تولیدی می‌شود. توده‌های آب نیز بطور متناوب بجای نیتروژن تزریق می‌شوند تا باعث بهبود ضریب رانش و بازیافت نفت شوند. در سطح زمین سیالات بدست آمده از مخزن جداسازی میشوند که در آنها نه تنها نفت بلکه سیالات گازی و نیتروژن تزریق شده نیز وجود دارند.

### 4-2-2- نیتروژن - گاز کربنیک روبی (Nitrogen- CO2 Flooding):

تزریق نیتروژن و دی اکسیدکربن در واقع اصلاح روش رانش با دی اکسیدکربن برای کاهش هزینه‌های استفاده از دی اکسیدکربن است که بایستی با خط لوله یا تانکر به محل آورده شود و طبیعتاً هزینه آن نیز زیاد خواهد بود. زیرا نیتروژن می‌تواند در محل و با هزینه بسیار کمتر تولید شود که در نتیجه به عنوان یک گزینه جذاب مورد توجه می‌باشد. نیتروژن را می‌توان توسط یک جداسازی سرمایشی از هوا، که منبعی نامحدود است، جدا کرد. همچنین  $N_2$  گازی خنثی و غیر خورنده است. در هنگام استفاده از این روش نیتروژن برای راندن توده دی اکسید کربن و نفت همراه آن به درون مخزن تزریق می‌شود. [5]

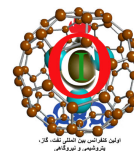


شکل 3- فرایند تزریق دی اکسید کربن

### 3- آزمایشهای اثبات کننده برتری تزریق گاز نسبت به سایر روشها :

#### 3-1- آزمایش دوموره (DUMORE)

دوموره از چندین ستون ماسه فشرده یکدست به ارتفاع 1/5 فوت - که با آب و نفت اشباع شده بود - استفاده کرد. بدین ترتیب هر یک از ستونها حاوی حدود 14 درصد آب و 86 درصد نفت بطور یکنواخت بودند ، سپس این ستونها را در ظرفی عمودی و تحت شرایط فشار اتمسفر قرار داد و در زمانهای مختلف قطعات 5 سانتیمتری از آن را آزمایش کرد. نتایج نشان داد که میزان نفت اشباع شده باقیمانده در آن قطعات پس از حدود 300 ساعت تقریباً به صفر تنزل می یابد. دوموره مطالعات خود را با استفاده از دو نوع نفت که یکی از آنها آب - پخش ( SPREADING )



( و دیگری غیر آب - پخش ( Non - spreading ) بود انجام داد. همچنین میزان نفت اشباع باقیمانده در حالت دوم حدود 10 درصد بالاتر از حالت اول در همان زمان بود. [7]

### 3-2- آزمایشهای تخلیه نفت با روش گرانروی توسط انستیتو نفت فرانسه :

این آزمایشها مشابه وضعیت مخزن آغاچاری طراحی شد و سه آزمایش تخلیه نفت با روش گرانروی تحت دو فشار مختلف را شامل می شد. هدف اصلی این آزمایش بررسی اختلاف افزایش ضریب بازیافت نفت بر اثر تغییر فشار از 1000 psi به فشار اولیه مخزن ، یعنی 3600 psi بود. سنگ مورد استفاده در این آزمایشها دارای نفوذپذیری 110 میلی داری و اشباعیت آب حدود 15 درصد بود. همچنین از نفت و گاز مخزن آغاچاری در نقطه اشباع 1000 psi و فشار 3600 psi و دمای 159 درجه فارنهایت استفاده شد. ضریب بازیافت حاصل از آزمایش فوق بترتیب 50 درصد و 62/5 درصد برای فشارهای 1000 psi و 3600psi بود. هدف اصلی این اندازه گیریها بررسی اختلاف افزایش ضریب بازیافت نفت بر اثر تغییر فشار از 1000 psi به فشار اولیه مخزن ، یعنی 3600 psi بود. این آزمایشها نشان داد که میزان نفت اشباع شده باقیمانده معال 33/4 تا 34/2 درصد بترتیب برای فشارهای 1000psi و 3600 psi بوده است.

### 3-3- آزمایش سروش و سعیدی :

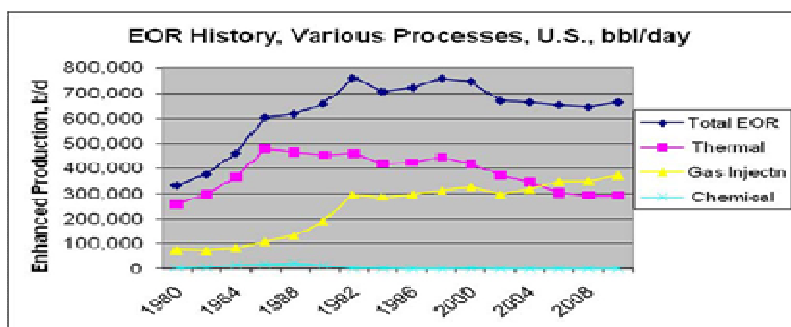
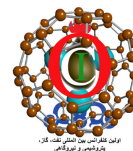
در این کار آزمایشگاهی از سنگ مخزن واقعی یکی از مخازن سنگ آهکی کشور با نفوذپذیری پائین ( حدود یک میلی داسی ) و مایعات واقعی درون آنها استفاده شد. این مطالعات آزمایشگاهی در وضعیت فشار مخزن 4200 psi ، دمای 159 درجه فارنهایت و فشار سربار ( over - burden pressure ) 6000 psi انجام شد و گاز متعادل ( equilibrium ) با سرعتهای متفاوت در نمونه تزریق شد. زمانی که سرعت تزریق از 8 cc در ساعت به حدود 1 cc در ساعت کاهش پیدا کرد درصد بازیافت نفت نیز از حدود 60 درصد به 75 درصد رسید. این اختلاف ضریب بازیافت نفت ، دستاوردهای آزمایشهای قبل را تأیید می کند. [6]

### 3-4- آزمایشهای فشار موئینگی توسط انستیتو نفت فرانسه :

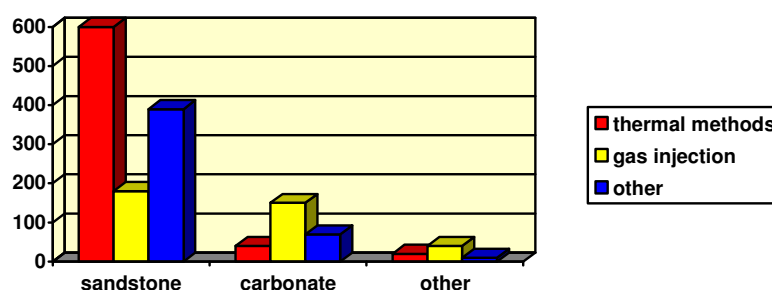
انستیتو نفت فرانسه این آزمایش را جهت نشان دادن موثر بودن جابجائی نفت بوسیله گاز نسبت به جابجائی نفت بوسیله آب انجام داد. در این آزمایشها چند نمونه سنگ مخزن متفاوت با نفوذپذیریهای مختلف انتخاب گردید و میزان نفت اشباع شده باقیمانده در هر یک از نمونه ها با روش صفحه متخلخل ( porous plate ) اندازه گیری شد. روشهای کاربردی با استفاده از هوا - نفت ، هوا - آب ، نفت - آب و بالاخره جیوه - هوا در معدودی از نمونه ها مورد آزمایش قرار گرفت . این آزمایشها به روشنی نشان داد که آب باقیمانده در سیستم گاز - آب در حدود نصف آن در سیستم آب - نفت است. همچنین نفت باقیمانده در سیستم گاز - نفت به نسبت قابل ملاحظه ای پائین تر از نفت باقیمانده در سیستم آب - نفت است .

در بررسی و عملکرد مخازن نفتی هفتکل ، میدان نفتی فهود (عمان ) ، میدان نفتی انتظار (لیبی ) و میدان نفتی هندیل ( اندونزی ) به این نتیجه رسیدیم که با تزریق گاز بخش قابل ملاحظه ای از نفت اشباع باقیمانده در سنگ مخزن را که آب نتوانسته است آن را جابجا کند می توان تولید کرد. [8]

در این نمودار روشهای ازدیاد برداشت از لحاظ نتایج بدست آمده و موفقیت پروژه های بکارگیری شده در آمریکا در سالهای 1980 تا 2011 ارائه شده است و مشاهده میشود که روشهای تزریق گاز از همه روشها بازدهی بیشتری داشته و در نتیجه کاربرد بیشتری نیز پیدا کرده است. [9]



شکل 4- مقایسه روشهای ازدیاد برداشت بر اساس کارایی

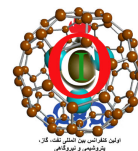


شکل 5- روشهای ازدیاد برداشت بر اساس لیتولوژی در 1500 پروژه انجام شده

#### 4- معیار اعمال تزریق دی اکسیدکربن

هر مخزن نفتی سیاهه و لیست طولیلی از مشخصات (Characteristics) دارد و مجموعه این مشخصه ها شخصیت مخزن و چگونگی رفتار آن را در قبال روش های متنوع و مسلم انگیزش (Stimulation) بیان میدارد. در این مکتوب، هر مشخصه به تنهایی نمیتواند یک عامل تعیین کننده باشد. بنابراین، عدد تعیین شده برای یک مشخصه نباید یک مرز صلب در نظر گرفته شود، اما می تواند تنها یک نماینده و نشان از درجه اهمیت باشد. به عنوان مثال، نفت با درجه کمتر از ۲۵ API معمولاً برای ازدیاد برداشت از روش تزریق دی اکسیدکربن مطلوب نمیباشد. معیارهای زیر باید ملاحظه شده و از چشم انداز مناسب مورد نظر قرار گیرد:

اشباع نفت باقیمانده از اهمیت بنیادی برخوردار است. اگر میدان سیلابزنی شده باشد، اشباع نفت باقیمانده ممکن است هم از نقطه نظر تکنولوژی و هم از نقطه نظر اقتصادی، موفقیتی دربر نداشته باشد. اشباع در محدوده ۲۵-۳۰ درصد اغلب به عنوان میزان حداقل اشباع در نظر گرفته می شود. کلاهک گازی بزرگ معمولاً عامل نامطلوبی است. اگر فشار مخزن به طور قابل ملاحظه ای کمتر از فشار امتزاج پذیری باشد، حجم زیادی از دی اکسیدکربن برای دستیابی به امتزاج مورد نیاز خواهد بود. دانسیته دی اکسیدکربن ممکن است از گاز مخزن بیشتر باشد بنابراین در این صورت قابلیت مخلوط شدن و تماس با سیال مخزن افزایش خواهد یافت. یک مخزن بسیار شکافدار (Highly Fractured Reservoir) به دلیل آنکه شکاف ها مانند مجرا از محل تزریق به چاه تولیدی عمل می کنند معمولاً نامطلوب در نظر گرفته می شود. یک منبع قابل اطمینان و کافی دی اکسیدکربن با هزینه معقول از ابتدایی ترین نیازها می باشند. علاقه شدید اخیر به نیتروژن و دود (Flue Gas) به عنوان روش های تزریق گاز جایگزین، به دلیل عدم وجود منابع دی اکسیدکربن در نزدیک بسیاری از میداین دنیا بسیار سریع فراگیر شده است. نفوذپذیری افقی سنگ مخزن یک عامل بحرانی در نظر گرفته نمی شود، اما نسبت به نفوذپذیری عمودی به افقی فاکتور بسیار مهم و بحرانی است. یک مطالعه شبیه سازی مخزن بر روی یک نمونه ماسه سنگ سیلابزنی شده، به این



نتیجه انجامید که نسبت  $kh/kv$  مهمترین پارامتر مخزن در فرآیند تزریق دی اکسیدکربن می باشد، به دلیل آنکه این پارامتر، میزان تفکیک دی اکسیدکربن را کنترل می کند. نواحی نفوذپذیر نسبتاً کم ضخامت در مخزن (۱۵-۲۵ ft) دارای مزایای تکنیکی هستند زیرا آنها تمایل برتری نیروی گرانشی را کمتر می کنند، اما نواحی ضخیم تر مزیت حجم نفت دارند. به دلیل آنکه حداقل فشار امتزاج معمولاً بالای  $1200 \text{ PSI}$  می باشد حداقل عمق موردنیاز به منظور عدم تجاوز از مقدار گرادیان شکاف می بایست عمقی بیش از  $2500 \text{ ft}$  باشد. دما هم عموماً فاکتور مهمی به حساب نمی رود. سولفید ئیدروژن فشار امتزاج را پایین می آورد، اما به دلیل خوردگی، خطرات زیست محیطی، بهداشتی و بوی نامطلوب به دنبال دارد. تجربیات میدانی با تزریق دی اکسیدکربن را با توجه به این مطلب که تزریق جهت برداشت بیش از پیش نفت صورت می گیرد، در محدوده ملاحظاتی زیر می توان خلاصه نمود:

- (1) در ماسه سنگ (Sandstone)، سنگ آهک (Limestone)، دولومیت و چرت (chert)
- (2) تا اعماق  $10800 \text{ ft}$  بدون هیچ محدودیت عمقی.
- (3) در دماهای ته چاه (Bottom- Hole) تا  $248 \text{ F}$  و بدون محدودیت.
- (4) در سازندهایی که ضخامت آنها از  $8-600 \text{ ft}$  متغیر می باشد با ملاحظه تغییرات در ناهمگونی.
- (5) در جاهایی که گراویتی نفت خام  $16-45 \text{ API}$  می باشد.
- (6) در جایی که نفت خام امتزاج ناپذیر جابه جا شده باشد.
- (7) در جایی که ویسکوزیته نفت خام در  $15/0-188 \text{ CP}$  متغیر باشد.
- (8) در مخازن با اشباع نفت در محدوده  $28-54\%$ .
- (9) با فاصله حداکثر تا  $51 \text{ Acres}$  برای هر چاه.
- (10) زمانی که مخلوط تزریق شده حداکثر شامل  $29$  درصد سولفید ئیدروژن باشد

### 4-1- رفتار فازی و امتزاج پذیری

دی اکسیدکربن در تمام سه شکل و حالت خود، گاز، مایع و جامد ماده آشنایی است. به عنوان گاز، زمانی که فشار از فشار اشباع پایین تر می رود، مهیا می سازد. دمای بحرانی  $31 \text{ C}$  می باشد. پایین تر از این دما، دی اکسیدکربن خالص می تواند در محدوده وسیعی از فشار گاز یا مایع باشد، اما بالاتر از این دما، صرف نظر از فشار اعمالی، گاز خواهد بود. فشار متناظر با دمای بحرانی (فشار بحرانی  $99 \text{ atm}$  /  $73$ ) می باشد. بالاتر از فشار و دمای بحرانی، دی اکسیدکربن قابل تبدیل به مایع نمی باشد. اما در فشار بالاتر، فشار فوق بحرانی، بخار با افزایش فشار چگال تر شده و بیشتر شبیه مایع رفتار می کند. اکثر خطوط لوله دی اکسیدکربن در نواحی فوق بحرانی کار می کنند. یکی از خواص دی اکسیدکربن که آن را به عنوان یک عامل مفید و مستعد جهت ازدیاد برداشت ارائه کرده است، افزایش در حجم نفت خام به هنگام اشباع توسط دی اکسیدکربن می باشد. آزمایشات میدانی بسیاری در گذشته نشان داده است که این توده امتزاجی نفت می تواند توسط سیستم گازران یا آبران راحت تر جابه جا شود. عوامل مهم به منظور تعیین اینکه آیا دی اکسیدکربن و نفت امتزاج پذیر هستند یا خیر به قرار زیر می باشد:

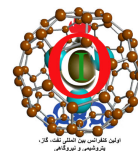
درجه خلوص دی اکسیدکربن، خواص مخزن نفتی، دما، فشار، درجه اختلاط سیالات

### 4-2- مکانیسم های جابه جایی

قدم اساسی در یک پروژه تزریق دی اکسیدکربن موفق، رسیدن به یک ناحیه ای است که دی اکسیدکربن و نفت مخزن، مخلوط شده و تشکیل یک سیال جدید که بسیار راحت تر از نفت اولیه مخزن جابه جا می گردد، می باشد. حداقل  $4$  روش تزریق آب و دی اکسیدکربن برای مکانیسم های جابه جایی پیشنهاد گردیده است.

- (1) تزریق مداوم و پیوسته دی اکسیدکربن در تمام طول عمر پروژه





- (۲) تزریق حجم (توده های) دی اکسیدکربن همراه با آب  
 (۳) تزریق حجم (توده های) متوالی دی اکسیدکربن و آب  
 (۴) تزریق همزمان دی اکسیدکربن و آب

تجربیات کافی میدانی برای ارزیابی چنین پروسه هایی در دست نیست، اما نتایج حاصل از این چهار مورد را به تنهایی مقایسه میکنیم. مطالعه منجر به نتایج زیر شده است:

(۱) تزریق همزمان آب و دی اکسیدکربن ثابت شده است که بهترین پروسه از چهار پروسه برداشت نفت بوده و تقریباً ۵۰ درصد پتانسیل نفت موجود را قابل استحصال می سازد. تزریق متوالی توده های دی اکسیدکربن و آب بعد از روش فوق الذکر، بهترین روش بوده است. تزریق مستقیم دی اکسیدکربن و همچنین حجم (توده های) دی اکسیدکربن همراه با آب هر دو روش های ضعیفی بوده و تنها ۲۵ درصد پتانسیل نفتی را قابل استحصال می سازد.

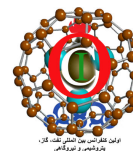
(۲) در تمام موارد، تفکیک گرانشی بین دی اکسیدکربن و آب قبل از اینکه مخلوط این دو سیال حتی نیمی از سنگ مخزن را جاروب کرده باشد، به طور کامل صورت گرفته است. موفقیت برداشت با هر یک از پروسه های دی اکسیدکربن، تابعی از میزان و نرخ تفکیک گرانشی دی اکسیدکربن بوده است.

کاربرد جالب تزریق مداوم دی اکسیدکربن، فرآیند پایدار گرانشی است. این فرآیند برای بسترهای بسیار پرشیب، که جابه جایی به سمت پایین می باشد، قابل اعمال است، دی اکسیدکربن یک کلاهک گازی در حال انبساط تشکیل می گردد که نفت را به پایین و به سمت چاه های تولیدی سرازیر می کند. جابه جایی به سمت پایین دی اکسیدکربن به منظور بهره گیری از نیروهای گرانشی جهت ثبات جابه جایی و افزایش جاروب دی اکسیدکربن مطرح شده است. انتظار می رود این فرآیند حتی زمانی که امتزاج حاصل نشده باشد، موفقیت آمیز باشد. حجم دی اکسیدکربن مورد نیاز جهت سریع ترین جریان، با استفاده از تجربیات گذشته پروژه های تخمین زده شده بود. این جریان های اولیه، جابه جایی غیرامتزاجی و یا سیلابزنی کربناته بودند، بنابراین تجربیات قبلی برای پروژه های جابه جایی امتزاجی آبی بسیار کم استفاده بودند.

### 5- نتایج :

در این قسمت مقایسه ای از نظر خصوصیات مخزن در روشهای ازدیاد برداشت و نحوه اثرگذاری هر یک در قالب جدول ارائه شده است. اکثر پارامترهای مورد نیاز با توجه به پروژه های موفق که در آمریکای شمالی انجام شده است انتخاب گردیده و نزدیکی بسیاری با پارامترهای این پروژهها دارند. لازم به ذکر است که دادهها تجاری نبوده و نزدیکی زیادی با محدودیت های عملی موجود دارند

بخارروبی	نیتروزن رویی	تزریق هیدروکربنها	گاز کربنیک رویی	پلیمر رویی	پلیمر - سورفکتانت رویی	آبرویی	روش ها خصوصیات
%API 35<	%API 35 <	%API27 <	%API27 <	%API18<	%API 25 <	%API 25 <	چگالی
cp 20<	cp10 <	cp10 <	cp10 <	cp20<	cp20<	cp30<	گرانروی
غیر بحرانی	C1 - C7	C2 - C7	C5 - C20	غیر بحرانی	سبک یا متوسط	غیر بحرانی	ترکیب
غیر بحرانی	غیر بحرانی	F 250 <	F 250 <	F 225 <	F 225 <	غیر بحرانی	دما
PV %50-40<	pv%30 <	pv%30 <	pv%30 <	%10 <	%20 <	%10 <	درجه اشباع
سنگ ماسه	ماسه سنگ / کربناته	ماسه سنگ / کربناته	ماسه سنگ / کربناته	ماسه سنگ / کربناته	ماسه سنگ	ماسه سنگ / کربناته	نوع سازند
feet 20>	نسبتاً" باریک	نسبتاً" باریک	نسبتاً" باریک	غیر بحرانی	ft 10 >	غیر بحرانی	ضخامت
md 200 <	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	md 20 <	md 20 <	غیر بحرانی	میانگین تراوایی



قابلیت انتقال	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	عمق
md ft / cp 100<	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	غیر بحرانی	feet 5,000-200 <
	ft 4500 <	ft 5000-2000 <	ft 2300 <	ft 9000 <	ft8000<	غیر بحرانی	

- 1-5- در جابجائی نفت با مکانیسم ریزش ثقلی ، گاز خشک در مقایسه با گازهای غنی شده و متعادل ، به علت وزن کمتری که دارد به جابجائی نفت کمک بیشتری می کند. اما اثر انبساطی آن کمتر از گازهای غنی شده و متعادل است.
- 2-5- از گازهای هیدروکربوری نمیتوان به مقدار زیاد استفاده کرد ( به علت مصارف بالا در بخشهای خانگی ، صنعتی و نیروگاههای حرارتی ) . به همین دلیل باید از گازهای غیر هیدروکربوری نظیر ازت خالص و ناخالص ، هوا و گازکربنیک جهت تزریق استفاده نمود.
- 3-5- در صورتی که ترکیبی از گاز ازت با نفت مخزن ، باعث رسوب آسفالتین شود تزریق گاز ازت بسیار خطرناک است.
- 4-5- فرایند بازیافت نفت از طریق تزریق گازهای امتزاجی بسیار گران بوده و مقرون بصرفه نیست.
- 5-5- در صورتیکه گازهای هیدروکربوری به میزان کافی و لازم در دسترس نباشد، میتوان نخست در خصوص استفاده از گازهای غیرهیدروکربوری ناخالص و سپس در مورد استفاده از هوا ، گاز ازت و گازکربنیک جهت تزریق اندیشید.
- 6-5- آبهای عموم مخازن ایران دارای نمک اشباع شده هستند و این خاصیت کاربری حلالهای افزودنی به آنها را جهت تزریق از بین میبرد. همچنین بعلت پائین بودن درصد تخلخل مخازن ایران مواد افزودنی ، جذب سنگ مخزن شده و کارایی آب کاهش می یابد و به دلیل گران بودن مواد افزودنی عملیات تزریق آب در مخازن نفتی ایران غیراقتصادی است.
- 7-5- تزریق گاز به مخازنی که آب حجم زیادی از آن را فراگرفته است باعث می شود که آب و نفت به پائین رانده شده و گاز جانشین نفت و آب شود. فرایند جابجایی نفت با گاز نشان می دهد که بدون هیچ تردیدی گاز جانشین بهتری برای آب است و استفاده از آن به بازیافت بیشتر نفت کمک خواهد کرد

مراجع:

- [1] عادل زاده. محمدرضا، اصول مهندسی حفاری، انتشارات ستایش، 81-96، 1378
- [2] Frank J., Mark C., Mark G.; 8- "Hydrocarbon Exploration and Production"; Developments In .Petroleum Science, Elsevier Science, 2003
- [3] Chen, S. M., Smith, R. B., Arifi, N. A., and Reda, A. M., "Intisar 'D' a Successful Major Enhanced Oil Recovery Project in Libya", paper 90-01-19, presented at the first Technical .Symposium on Enhanced Oil Recovery in Libya, Tripoli, p. 28
- [4] Clara, C., Durandean M., Quenault, M., and Nguyen, T.H., "Laboratory Studies for Light Oil Air Injection: Potential Application in Handil Field"
- [5] Rosales, A.C., Molina M.A. and Saidi, A.M" ,.Abkatun's Gas Injection Reservoir Management under Double Displacement Process", SPE paper 74 374 ,presented at SPE meeting held in Villahermosa ,Mexico, Feb. 10-12, 2002.
- [6] Soroush, H. and Saidi A.M., "Vertical Gas-Oil Displacements in Low Permeability Long Core at Different Rates and Pressure below MMP", SPE paper 53221, presented at MEOS in Bahrain, 20-23 February.

اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی  
مرکز همایش های بین المللی هتل المپیک تهران



- [7] Dumore, J.M. and Schols, R.S., "Drainage Capillary-Pressure Functions and the Influence of connate Water", SPEJ, Oct. 1974, p. 437.
- [8] O'Neill, N., "Fahud Field Review, A Switch From Water to Gas Injection in Fahud Field (Oman)", SPE Paper 15 691 presented at Fifth SPE in the Middle East held in Bahrain, March 7-10, 1987.
- [9] Vladimir Alvarado and Eduardo Manrique, "Enhanced Oil Recovery: An Update Review" energo/ISSN 1996-1073. August 2010