







دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی شیمی

## پیش‌بینی پارامترهای موثر در فرآیند VAPEX

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

مرتضی ثابتی

استاد راهنما

دکتر محمدرضا احسانی



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی آقای مرتضی ثابتی  
تحت عنوان:

### پیش‌بینی پارامترهای موثر در فرآیند VAPEX

در تاریخ ۹۲/۳/۱۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر محمدرضا احسانی

۲- استاد مشاور پایان‌نامه دکتر محمد نیکوکار

۳- استاد داور دکتر ارجمند مهربانی

۴- استاد داور دکتر طیبه بهزاد

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر حمید زیلویی

## تشکر و قدردانی

سپاس خداوند رحمان را که توفیق عنایت فرمود تا تحقیق حاضر که توأم با رنج و مشقت‌های فراوان بود، به سرانجام رسد. تحقیق حاضر حاصل رهنمودها و همکاری‌های فراوان افراد زیادی است که در مراحل مختلف این تحقیق، مرا یاری نموده‌اند. در این جا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات روز افزون استاد راهنمای این رساله، جناب آقای دکتر احسانی و همچنین از زحمات ارزنده استاد مشاور آقای دکتر نیکوکار نهایت سپاس و قدردانی را داشته باشم.

مراحل مختلف مدلسازی این تحقیق با حمایت‌های افراد زیادی صورت پذیرفت که در این جا به رسم ادب لازم است از زحمات خانم مهندس صحرانورد که در زمان اجرای پروژه، مسئولیت هماهنگی دانشجویان را بر عهده داشتند، سپاسگذاری نمایم. همچنین از کوشش‌های بی دریغ دوستان گرانمایه دانشگاه صنعت نفت که در طی مراحل انجام پایان‌نامه با جدیت تمام بنده را یاری نمودند، قدردانی می‌نمایم.

در پایان از زحمات پدر و مادر فداکارم، که توفیق نداشتم آن‌چنان که باید وظیفه خود را، به دلیل انجام تحقیق، ایفا نمایم، صمیمانه قدردانی نموده و دوییتی زیر را بدرقه راهشان می‌نمایم:

مادر، قسم به آن همه شب زنده داریت	که اندر سرم هوای تو هست و صفای تو
آیینه دار مهر و عطوفت تویی، تویی	خواهم که سر نهم به خدا من به پای تو

کلیدی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی  
اصفهان است.

تقدیم به "مادر و پدر"  
آنان که آفریننده‌ی واژه‌ی عشق و محبت  
برای من هستند

## فهرست مطالب

هشت	فهرست مطالب
ده	فهرست اشکال
دوازده	فهرست جداول
۱	چکیده
۲	فصل اول: پیشینه تحقیق
۳	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ دسته بندی روش های ازدیاد برداشت
۵	۱-۲-۱ روش های شیمیایی
۵	۲-۲-۱ روش های حرارتی
۸	۳-۱ روش های غیر حرارتی
۸	۴-۱ گستره ی فرآیند VAPEX
۱۳	فصل دوم: مطالعات کتابخانه ای
۱۴	۱-۲ مهم ترین مکانیزم های موثر در VAPEX
۱۴	۱-۱-۲ گرانروی نفت سنگین یا بیتومن
۱۵	۲-۱-۲ نفوذ مولکولی و پراکنندگی فیزیکی
۱۷	۲-۲ بررسی علمی-آزمایشگاهی فرآیند VAPEX
۱۸	۱-۲-۲ نرخ تولید در فرآیند VAPEX
۱۸	۲-۲-۲ رسوب آسفالتین
۲۰	۳-۲-۲ تاثیر دما بر فرآیند VAPEX
۲۱	۴-۲-۲ تاثیر فشار روی VAPEX
۲۱	۵-۲-۲ تاثیر فشار موینگی روی VAPEX
۲۱	۶-۲-۲ تاثیر گرانروی نفت بر تولید نفت در VAPEX
۲۲	۷-۲-۲ تاثیر نرخ تزریق حلال در VAPEX
۲۳	۸-۲-۲ تاثیر محل قرارگیری چاه در مخزن روی فرآیند VAPEX
۲۴	۹-۲-۲ تاثیر آبده و آب ذاتی در VAPEX



۲۵	۱۰-۲-۲ تاثیر تراوایی مدل در فرآیند VAPEX
۲۶	۱۱-۲-۲ تاثیر نوع حلال در VAPEX
۲۶	۱۲-۲-۲ تاثیر کلاهک گازی در VAPEX
۲۶	۳-۲ مدلسازی VAPEX
۲۹	۴-۲ نفوذ مولکولی
۳۱	۵-۲ مقدار حلال مورد نیاز
۳۲	۶-۲ افزایش مقیاس
۳۶	فصل سوم: مدلسازی عددی فرآیند VAPEX
۳۶	۱-۳ مدلسازی VAPEX با روش Conventional
۳۷	۱-۱-۳ روابط حاکم در مدلسازی
۴۵	۲-۱-۳ روند محاسبات
۴۶	۲-۳ مدلسازی VAPEX با روش Compositional
۴۶	۱-۲-۳ روابط حاکم در مدلسازی
۴۹	۲-۲-۳ تفاضل محدود معادلات
۵۵	فصل چهارم: بحث و بررسی نتایج
۵۵	۱-۴ ارزیابی مدل ریاضی Conventional
۵۸	۱-۱-۴ شبیه‌سازی در روی نفت سنگین کوه موند ایران
۶۷	۲-۴ ارزیابی مدل ریاضی Compositional
۶۸	۱-۲-۴ شبیه‌سازی VAPEX با مدل عددی روی مخزن کوه موند
۷۷	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷۷	۱-۵ نتیجه‌گیری
۷۸	۲-۵ پیشنهادات
۷۹	مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مراحل تولید از مخزن. .... ۴
- شکل ۲-۱: فرآیند تزریق تناوبی بخار [۲]. .... ۶
- شکل ۳-۱: تزریق بخار همراه با ریزش ثقلی [۴]. .... ۷
- شکل ۴-۱: فرآیند احتراق درجا [۵]. .... ۸
- شکل ۵-۱: دورنمایی از محل قرارگیری چاه‌های تزریق و تولید در فرآیند VAPEX [۷]. .... ۹
- شکل ۶-۱: شماتیکی از فرآیند VAPEX، الف) نمای دو چاه، ب) ارتباط بین دو چاه، ج) رشد کردن محفظه، د) گسترده شدن پهنای محفظه، ه) پایین آمدن محفظه، و) تخلیه مخزن [۸]. .... ۱۱
- شکل ۱-۲: مقایسه‌ی کاهش گرانروی نفت از طریق حلال و گرما [۵۰-۵۱]. .... ۲۲
- شکل ۲-۲: محل قرارگیری چاه‌ها در آزمایش باتلر و جینگ در سال ۲۰۰۰ [۴۰]. .... ۲۳
- شکل ۳-۲: محل قرارگیری چاه‌ها در آزمایش مقدم و همکاران. .... ۲۴
- شکل ۱-۳: نمای کلی از فرآیند VAPEX. .... ۳۷
- شکل ۲-۳: نمایی از محیط فصل مشترک بین نفت، محفظه حلال و نفت رقیق شده. .... ۳۸
- شکل ۳-۳: شماتیکی از حرکت نفت رقیق شده و لایه‌ی مرزی روی یک المان از فصل مشترک به بعد. .... ۴۳
- شکل ۴-۳: نمایی از جریان نفت رقیق شده و مساحت روبش شده (هاشور خورده). .... ۴۴
- شکل ۵-۳: ماتریس ضرایب پنج قطری برای یافتن فشار در هر گره. .... ۵۳
- شکل ۶-۳: نمایی از حل گام به گام فرآیند VAPEX در روش Compositional. .... ۵۴
- شکل ۱-۴: مقایسه‌ی تولید تجمعی حاصل از VAPEX توسط داس و باتلر [۱۶] و این تحقیق با داده‌های آزمایشگاهی مقدم [۵۲]. .... ۵۶
- شکل ۲-۴: محل قرارگیری فصل مشترک و حالت توسعه یابی محفظه‌ی حلال. .... ۵۷
- شکل ۳-۴: نرخ تولید بر حسب  $m^3/s$  نسبت به زمان. .... ۵۸
- شکل ۴-۴: مقایسه‌ی میزان تولید نفت در اثر تزریق دو حلال متفاوت. .... ۶۰
- شکل ۵-۴: تولید تجمعی بر حسب زمان در سه تراوایی متفاوت (شیب‌سازی در ۳ روز). .... ۶۱
- شکل ۶-۴: اثر تغییر تراوایی بر تغییرات نرخ تولید بر حسب زمان. .... ۶۱
- شکل ۷-۴: مقایسه‌ی سرعت عمود بر فصل مشترک در مقادیر متفاوت تراوایی. .... ۶۲
- شکل ۸-۴: مقایسه‌ی ضخامت نفوذ در مقادیر متفاوت تراوایی. .... ۶۲

- شکل ۴-۹: نرخ تولید پایدار در تراوایی‌های متفاوت در مدت زمان ۱۵۰۰۰۰ ثانیه. ۶۳
- شکل ۴-۱۰: تولید تجمعی نفت سنگین در دو گرانروی اولیه متفاوت. ۶۴
- شکل ۴-۱۱: نرخ تولید در دو مخزن با ضخامت متفاوت. ۶۴
- شکل ۴-۱۲: تاثیر ارتفاع در ضخامت نفوذ. ۶۵
- شکل ۴-۱۳: نرخ تولید پایدار در ضخامت‌های متفاوت مخزن. ۶۶
- شکل ۴-۱۴: تولید نفت در میدان کوه موند الف) نرخ تولید ب) تولید تجمعی نفت سنگین. ۶۶
- شکل ۴-۱۵: مقایسه‌ی تولید تجمعی برای داده‌های آزمایشگاهی [۵۲] و مدلسازی عددی. ۶۸
- شکل ۴-۱۶: نمودار فازی برای پروپان (۶۰٪) و متان (۴۰٪). ۶۹
- شکل ۴-۱۷: نرخ تولید و تولید تجمعی برای نفت سنگین کوه موند. ۶۹
- شکل ۴-۱۸: الف) تزریق و تولید تجمعی حلال و تولید نفت، ب) مقدار بازیافت حاصل از فرآیند. ۷۰
- شکل ۴-۱۹: نمایشی از جزء مولی نفت سنگین در یک ساعت پس از تولید. ۷۱
- شکل ۴-۲۰: نمایشی از جزء مولی نفت سنگین در سه ساعت پس از تولید. ۷۱
- شکل ۴-۲۱: نمایشی از جزء مولی نفت سنگین در حدود ۵ ساعت پس از تولید. ۷۱
- شکل ۴-۲۲: تولید نفت سنگین در ضرایب نفوذ و پراکندگی متفاوت. ۷۲
- شکل ۴-۲۳: تاثیر افزایش نرخ تزریق حلال ورودی بر نرخ اولیه‌ی تولید نفت. ۷۳
- شکل ۴-۲۴: نرخ تولید بخار حلال از چاه تولیدی در پنج تزریق متفاوت. ۷۴
- شکل ۴-۲۵: تغییرات برداشت نفت در شرایط تزریق حلال متفاوت. ۷۴
- شکل ۴-۲۶: مقدار جرم حلال تولیدی به نفت تولیدی در پنج نرخ تزریق حلال متفاوت. ۷۵
- شکل ۴-۲۷: تزریق حلال (cc/s) ۰/۰۱۷۸ در ۱۰ دقیقه‌ی اول و (cc/s) ۰/۰۱۷۸ در ادامه‌ی فرآیند و تاثیر آن بر برداشت نفت و SOR. ۷۶

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: رابطه‌های نفوذ در مایع ..... ۱۶
- جدول ۱-۴: داده‌های آزمایشگاهی مقدم [۵۲] در Sand pack ..... ۵۶
- جدول ۲-۴: داده‌های اولیه مربوط به خواص نفت سنگین در مخزن کوه موند ..... ۵۹
- جدول ۳-۴: خلاصه‌ای از داده‌های ورودی نفت مخزن جهت آنالیز حساسیت ..... ۵۹
- جدول ۴-۴: خلاصه‌ای از داده‌های اولیه آزمایش مقدم و همکاران [۵۲] ..... ۶۷

## چکیده

با توجه به خصوصیات مخازن خاورمیانه که اکثر آن‌ها مخازن عمیق کربناته و شکافدار هستند، نیاز به ارائه مدلی است که بتواند نرخ تولید را در چنین مخازنی با شرایط تراوایی و تخلخل کم، و همچنین هدایت گرمایی پایین به خوبی تخمین بزند. به همین دلیل تکنیک‌های برداشت سرد از روش‌های گرمایی در برخی موارد موفق‌تر هستند. یکی از روش‌های بازیافت سرد، روش استخراج بخار هیدروکربنی (VAPEX) است. مهمترین مکانیزم روش VAPEX نفوذ حلال به داخل نفت و در پی آن کاهش گرانشی و ریزش ثقلی می‌باشد. هدف این تحقیق مدل‌سازی نیمه تحلیلی و عددی روش فوق و بررسی پارامترهای موثر در بازدهی فرآیند VAPEX است. روش نیمه تحلیلی بر اساس رشد محفظه‌ی حلال در شرایط ناپایدار و در فشار و دمای ثابت می‌باشد. در اجرای این روش، فصل مشترک نفت-حلال به قسمت‌های مساوی تقسیم شد و نرخ تولید در هر بازه‌ی زمانی محاسبه گشت. روش عددی بر اساس شبیه‌سازی جزئی در فرآیند VAPEX است که بر این اساس نرخ تولید بر حسب ضرایب نفوذ و پراکنندگی متفاوت قابل محاسبه هستند. نتایج دو مدل با نتایج کارهای آزمایشگاهی و مدل‌های دیگر مقایسه شد. پس از آن، مدل توصیف شده برای تخمین نفت تولیدی در یکی از شرایط مخازن نفت سنگین ایران به کار رفت و به منظور بررسی تاثیر پارامترهای متفاوت چندین آنالیز در نوع حلال، تراوایی مخزن، گرانشی اولیه نفت سنگین، ارتفاع مخزن و ضریب نفوذ بر تولید انجام گرفت. در نهایت مشخص شد که میزان نرخ پایدار تولیدی نفت تابعی از ارتفاع بستر با توان ۰/۶۸۴۷ است و همچنین طرح مناسبی برای تزریق حلال پیشنهاد شد به طوری که در ابتدا حلال با نرخ زیاد تزریق گردد و در ادامه نرخ تزریق کاهش یابد تا از مقدار حلال مصرفی کاسته شود و جنبه‌ی اقتصادی فرآیند حفظ گردد.

## کلمات کلیدی:

استخراج با بخار هیدروکربنی، نفت سنگین، مدل‌سازی عددی، شبیه‌سازی مخازن، برداشت نفت، تزریق حلال، نفوذ.

## فصل اول: پیشینه تحقیق

تقاضای روز افزون جهانی برای نفت و فراورده‌های آن و کاهش تولید طبیعی از مخازن نفتی و در نهایت افزایش قیمت نفت در چند سال اخیر، باعث توجه روز افزون به روش‌های تولید از مخازن نفت سنگین و بسیار سنگین شده است.

در نقاط مختلف جهان به خصوص در کشورهای کانادا، آمریکا، ونزوئلا، ایران، مکزیک، روسیه و در بعضی از کشورهای تولید کننده نفت در خاورمیانه منابع عظیمی از نفت‌های سنگین و بسیار سنگین وجود دارد. به عنوان مثال، حجم نفت خام موجود در مخازن نفت سنگین کانادا تقریباً  $\frac{2}{8}$  تریلیون بشکه (۴۴۵ میلیارد متر مکعب) تخمین زده شده است. این مقدار تقریباً برابر با میزان نفت موجود در مخازن معمول جهان است. با این وجود بهره‌برداری از این مخازن نفت سنگین از لحاظ تکنیکی و اقتصادی بسیار دشوارتر و پرهزینه‌تر از استخراج نفت سبک است. در بعضی شرایط، نفت در فشار و دمای مخزن دارای تحرک پذیری<sup>۱</sup> کافی می‌باشد. در این شرایط با استفاده از روش تولید اولیه<sup>۲</sup> می‌توان نفت را استخراج نمود. در اغلب اوقات ویسکوزیته‌ی نفت سنگین در شرایط مخزن بسیار بالا است و این موجب عدم تحرک نفت می‌شود. بنابراین باید از نیروی پیشرانی استفاده نمود، تا نفت را از مخزن به بیرون هدایت کند. یکی از این روش‌ها، تزریق حل‌شونده به مخزن است که در این تحقیق به طور مفصل به بررسی اثرات آن بر تولید نفت پرداخته می‌شود. در این روش حلال با فشار و دمای مخزن به داخل مخزن تزریق می‌شود تا ویسکوزیته‌ی نفت در اثر انحلال کاهش یابد و نفت تحرک پذیر شود.

---

<sup>1</sup> Mobility

<sup>2</sup> Primary production

در این تحقیق، فرآیند تزریق حلال جهت ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین به دو روش مدل‌سازی ریاضی شده است. روش اول با استفاده از المان‌گیری روی لایه‌ی مرزی نفت و حلال صورت می‌گیرد، که با عنوان روش مرسوم<sup>۱</sup> شناخته شده است و روش دوم مدل‌سازی مخزن با روش شبیه‌سازی جزئی<sup>۲</sup> انجام گرفته است. در ادامه‌ی این فصل، خلاصه‌ای از روش‌های ازدیاد برداشت نفت از مخازن ذکر شده است، همچنین فرآیند تزریق حلال و اثرات آن بر برداشت نفت شرح داده شده است.

در فصل دوم، خلاصه‌ای از مقالات منتشر شده و پژوهش‌های صورت گرفته بر روی روش‌های عددی ازدیاد برداشت، تاثیر پارامترهای موثر بر جریان سیال و مکانیزم نفوذ حلال در نفت سنگین بیان می‌شود. در فصل سوم، مدل‌سازی ریاضی از طریق روش Conventional و Compositional به صورت مشروح ارائه می‌شود.

در فصل چهارم، پس از ارزیابی مدل، تاثیر پارامترهای متفاوت در ازدیاد برداشت مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل پنجم، نتیجه‌گیری نهایی حاصل گردیده و برای ارتقای مدل پیشنهاداتی ارائه می‌شود.

## ۱-۱ مقدمه

به طور کلی عملیات برداشت از مخزن به ترتیب زمانی به سه مرحله‌ی اولیه<sup>۳</sup>، ثانویه<sup>۴</sup> و ثالثیه<sup>۵</sup> تقسیم می‌شود [۱]. در مرحله اولیه برداشت، انرژی طبیعی مخزن عامل اصلی حرکت و جابجایی نفت است، که مکانیزم اصلی این فرآیند وابسته به رانش گاز محلول<sup>۶</sup>، رانش کلاهک گازی<sup>۷</sup> و نیروی حاصل از آب<sup>۸</sup> و ریزش ثقلی<sup>۹</sup> است.

<sup>1</sup> Conventional

<sup>2</sup> Compositional

<sup>3</sup> Primary recovery

<sup>4</sup> Secondary recovery

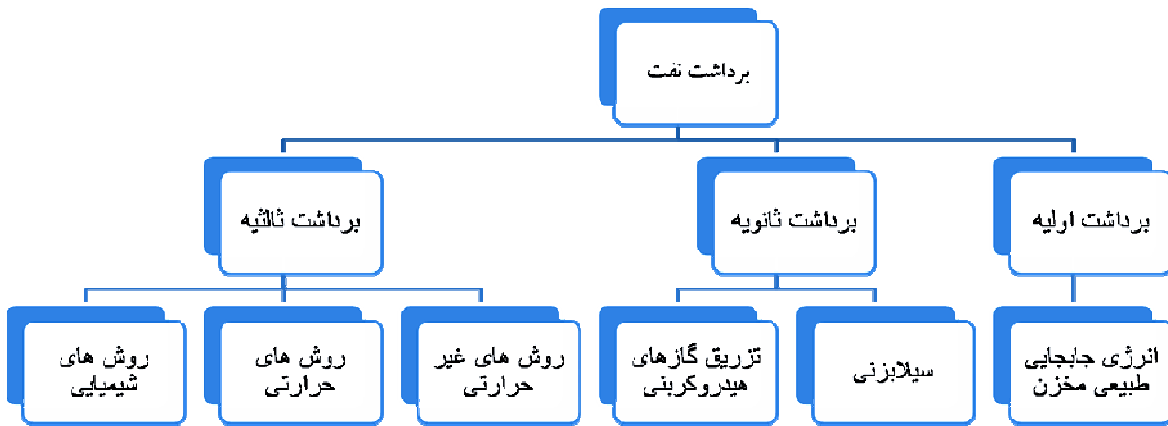
<sup>5</sup> Tertiary recovery

<sup>6</sup> Solution gas drive

<sup>7</sup> Gas cap drive

<sup>8</sup> Water drive

<sup>9</sup> Gravity drainage



شکل ۱-۱: مراحل تولید از مخزن.

پس از کاهش برداشت در مرحله‌ی اولیه، برداشت ثانویه با هدف افزایش انرژی طبیعی مخزن با کمک تزریق آب یا گاز برای تثبیت فشار و در نهایت افزایش جابجایی نفت به سمت چاه‌های تولیدی انجام می‌شود. سومین مرحله تولید و برداشت با هدف افزایش راندمان تولید نفت صورت می‌گیرد که شامل تزریق گازهای امتزاجی و غیر امتزاجی<sup>۱</sup>، مواد شیمیایی<sup>۲</sup>، انرژی حرارتی<sup>۳</sup>، ایجاد حرارت در مخزن و یا روش‌های نوین دیگر است. این روش‌ها با ایده‌ی تغییر در حرکت پذیری، ترشوندگی<sup>۴</sup> و یا رفتار فازی مطلوب سیال، در مخزن اعمال می‌شوند. برای طراحی یک روش ازدیاد برداشت نفت در یک مخزن باید خصوصیات سنگ و سیال، نوع سازند، نحوه‌ی توزیع اشباع سیالات، همگن یا ناهمگن بودن مخزن و غیره در نظر گرفته شود. این تنوع در خصوصیات باعث توسعه‌ی روش‌های مختلف ازدیاد برداشت نفت شده است.

## ۲-۱ دسته بندی روش‌های ازدیاد برداشت

فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت را می‌توان به صورت کلی به سه دسته تقسیم کرد.

۱- روش‌های شیمیایی

۲- روش‌های حرارتی

<sup>1</sup> Miscible and immiscible gases

<sup>2</sup> Chemicals

<sup>3</sup> Thermal

<sup>4</sup> Wettability



## ۳- روش‌های غیر حرارتی

## ۱-۲-۱ روش‌های شیمیایی

روش‌های شیمیایی خود به دو گروه کنترل پویایی (پلیمرها) و مواد فعال در سطح تقسیم می‌شوند. فرآیندهای کنترل پویایی بر برقراری یک نسبت پویایی<sup>۱</sup> مطلوب برای بهبود اندازه‌ی روبش حجمی<sup>۲</sup> استوارند (مثل گراندرو کردن آب با کمک پلیمرها و کاهش پویایی گاز با استفاده از کف). در برخی دیگر از فرآیندهای شیمیایی موادی از قبیل مواد فعال در سطح یا عوامل قلیایی به مخزن تزریق می‌شوند تا ترکیبی از رفتارهای فازی و کاهش چسبندگی سطحی<sup>۳</sup> برای جابجایی نفت و بهبود راندمان جابجایی میکروسکوپی<sup>۴</sup> نفت حاصل شود. ترکیب فرآیندهای کنترل پویایی و مواد فعال در سطح پتانسیل بهبود راندمان جابجایی میکروسکوپی و راندمان جابجایی ماکروسکوپی<sup>۵</sup> را همزمان فراهم می‌آورد.

## ۱-۲-۲ روش‌های حرارتی

از پرکارترین روش‌های حرارتی تزریق تناوبی بخار (CSS)<sup>۶</sup>، احتراق در جا (ISC)<sup>۷</sup> و تزریق بخار همراه با ریزش ثقلی (SAGD)<sup>۸</sup> هستند، که همگی از انرژی گرمایی برای کاهش گراندروی نفت استفاده می‌کنند. دو روش CSS و SAGD بیشترین مشارکت در برداشت نفت سنگین از مخازن را دارا می‌باشند. آن‌ها به تزریق بخار برای کاهش گراندروی و افزایش پویایی نفت نیاز دارند و مهم‌ترین مساله در تکنیک تزریق بخار بررسی راندمان انرژی و تولید نفت است.

در CSS از یک چاه برای تزریق بخار و برداشت نفت استفاده می‌شود. فرآیند در CSS به سه مرحله تقسیم می‌شود (شکل ۱-۲):

۱- تزریق بخار

۲- خیساندن با بخار<sup>۹</sup>

۳- تولید نفت حرارت دیده.

ضریب راندمان<sup>۱۰</sup> در CSS به علت مصرف بالای انرژی و امکان مخروطی شدن گاز<sup>۱۱</sup> به ندرت از ۲۰ درصد

<sup>1</sup> Mobility ratio

<sup>2</sup> Volumetric sweepout

<sup>3</sup> Interfacial tension

<sup>4</sup> Microscopic displacement efficiency

<sup>5</sup> Macroscopic displacement efficiency

<sup>6</sup> Cyclic steam stimulation (CSS)

<sup>7</sup> In-situ combustion (ISC)

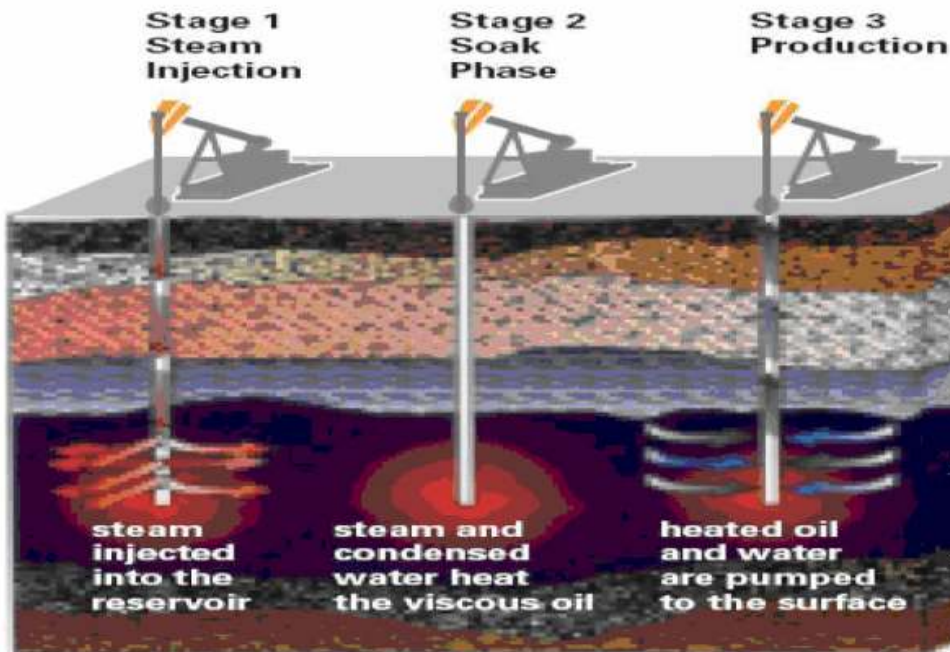
<sup>8</sup> Steam assisted gravity drainage (SAGD)

<sup>9</sup> Steam soaking

<sup>10</sup> Recovery factor

<sup>11</sup> Gas conning

نفت در جای اولیه<sup>۱</sup> بیشتر می‌شود. حالت ایده‌آل این شیوه در مخازنی با ضخامت<sup>۲</sup> بیشتر از ۱۵ متر و بدون آبد<sup>۳</sup> مناسب‌تر است.



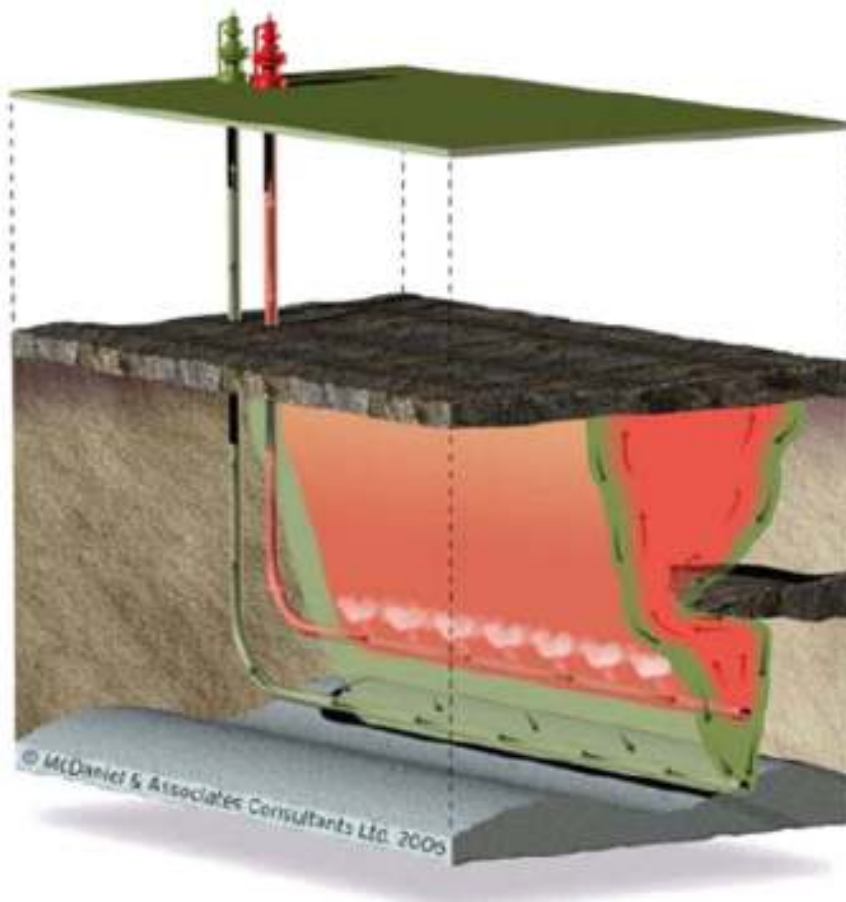
شکل ۱-۲: فرآیند تزریق تناوبی بخار [۲].

از سوی دیگر SAGD فرآیندی همراه با تزریق پیوسته بخار و ریزش ثقلی همراه آن است. ضریب راندمان فرآیند به نسبت بخار به نفت تولیدی بستگی دارد و در بهترین حالت، این ضریب به ۷۰ درصد OOIP می‌رسد. به هر حال از مضمرات این فرآیند نیاز به تاسیسات پر هزینه برای تولید بخار و آلودگی محیط زیستی آن می‌باشد. در این فرآیند بخار از یک چاه افقی در بالای یک چاه تولیدی افقی تزریق می‌شود [۳] (شکل ۱-۳). فاصله بین چاه‌های تزریقی و تولیدی به میزان گرانبوی و ضخامت مخزن بستگی دارد، اما به طور کلی بین سه تا ۱۰ متر است. همچنین حالت ایده‌آل در این فرآیند ارتفاع کمتر از ۲۰ متر مخزن می‌باشد.

<sup>1</sup> Original oil in-place (OOIP)

<sup>2</sup> Pay zone

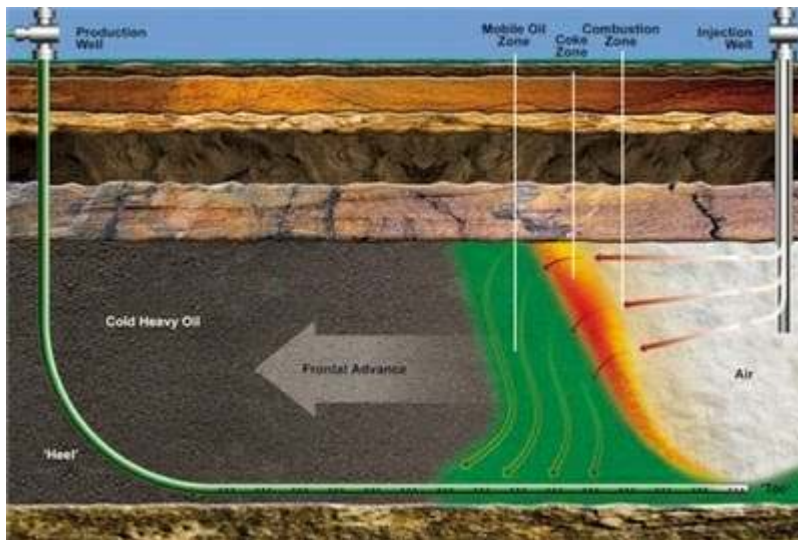
<sup>3</sup> Aquifer zone



شکل ۳-۱: تزریق بخار همراه با ریزش ثقلی [۴].

فرآیند احتراق درجا نیز از فرآیندهایی است که جهت ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین به کار می‌رود. اکسیژن یا هوا از چاه تزریقی وارد مخزن شده و پس از احتراق، بخشی از نفت مخزن سوخته و انرژی لازم برای برداشت نفت را از چاه تولیدی حاصل می‌سازد. از لحاظ تئوری این فرآیند به نحوی ایده‌آل است، زیرا بر خلاف SAGD و CSS نیاز به انرژی اضافی ندارد. فرآیند به این صورت است که بخشی از نفت مخزن سوزانده می‌شود و نفت باقیمانده تولید می‌شود (شکل ۳-۱). مشکل اصلی این شیوه کنترل حرکت جبهه‌ی احتراق است. ممکن است جبهه‌ی احتراق به صورت غیر یکنواخت در مخزن حرکت کند و به تماس ناچیز حجمی منجر شود و زمان گسست<sup>۱</sup> را کم کند و در نهایت مقدار راندمان را پایین بیاورد. همچنین به دلیل بالا رفتن دما ممکن است مشکلات قابل توجهی در تجهیزات سرچاهی به وجود آورد.

<sup>1</sup> Breakthrough time



شکل ۱-۴: فرآیند احتراق درجا [۵].

در روش‌های حرارتی تولید با ترکیبی از مکانیزم کاهش گرانروی، افزایش می‌یابد. اثر جمعی این مکانیزم روی نفت‌های سنگین‌تر (درجه API پایین) با گرانروی زیاد، بیشتر است.

### ۳-۱ روش‌های غیر حرارتی

حیطه‌ی بزرگی از روش‌های غیر حرارتی (سرد) شامل تزریق گاز امتزاجی و غیر امتزاجی است، که در فرآیند تزریق گازهای امتزاجی، هدف تزریق سیالاتی است که مستقیماً در نفت مخزن امتزاج می‌یابند یا با توجه به تغییر ترکیب داخل مخزن امتزاج را پدید می‌آورند (مانند تزریق حلال‌های هیدروکربنی یا دی‌اکسید کربن). رفتار فازی عامل اصلی استفاده از این نوع فرآیندها است. گازهای غیر امتزاجی نیز برای روش‌های غیر امتزاجی نفت مانند سیلابزنی تزریق می‌شود.

تزریق حلال همراه با ریزش ثقلی روش غیر حرارتی امتزاجی برای ازدیاد برداشت نفت است [۶]. هیدروکربن‌های سبک‌گازی به منظور کاهش گرانروی نفت سنگین و در نهایت ریزش ثقلی نفت رقیق شده به مخزن تزریق می‌شود. از مهم‌ترین نکات مثبت استفاده از VAPEX کاهش انرژی مورد نیاز است. در نتیجه VAPEX در مخازن با ارتفاع کمتر مناسب است، بالعکس SAGD و CSS که در مخازن با ارتفاع کم اقتصادی نیستند. جزئیات بیشتر درباره‌ی VAPEX در عنوان بعدی مشروح می‌شود.

همچنین می‌توان روش‌های میکروبی، روش‌های الکتریکی، امواج صوتی و غیره را با موضوع برداشت ثالثیه در عنوان‌های مجزا بیان کرد، که در این مطالعه مجال تشریح امر فوق‌الذکر نیست.

### ۴-۱ گستره‌ی فرآیند VAPEX

VAPEX آنالوژی از SAGD است [۶] که در آن به جای بخار، از هیدروکربن‌های سبک برای کاهش