

بررسی عملکرد فرایند VAPEX در مخازن نفت سنگین با فشار بالا

رضا آذین*⁺

بوشهر، دانشگاه خلیج فارس، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی شیمی

ریاض خراط

تهران، دانشگاه صنعت نفت، مرکز تحقیقات نفت - تهران

سیروس قطبی

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

شاپور وثوقی

آمریکا، کانزاس، لارنس، دانشگاه کانزاس، بخش مهندسی شیمی و نفت

بهزاد رستمی

تهران، دانشگاه صنعت نفت، مرکز تحقیقات نفت - تهران

چکیده: فرایند VAPEX، یک روش ازدیاد برداشت به کمک بخار حلال هیدروکربن است که از نظر مکانیسم، مشابه با فرایند ریزش ثقلی به کمک بخار آب (SAGD) است و در سال‌های اخیر توجه محققین را به خود جلب کرده است. این روش می‌تواند برای تولید نفت از ذخایر عظیم نفت سنگین با گرانشی بالا مناسب باشد. در این روش، از هیدروکربن‌های سبک (پروپان و بوتان) در حالت بخار اشباع برای کاهش گرانشی نفت سنگین استفاده می‌شود. نفت بهبود کیفیت یافته در اثر نیروی ثقلی از مخزن تخلیه می‌شود. ویژگی‌هایی همچون مصرف پایین انرژی، آلاینده‌گی ناچیز زیست محیطی، بهبود کیفیت نفت در مخزن، هزینه‌های پایین سرمایه‌گذاری در مقایسه با روش‌های حرارتی، ... از جمله مزایای این روش در مقایسه با روش‌های حرارتی ازدیاد برداشت به شمار می‌رود. در این تحقیق، عملکرد فرایند ازدیاد برداشت VAPEX در یک مدل دو بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور تزریق حلال به مخزن در شرایط نقطه شبنم، درصد ترکیب بهینه حلال بر اساس شرایط مخزن تعیین شد. تجزیه و تحلیل عملکرد فرایند در اثر تغییر متغیرهای عملیاتی دبی تزریق حلال و ضریب نفوذ حلال در نفت انجام شده است. نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که برای اعمال این فرایند در مخازن پر فشار، باید از مقدارهای بهینه دبی تزریق حلال در سیستم استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: ازدیاد برداشت، ریزش ثقلی، بخار حلال، ضریب نفوذ.

KEY WORDS: Enhanced oil recovery, Gravity drainage, Vapor solvent, Diffusion coefficient.

+E-mail: reza_azin@yahoo.com

*عهده دار مکاتبات

مقدمه

با توجه به کاهش سریع ذخایر جهانی نفت سبک، همچنین وجود ذخایر فراوان و مخازن عظیم نفت سنگین، نفت بسیار سنگین و قیر طبیعی، استخراج و تولید از این ذخایر، اهمیت زیادی در جهان پیدا کرده است. نفت سنگین و قیر طبیعی با خواصی همچون گرانبوی بالا و درجه API پایین مشخص می‌شوند (شکل ۱). در برخی از مخازن کانادا، مانند مخزن آتاباسکا^(۱)، گرانبوی نفت سنگین به چندین میلیون سانتی پوز در شرایط مخزن می‌رسد. لذا انتخاب یک روش مناسب برای کاهش گرانبوی نفت سنگین و روان‌سازی آن در مخزن یکی از هدف‌های مهم فرایندهای ازدیاد برداشت (EOR)^(۲) به شمار می‌رود.

در فرایندهای حرارتی همچون تحریک به وسیله بخار (CSS)^(۳)، احتراق درجا (ISC)^(۴)، ریزش ثقلی به کمک بخار آب (SAGD)^(۵)، ... که در حال حاضر برای تولید نفت سنگین به کار می‌روند، گرانبوی نفت در اثر گرم کردن مخزن کاهش می‌یابد [۱]. در حال حاضر، کاربرد فناوری SAGD در استفاده از این ذخایر موفق نشان داده است. با وجود این، در برخی از مخازن مشکلاتی همچون بازدهی پایین انرژی به ویژه در مخازن با ضخامت کم، نیاز به تصفیه پیش از دورریز آب خروجی از مخزن و مسایل زیست محیطی ناشی از آن، امکان تخریب سازند در نتیجه تورم سازندهای رسی در اثر تماس با آب میعان یافته، و ... مشاهده شده است که می‌تواند منجر به غیر اقتصادی شدن فرایند در برخی مخازن شود. بنابراین، جستجو برای یافتن فرایندهای ازدیاد برداشت که سازگاری بیشتر با محیط زیست و مصرف انرژی پایین تری داشته باشند ادامه دارد.

افزون بر گرم کردن که در روش‌های حرارتی به کار می‌رود، گرانبوی نفت سنگین و قیر طبیعی را می‌توان با افزودن حلال‌های سبک هیدروکربنی کاهش داد [۲]. بنابراین، اگر از حلال‌های سبک هیدروکربنی به جای بخار استفاده شود، اتلاف انرژی در فرایند به حداقل می‌رسد. این امر، اساس فرایند استخراج نفت سنگین به کمک بخار حلال هیدروکربنی است. عقیده و اعتقاد بر استفاده از حلال به منظور استخراج و تولید نفت سنگین و قیر طبیعی به دهه ۱۹۷۰ میلادی بر می‌گردد. آلن [۳ و ۴] فرایندی را پیشنهاد کرد که طی آن، پروپان یا بوتان به صورت چرخه‌ای

در یک مخزن مایه ای تزریق می‌شود و در نتیجه، نفت از مخزن تولید می‌شود. همچنین، آلن و همکاران [۵] فرایند تزریق حلال مایع را توأم با گاز غیر قابل میعان به مخزن تشریح کردند. روستون [۶] فرایند استفاده از حلال داغ به حالت بخار را در دمای ۹۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار نزدیک به شرایط اتمسفری برای استخراج اجزا فرار تر از سنگ قیر پیشنهاد کرد. نئیگر [۷] تزریق گاز خالص یا مخلوط گازها را به مخزن در شرایط فشاری نزدیک یا برابر با فشار اشباع (یا فشار نقطه شبنم) برای تولید نفت سنگین و قیر طبیعی پیشنهاد کرد. در تمام این فرایندها، چاه‌های تزریقی و تولیدی به صورت عمودی حفر می‌شود. با توجه به این که نفوذ مولکولی حلال در نفت سنگین، اساس فرایندهای مبتنی بر حلال را تشکیل می‌دهد، استفاده از چاه‌های عمودی سطح نفوذ کمی را در مقایسه با چاه‌های افقی در اختیار مولکول‌های حلال قرار می‌دهد. از سوی دیگر، در فرایند (VAPEX)^(۶)، از چاه‌های افقی به جای چاه‌های عمودی استفاده می‌شود. این فرایند در سال ۱۹۸۹ به عنوان روش جایگزین روش‌های حرارتی ابداع شد [۱]. اساس این فرایند، بر نفوذ مولکولی بخار حلال هیدروکربنی در نفت سنگین با گرانبوی بالا، روان‌سازی و کاهش گرانبوی نفت در نتیجه حل شدن حلال در آن و ریزش ثقلی نفت روان شده مبتنی است. مفهوم فرایند VAPEX در مخازن معمولی (فاقد شکاف) در شکل ۲ نشان داده شده است که یک برش عمودی را از مخزن نشان می‌دهد. بر اساس فرایند VAPEX، بخار هیدروکربن‌های سبک (دارای جرم مولکولی پایین) در فشاری نزدیک به فشار اشباع (یا فشار نقطه شبنم در حالتی که مخلوط هیدروکربن‌ها به کار می‌رود) به وسیله‌ی یک چاه افقی به مخزن تزریق می‌شود. بخار حلال در لایه نفت حد فاصل فاز بخار و فاز نفت حل می‌شود و به درون توده نفت سنگین نفوذ می‌کند. در نتیجه این فرایند، نفت سنگین رقیق شده گرانبوی آن کاهش می‌یابد و تحت نیروی ثقل به چاه افقی دیگری که پایین تر از چاه تزریقی واقع شده است می‌ریزد [۲].

مدل‌سازی ترکیبی

زمانی که ترکیب سیال موجود در مخزن یا سیال تزریق شده به مخزن باعث وابستگی ویژگی‌های سیالات به ترکیب شود،

(۱) Athabasca

(۲) Enhanced oil recovery

(۳) Cyclic steam stimulation

(۴) In-situ combustion

(۵) Steam-assisted gravity drainage

(۶) Vapor extraction

از مدل ترکیبی برای مطالعه مخزن استفاده می شود. از مدل های ترکیبی حالت های گوناگون مطالعه مخزن مانند ۱- تولید اولیه، ۲- تزریق گاز (مانند تزریق نیتروژن) به مخازن گاز میعانی و مخازن نفت فرار، ۳- ازدیاد برداشت از مخازن نفت به کمک تزریق CO₂ یا تزریق گاز غنی شده استفاده می شود [۸]. از سوی دیگر، نیاز به افزایش تولید نفت داخلی، اهمیت ازدیاد برداشت به کمک تزریق گاز را بیشتر کرده است. از این رو، نیاز به مدل سازی ترکیبی مخزن افزایش یافته است.

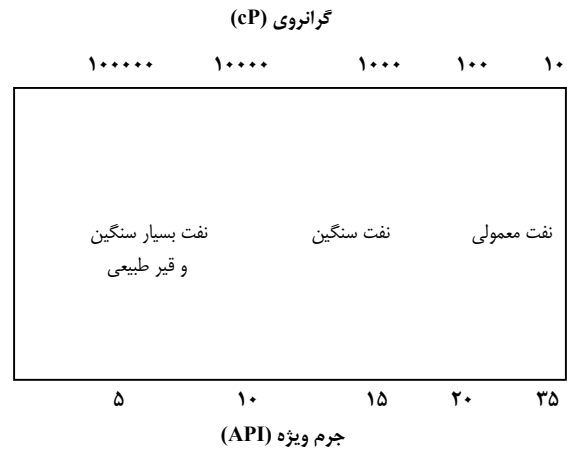
نرم افزارهای اولیه شبیه سازی مخزن بر اساس مقادیرهای نسبت تعادلی^(۱) طراحی شده بود. این مقادیرها به صورت تابعی از فشار و فشار هم گرایی بیان می شد. در نرم افزارهای جدید شبیه سازی مخزن، از معادله های حالت مانند RK^(۲)، SRK^(۳) یا PR^(۴) [۹] برای به دست آوردن مقادیرهای نسبت تعادلی و ویژگی های سیالات در فازهای متفاوت استفاده می شود. به کارگیری معادله های حالت در نرم افزارهای شبیه سازی مخزن دارای مزایای متعددی نسبت به رابطه های تجربی است.

نرم افزار شبیه سازی ترکیبی GEM بخشی از بسته نرم افزاری CMG^(۵) فراورده ای گروه مدل سازی کامپیوتری (کانادا) است که بر اساس معادله های حالت طراحی شده است و برای شبیه سازی جریان سه فازی و چند جزیی سیالات در مخزن به کار می رود. این نرم افزار بر اساس تقسیم بندی مخزن به روش تفاضل محدود^(۶) کار می کند. از این نرم افزار برای مدل سازی هر نوع مخزن که در آن ترکیب سیالات و برهم کنش آنها اهمیت اساسی در درک مکانیسم فرایند دارد استفاده می شود. برخی از این فرایندها شامل تزریق CO₂، تزریق هم زمان آب و گاز و تزریق هیدروکربن ها مانند فرایند VAPEX هستند. در این کار، از نرم افزار شبیه سازی ترکیبی GEM (نسخه ۲۰۰۴) برای مطالعه فرایند VAPEX استفاده شده است.

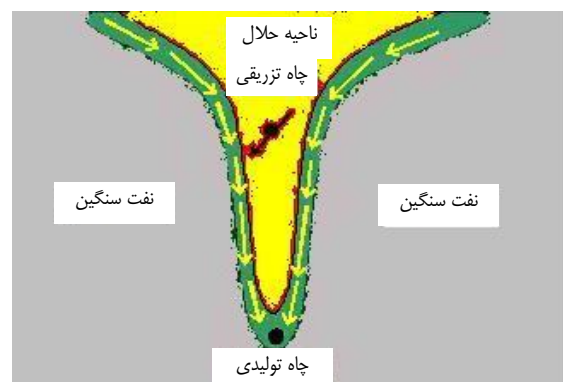
شبیه سازی فرایند VAPEX

تشریح مدل

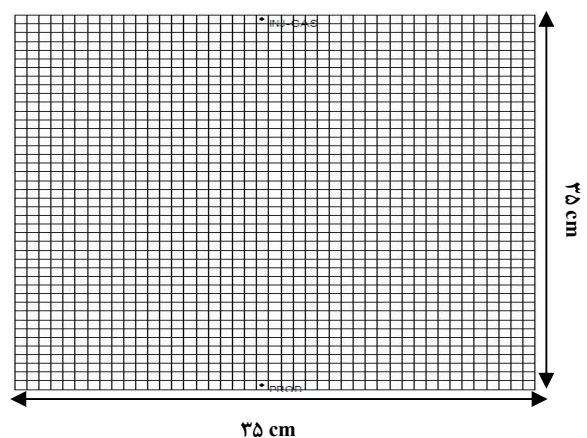
شماتیک دو بعدی مدل مستطیلی به کار رفته در مطالعات شبیه سازی در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۰]. ویژگی های سیستم در جدول ۱ خلاصه شده است.



شکل ۱- دسته بندی انواع نفت خام بر اساس گرانی و چگالی.



شکل ۲- مفهوم فرایند VAPEX در مخازن معمولی (فاقد شکاف).



شکل ۳- شماتیک دو بعدی مدل فیزیکی.

(۱) K-values

(۲) Redlich-kwong

(۳) Soave redlich-kwong

(۴) Peng robinson

(۵) Computer modeling group

(۶) Finite difference

جدول ۱- داده های مربوط به مدل.

طول در جهت x، (سانتی متر)	۳۵
طول در جهت y، (سانتی متر)	۳۵
طول در جهت z، (سانتی متر)	۳/۰۵
تخلخل	۰/۳۱۵
تراوایی، (میلی داریسی)	۱۰
تعداد اجزاء مخلوط	۸
دما، (سانتی گراد)	۲۱
فشار، (psia)	۱۰۰۰
گرانروی نفت خام، (cP)	۵۰۰
میزان اشباع اولیه آب	۰/۱۸۷
میزان اشباع نفت باقی مانده	۰/۲

جدول ۲- ترکیب نفت در سیستم ۸ جزئی.

حلال	نفت	نقطه جوش (°F)	جرم مولکولی	گروه ترکیب
۰	۰/۰۰۱۸۷	-۳۲/۳۵	۲۸/۰۱۳	N _۲
۰/۷۵	۰/۰۹۴۷۱	-۲۵۸/۶۱	۱۶/۰۴۳	C _۱
۰	۰/۰۵۴۶۵	-۱۲۷/۱۲۸	۳۰/۰۹۳	CO _۲ -C _۲
۰/۲۵	۰/۰۶۸۹۳	-۴۳/۶۹	۴۴/۰۹۷	C _۲
۰	۰/۰۱۰۵۵	۱۰/۶۷	۵۸/۱۲۴	IC _۴
۰	۰/۰۲۵۰۶	۳۱/۱۹	۵۸/۱۲۴	NC _۴
۰	۰/۰۴۹۷۳	۱۲۱/۹	۸۷/۱۵	NC _۵ -C _۶
۰	۰/۰۶۹۴۵	۹۰۳/۵۶	۳۵۹/۹۵	C _۷ -C _{۳۳}

حلال

معیار مهم در انتخاب حلال مناسب برای تزریق به مخزن این است که حلال در شرایط دما و فشار مخزن در حالت بخار اشباع (برای حلال خالص) یا در نقطه شبنم (برای مخلوط حلال) قرار داشته باشد [۲]. با توجه به این معیار، مخازنی که قابلیت تزریق حلال خالص دارند محدود به مخازن با فشار کم می شود. یکی از راه های عملی برای افزایش فشار عملیات در حالی که حلال به حالت بخار قرار دارد، استفاده از مخلوط حلال (پروپان/بوتان) و یک گاز غیر قابل میعان (متان، اتان، یا نیتروژن) به عنوان گاز حامل است [۱۱]. لازم به ذکر است که در نتیجه افزودن گاز حامل که دارای حلالیت پایین در نفت سنگین می باشد، تولید نفت سنگین طی فرایند VAPEX کاهش می یابد. از سوی دیگر باید توجه داشت که حلال خالص در فشارهای بالا در حالت مایع فوق سرد قرار دارد و لذا تزریق آن به مخزن مستلزم مصرف قابل توجه حلال در این فرایند است، به نحوی که فرایند را از نظر اقتصادی زیر سوال می برد. بنابراین، بهترین راه برای تنظیم ترکیب حلال برای تزریق به مخازن پرفشار، استفاده از مخلوط حلال/حلالها با گاز/گازهای حامل است.

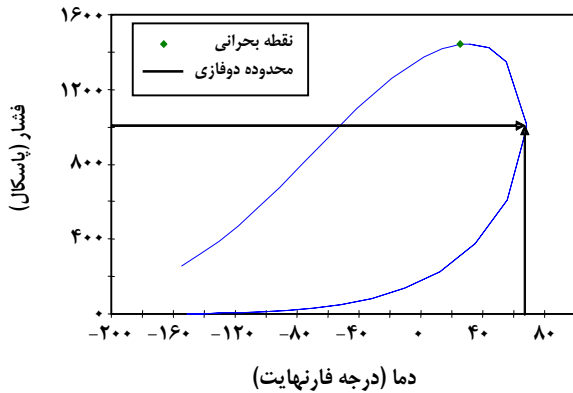
با توجه معیار ذکر شده در انتخاب حلال مناسب، در شرایط عملیاتی مدل حاضر (دمای ۲۱ درجه سانتی گراد و فشار ۱۰۰۰ psia)، سیستم مخلوط حلال به صورت (۲۵ درصد) C_۳ + (۷۵ درصد) C_۱

(۱) Lumped

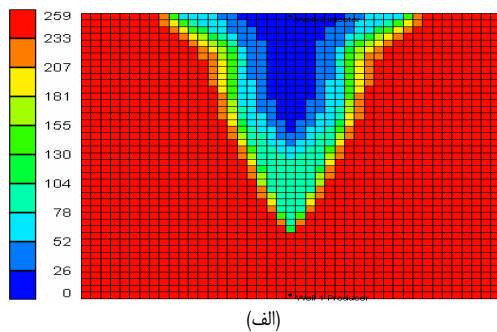
ابعاد مدل برابر با ۳۵ cm در ۳۵ cm در ۳/۰۵ cm است. مدل در سه جهت به ۴۷، ۴۷ و ۱ گرید تقسیم شده است. برای رسیدن به یک مدل واقعی، داده های واقعی تراوایی نسبی مربوط به یکی از مخازن کربناته ایران وارد مدل شده است. منحنی تراوایی نسبی نشان می دهد که میزان اشباع آب کاهش ناپذیر در سیستم برابر با ۱۸/۷ درصد و میزان اشباع نفت باقی مانده برابر با ۲۴ درصد است. تخلخل و تراوایی نسبی به ترتیب برابر با ۰/۳۱۵ و ۱۰ md است. یک چاه تزریقی در بالا و در میانه مدل و یک چاه تولیدی زیر چاه تزریقی و در پایین مدل حفر شده است.

نفت

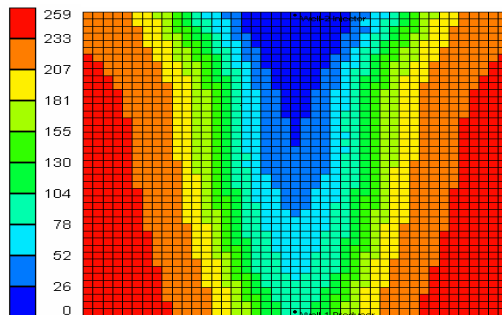
داده های نفت خام به کار رفته در این مطالعه، از یک میدان نفت سنگین واقع در جنوب غرب ایران گرفته شده است که دارای گرانروی ۵۰۰ سانتی پویز در شرایط اتمسفر است و درجه API آن در حالت نفت مرده برابر با ۱۹ است. با توجه به این که تعداد زیاد اجزاء نفت منجر به طولانی شدن زمان شبیه سازی و مشکل های مربوط به هم گرایی معادله ها می شود، به منظور ساده سازی تحلیل و کاهش مشکل های یاد شده، تعدادی از ترکیب های نفت به صورت گروه های ادغام^(۱) شده در نظر گرفته شد. ویژگی های ترکیب نهایی نفت با ۸ جزء در جدول ۲ آمده است. فشار و دمای سیستم به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ psia و ۲۱ درجه سانتی گراد تنظیم شد.



شکل ۴- نمودار فازی سیستم حلال به کار رفته در مدل.

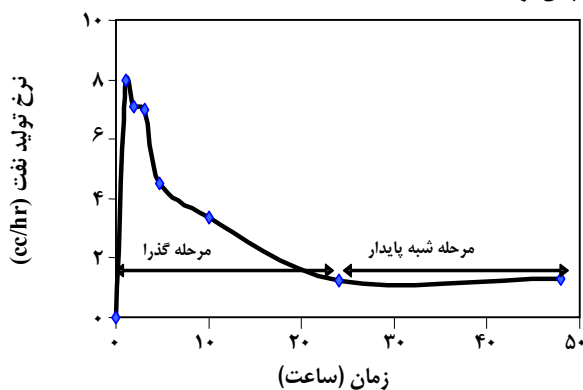


(الف)



(ب)

شکل ۵- جبهه پیشروی حلال در نفت سنگین (الف- پس از ۴ ساعت، ب- پس از ۲۴ ساعت).



شکل ۶- مرحله‌های متفاوت دبی تولید نفت در فرایند VAPEX.

انتخاب شد [۱۲]. نمودار فازی سیستم حلال در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق این نمودار، حلال فوق در شرایط دما و فشار مخزن در نقطه شبنم قرار دارد.

نتیجه‌ها و بحث

رفتار عمومی توزیع حلال در یک مخزن غیر شکافدار در شکل ۵ نشان داده شده است. حلال از چاه تزریقی که در بالا و وسط مدل واقع شده است، تزریق می‌شود. در ساعت‌های اولیه پس از آغاز فرایند، گاز از سیستم خارج نمی‌شود و تولید نفت در اثر مکانیسم تخلیه طبیعی و جا به جایی نفت به وسیله‌ی گاز صورت می‌پذیرد. در ادامه، محفظه بخار شکل می‌گیرد و به اطراف گسترش می‌یابد. هم‌زمان، در اثر نفوذ و حل شدن حلال در نفت، گرانیوی نفت در سطح میانی نفت-حلال کاهش یافته پویایی نفت مخزن افزایش می‌یابد. نفت روان شده در اثر نیروی ثقلی به چاه تولیدی می‌ریزد. شکل ۶، میزان تولید نفت از این مدل را پس از ۴۸ ساعت نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، روند تولید نفت را می‌توان به دو مرحله زمانی تقسیم کرد. در مرحله نخست (مرحله گذرا)، دبی تولید نفت در وضعیت ناپایدار قرار دارد و به یک مقدار حداکثر می‌رسد ولی به سرعت افت می‌کند. در مرحله دوم، دبی نفت در وضعیت شبه پایدار قرار دارد. مدت زمان مرحله نخست بستگی به عامل‌هایی مانند وسعت مخزن، خواص سنگ و خواص نفت مخزن دارد، و میزان نفت تولید شده از مخزن در این مرحله می‌تواند قابل توجه باشد به نحوی که بر اقتصاد فرایند تأثیر گذار باشد. این امر به ویژه در خصوص مخازنی که گرانیوی نفت سنگین در آنها در حد متوسط قرار دارد صادق است. به همین دلیل، نتیجه‌های به دست آمده از مدل‌های موجود پیش بینی دبی تولید نفت از مخازن نفت سنگین به روش VAPEX که فقط مرحله شبه پایدار را در نظر می‌گیرند ممکن است بدبینانه بوده و در نتیجه، فرایند انتخاب روش EOR مناسب را از نظر اقتصادی دچار اشکال کند. لازم به ذکر است، روند تغییرهای دبی در شکل ۶ با مشاهده‌های آزمایشگاهی [۱۴] هم‌خوانی دارد. نمونه‌ای از این مشاهده‌ها در شکل ۷ ارایه شده است.

اثر دبی تزریق سیال

به نظر می‌رسد که با اعمال دبی بالای تزریق حلال، مکانیسم فرایند از ریزش ثقلی به جا به جایی^(۱) تغییر می‌یابد.

(۱) Displacement

جدول ۳- تغییرهای دبی متوسط تولید نفت با دبی تزریق حلال (حالت ۱).

دبی تزریق حلال (cc/hr)	دبی تولید نفت (cc/day)
۱۰	۳,۷۳
۲۰	۴,۱۴
۴۰	۴,۵
۸۰	۵,۴۶
۱۶۰	۶,۸۶

۸۰ ml/h به حداقل می‌رسد. بنابراین، از یک نقطه به بعد، تغییرات دبی منجر به افزایش قابل توجه میزان بازیابی نفت نمی‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای یک سیستم خاص، باید دبی بهینه تزریق حلال محاسبه و اعمال شود.

۲- اثر تزریق حجم حلال یکسان با دبی های متفاوت

در این حالت که حجم کل حلال تزریق شده به سیستم ثابت است، با کاهش دبی تزریق حلال، زمان بیشتری برای نفوذ در نفت در اختیار حلال قرار دارد. بنابراین، انتظار می‌رود که میزان بازیابی حلال در دبی‌های پایین، بیشتر باشد [۱۰]. به عبارت دیگر، با اختصاص زمان بیشتر و اعمال سرعت پایین تر، فرایند نفوذ حلال که یک فرایند کند محسوب می‌شود، دارای اهمیت می‌شود. در این صورت، مقدار نفت متاثر از حلال در مخزن افزایش می‌یابد. در نتیجه، مقدار میزان بازیابی حلال در دبی‌های پایین، بیشتر می‌شود.

شکل ۹، اثر افزایش دبی تزریق را در این حالت نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقدار ۹۶۰ میلی‌لیتر حلال در سه حالت با سه دبی متفاوت به سیستم تزریق شده است. مقدار نفت بازیابی شده در سه دبی ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی‌لیتر بر ساعت به ترتیب برابر با ۱۶/۸، ۱۴/۴ و ۱۲/۳ درصد است. بنابراین، در حالتی که مقدار حلال تزریق شده ثابت است، افزایش میزان بازیابی در دبی‌های پایین تر نشانه عملکرد موثرتر مکانیسم نفوذ در فرایند VAPEX است. این عملکرد در یک مخزن واقعی مشاهده شده و توسط محروس [۱۵] گزارش شده است. در این مخزن، نفوذ اتفاقی گاز با دبی پایین و در طی مدت زمان طولانی از یک لایه به لایه

در این صورت، به دلیل تفاوت زیاد میان پویایی^(۱) نفت سنگین و حلال، بخشی از بخار حلال به همراه مقدار زیاد گاز حامل میعان‌ناپذیر، بدون تماس با نفت سنگین به طور زودرس از سیستم خارج می‌شود. این امر، موجب پایین آمدن عملکرد فرایند می‌شود. افزون بر این، تفاوت فشار ایجاد شده در مخزن در مراحل اولیه تزریق سیال به مخزن، نیروی محرکه لازم را برای جا به جایی نفت تأمین می‌کند. اما در مراحل بعدی که فضای خالی ایجاد شده میان چاه تزریقی و چاه تولیدی به وسیله‌ی محفظه بخار اشغال می‌شود، مکانیسم ریزش ثقلی بر مکانیسم جا به جایی نفت به وسیله‌ی گاز غلبه می‌کند. به منظور مشاهده تأثیر دبی تزریق حلال بر فرایند، حالت‌های زیر مورد آزمون قرار گرفت:

۱- تزریق دبی های متفاوت در مدت زمان یکسان. در این حالت، میزان کل حلال تزریق شده به مخزن در دبی های بالاتر، بیشتر است.

۲- تزریق حجم حلال یکسان با دبی های متفاوت. در این حالت، زمان مورد نیاز تزریق با افزایش دبی کاهش می‌یابد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱- اثر تزریق دبی‌های متفاوت در مدت زمان یکسان

دبی تولید نفت بر اساس دبی‌های متفاوت تزریق حلال در جدول ۳ آمده است. داده‌های این جدول، برای دبی‌های پایدار شده^(۲) گزارش شده است که به تقریب مبین دبی حالت شبه پایدار^(۳) است. همچنین، شکل ۸ مقدار تجمعی^(۴) نفت تولید شده را برای دبی های متفاوت تزریق حلال نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مقدار نفت تولیدی با افزایش دبی تزریق حلال افزایش می‌یابد. وقتی دبی تزریق حلال به میزان دو برابر افزایش پیدا می‌کند (از ۱۰ ml/h به ۲۰ ml/h)، میزان تولید تجمعی نفت برابر با ۲۱ درصد است. به عبارت دیگر، افزایش دبی تزریق حلال در این بازه باعث افزایش بازیابی نفت می‌شود. باید توجه داشت که افزایش دبی تزریق حلال به مخزن، به معنای افزایش تقاضای حلال نیست، زیرا بخش اعظم حلال تزریق شده را می‌توان از نفت بازیابی شده جدا و دوباره به مخزن تزریق کرد [۱۳].

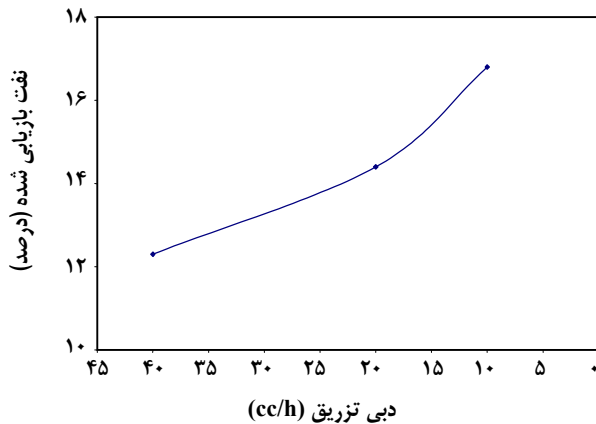
از سوی دیگر، از شکل ۸ مشخص است که با افزایش بیشتر دبی تزریق حلال ($< 20 \text{ ml/h}$)، تغییرهای بازیابی نفت نسبت به تغییرهای دبی به تدریج کاهش می‌یابد، به نحوی که در دبی

(۱) Mobility

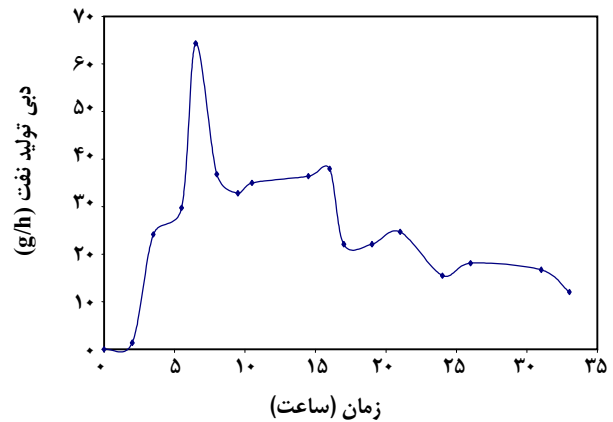
(۲) Stabilized rate

(۳) Pseudo steady state

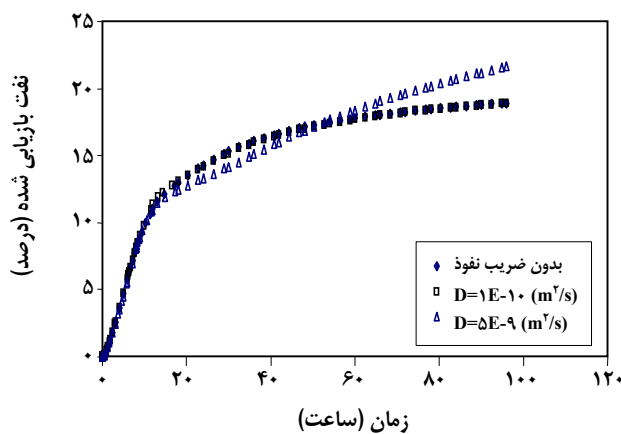
(۴) Cumulative



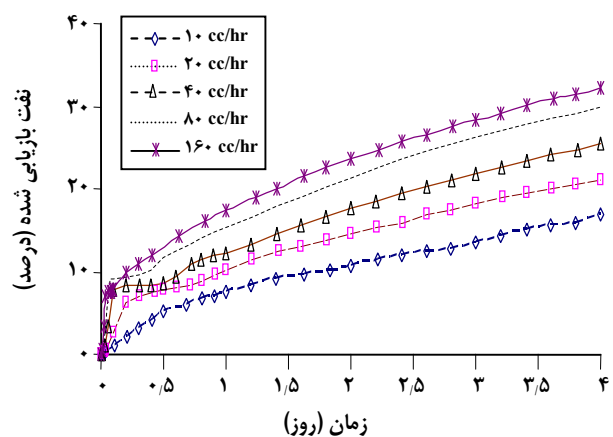
شکل ۹- اثر دبی تزریق حلال بر میزان نفت تولید شده (حالت ۲).



شکل ۷- مرحله‌های متفاوت دبی تولید نفت در فرایند VAPEX- مشاهددهای آزمایشگاهی [۱۴].



شکل ۱۰- تاثیر ضریب نفوذ بر میزان بازیابی نفت.



شکل ۸- اثر دبی تزریق حلال بر میزان نفت تولید شده (حالت ۱).

حلال (پروپان یا بوتان) در نفت سنگین در دسترس است [۱۶]. بر اساس این رابطه، ضریب نفوذ پروپان از مرتبه $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ می‌باشد. از طرف دیگر، مطالعات نشان داده است که ضریب پخش^(۱) که مرکب از ضریب نفوذ مولکولی و سرعت جریان ناحیه روان شده نفت سنگین است، می‌تواند تا ۱۰۰۰ برابر ضریب نفوذ مولکولی افزایش یابد [۱۷]. با این وجود، به دلیل عدم امکان مشاهده پروفیل سرعت در نرم افزار CMG، داده‌های ضریب پخش ترکیبها در نفت سنگین را باید با مقدارهای عددی در نرم افزار شبیه ساز وارد کرد. از این رو، به کمک مطالعات شبیه سازی می‌توان آنالیز حساسیت را با تغییر مقدار ضریب نفوذ انجام داد و نتیجه‌ها را ملاحظه و تحلیل کرد. بدین منظور، سه وضعیت زیر مورد بررسی قرار گرفت:

۱- فرایند بدون ضریب نفوذ (ضریب نفوذ غیر فعال)

دیگر باعث افزایش تولید نفت از چاه‌های مجاور ناحیه تحت نفوذ تدریجی گاز در میدان شد.

اثر ضریب نفوذ حلال در نفت سنگین

نفوذ پذیری، خاصیتی انتقالی به شمار می‌رود که در محاسبه انتقال جرم یک ماده در یک محیط تحت اثر نفوذ مولکولی به کار می‌رود. نفوذ بخار حلال در نفت سنگین، یک مکانیسم مهم در تولید نفت طی فرایند VAPEX می‌باشد. همچنین، ضریب نفوذ بخار حلال در نفت سنگین به طور مستقیم وارد محاسبه‌های دبی تولید نفت سنگین می‌شود. بنابراین، دانستن مقدار عددی ضریب نفوذ برای یک سیستم ویژه بخار حلال - نفت سنگین حائز اهمیت است [۱۲].

در حال حاضر، یک رابطه برای پیش بینی ضریب نفوذ اجزای

(۱) Dispersion

نتیجه‌گیری نهایی

۱- دبی تولید نفت از مخزن نفت سنگین طی فرایند VAPEX را می‌توان در دو مرحله گذرا و شبه پایدار تقسیم کرد.
 ۲- در مخازن معمولی، حلال فقط به وسیله‌ی چاه تزریقی به شبکه سنگ وارد می‌شود. در این حالت، جبهه حلال در اطراف چاه تزریقی و به درون بستر نفت شکل می‌گیرد و گسترش می‌یابد.
 ۳- زمانی که حجم حلال تزریق شده به مخزن ثابت است، در دبی‌های پایین تر تزریق حلال، بازیابی نفت افزایش می‌یابد.
 ۴- زمانی که دبی تزریق حلال افزایش می‌یابد، ممکن است میزان نفت تولیدی نیز افزایش یابد. ولی در این صورت، اثر ضریب نفوذ حلال در مقابل اثرات دیگر ناچیز می‌شود. همچنین، میزان گاز خروجی^(۲) نیز افزایش می‌یابد که موجب پایین آمدن عملکرد سیستم می‌شود.

۲- فرایند با ضریب نفوذ (ضریب نفوذ فعال) برابر با $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
 ۳- فرایند با ضریب نفوذ معادل ۵۰ برابر حالت ۲ (حالت D5۰).
 این حالت به مثابه بررسی اثر ضریب پخش در مدل است. اثر مقدارهای متفاوت ضریب نفوذ بر میزان نفت تولید شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل، تفاوت ناچیزی بین حالت ۱ (ضریب نفوذ غیر فعال) و حالت ۲ (ضریب نفوذ فعال) برابر با $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ وجود دارد. این امر به دلیل مقدار ناچیز ضریب نفوذ در حالت ۲ است. از سوی دیگر، وقتی مقدار ضریب نفوذ به ۵۰ برابر حالت ۲ افزایش می‌یابد (حالت ۳)، افزایش قابل ملاحظه در میزان بازیابی نهایی نفت ملاحظه می‌شود. نکته‌ای که می‌توان در این رابطه ذکر کرد این است که اگرچه ضریب نفوذ حلال در نفت سنگین تابعی از گرانیوی، ترکیب نفت سنگین و ترکیب حلال است و با کاهش تدریجی گرانیوی نفت افزایش پیدا می‌کند، تغییرهای آن شدید نیست. لذا، افزایش ۵۰ برابر یا بیشتر مقدار آن مربوط به ضریب پخش^(۱) می‌شود که ترکیبی از ضریب نفوذ مولکولی و سرعت جریان نفت در مخزن است [۱۸]. مقدار آن می‌تواند به ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر نفوذ مولکولی بالغ شود.

تاریخ دریافت: ۱۴/۱۲/۸۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۵/۱۱/۸۵

مراجع

- [1] Das, S. K. and Butler, R. M., Mechanism of Vapour Extraction Process for Heavy Oil and Bitumen, *Pet. Sci. Eng.*, **21**, p. 43 (1998).
- [2] Bulter, R. M. and Makrys, I. J., Solvent Analogue Model of Steam - Assisted Gravity Drainage, *AOSTRA Journal of Research*, **5**(1), p. 17 (1989).
- [3] Allen J. C., "Method for Recovering Viscous Oil by Solvent Extraction", Canadian Patent No.1008361, Texaco Development Corp., April 12 (1977).
- [4] Allen, J C., Gaseous Solvent Heavy Oil Recovery, Canadian Patent No. 1027851, Texaco Development Corp., March 14 (1978).
- [5] Allen, J.C. and Redford, A.D., Combination Solvent- Non-condensable Gas Injection Method for Recovering Petroleum from Viscous Petroleum-Containing Formations Including Tar Sand Deposits, US Patent No. 4109720, Texaco Inc., NY, August 29 (1978).
- [6] Rouston, G. W., In Situ Solvent Fractionation of Bitumen Contained in Tar Sands, US Patent No. 4022277, The Dow Chemical Company, May 10 (1977).
- [7] Nenniger, E.H., Hydrocarbon Recovery, Canadian Patent No. 1059432, Hatch Associates Ltd., July 31(1979).

(۱) Dispersion coefficient

(۲) Breakthrough

- [8] Young and Stephenson: A Generalized Compositional Approach for Reservoir Simulation, *SPE* 10516 (1983).
- [9] Peng, D. Y. and Robinson, D. B., A New Two-Constant Equation of State, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **15**, p.59 (1976).
- [10] Rostami, B., Azin, R., Kharrat, R., Investigation of the VAPEX Process in High Pressure Fractured Heavy Oil Reservoir,” *SPE* 97766, Presented at the 2005 PE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium Held in Calgary, Alberta, Canada, 1-3 November (2005).
- [11] Butler, R. M., Mokrys, I. J. and Das, S. K., The Solvent Requirements for VAPEX Recovery, *SPE* 30293, Presented at the International Heavy oil Symposium Held in Calgary, Alberta, Canada, June 19-21 (1995).
- [12] Azin, R., Kharrat, R., Rostami, B. and Vossoughi, S., Theoretical Investigation of the VAPEX Process in Fractured Heavy Oil System at Reservoir Conditions, *J. Pet. Sci. Eng.*, **31** (1), p. 50 (2008).
- [13] Butler, R. M. and Jiang, Q., Improved Recovery of Heavy oil by VAPEX with Widely Spaced Horizontal Injectors and Producers, *JCPT*, **39**(1), p. 48 (2000).
- [14] Azin, R., “Investigation of the VAPEX Process in Fractured Carbonate Reservoirs”, PhD Thesis, Sharif University of Technology (2007).
- [15] Mahroos, F. A., Future Challenges for Producing Middle East Oilfields During Maturation Stage, *SPE* 93708, Presented at the 14th SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Bahrain, 12-15 March (2005).
- [16] Das, S. K. and Butler, R. M., Diffusion Coefficients of Propane and Butane in Peace River Bitumen, *Can. J. Chem. Eng.*, **74** (12), p. 985 (1996).
- [17] Goudarzi, S., “Determination of the Dispersion Coefficient in VAPEX Process Through Mathematical Modeling”, MSc thesis, Petroleum Univ. Technology, (2006).
- [18] Kharrat, R., Vossoughi, S., Azin, R. and Razzaghi, S., “The Investigation of Using Thermal Methods for Heavy Oil Recovery”, Technical Report, Phase V, Petroleum University of Technology, (2004).