

اثر غنی سازی گاز تزریقی در افزایش ضریب برداشت از یک مخزن بزرگ نفتی ایران

فریبرز ذوالفقاریان، علیرضا خداوند شهرکی، هدا طحانی*، نجمه برزویی

تهران، مدیریت پژوهش و توسعه شرکت ملی نفت ایران، پژوهشگاه ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، صندوق پستی ۱۹۶۹۸۱۳۷۷

چکیده: تزریق گاز و جابه جایی امتزاجی دینامیکی (Dynamic Miscibility) از متداولترین مکانیسمهای موجود در مرحله سوم افزایش برداشت نفت است. در تزریق گاز می توان با بالا بردن فشار یا افزودن اجزای میانی (C_۲-C_۵) به گاز شرایط را به حالت امتزاج پذیری نزدیک کرد. در یک فشار ثابت، حداقل درصد این اجزای میانی که می بایست برای رسیدن به امتزاج به گاز در شرایط Condensing اضافه شود، (Minimum Miscibility MMC Concentration or Composition) نامیده می شود. هدف از این مطالعه آزمایشگاهی، اندازه گیری حداقل غلظت امتزاج (MMC) گاز تزریقی غنی شده در نتیجه تزریق به نفت B و تعیین مقدار درصد تولید نهایی نفت است. در این مطالعه آزمایشگاهی از گاز خروجی تفکیک کننده مخزن A با متان ۸۵ درصد مولی استفاده شد و برای غنی کردن آن از گاز همراه میعانات گازی تفکیک کننده مخزن A استفاده شد که با نسبت های متفاوت به گاز تفکیک کننده مخزن A افزوده شد. حداقل غلظت امتزاج (MMC) گاز مخزن A برای تزریق به نفت مخزن B در شرایط فیزیکی مخزن (فشار ۴۱۰۰ psi و دمای ۲۱۵ °F) تعیین شد. همچنین همه خواص سیال تولیدی قبل و بعد از زمان میان شکنی اندازه گیری و مشاهده شد بعد از زمان میان شکنی، میزان چگالی و نسبت گاز به نفت سیال تولیدی و ترکیب های گاز خروجی تغییرات محسوسی داشته است.

واژه های کلیدی: امتزاج پذیری، غنی سازی گاز، لوله قلمی، تزریق گاز، افزایش برداشت نفت.

KEY WORDS: Miscibility, Gas enrichment, Slim tube, Gas injection, Enhanced oil recovery.

مقدمه

از نظر آزمایشگاهی، به طور معمول فرایندهای (MMC/ MMP) به وسیله لوله قلمی ایجاد می شود که لوله ای است به طول حداقل ۲۰ متر و قطر متوسط ۰٫۵ سانتی متر که با ماسه یا ذره های ریز کروی شیشه ای^(۱) به طور یکنواخت پر می شود [۳-۵]. برای اندازه گیری MMC از لوله قلمی استفاده می شود که عبورپذیری محیط متخلخل آن باید مناسب و در حد داری باشد. مشخصات لوله قلمی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

فرایندهای تزریق گاز یکی از روش های موثر برای افزایش برداشت نفت است. یکی از پارامترهای اساسی برای طراحی تزریق گاز امتزاجی، تعیین میزان حداقل غلظت گاز تزریقی (MMC) است. غلظت ترکیب های میانی به گونه ای باید باشد که بازدهی جابه جایی به ماکسیمم مقدار خود برسد. در جریان های یک بعدی که سرعت جریان نزدیک سرعت بحرانی گاز باشد، برداشت نفت به حداکثر مقدار می رسد [۱ و ۲].

*E-mail: hodatahani@yahoo.com

*عهد دار مکاتبات

(۱) Glass bead

جدول ۱- ویژگی‌های لوله قلمی.

طول لوله	۲۱۱۵ سانتی‌متر
قطر خارجی لوله	۶۳۵ میلی‌متر
قطر داخلی لوله	۳۷۷ میلی‌متر
حجم خلل و فرج محیط متخلخل	۷۵ سانتی‌متر مربع
درصد تخلخل لوله قلمی	۳۰٫۸ درصد
عبورپذیری محیط متخلخل	۸٫۷ داریسی
حداکثر فشار کاری لوله قلمی	۱۰۰۰۰ پام نسبی
حداکثر دمای قابل تحمل	۱۷۵ درجه سانتی‌گراد
قطر ذره‌های شیشه‌ای	۱۴۹ - ۱۰۵ میکرومتر

میانی گاز در نفت مخزن به صورت مایع در می‌آید. از آن جایی که نفت موجود در پشت جبهه بیشتر در معرض تماس‌های مکرر با گاز تزریقی جدید قرار دارند، به مقدار بیشتری با ترکیب‌های میانی (C_7^+) گاز ممزوج گشته و زودتر با گاز به حالت امتزاج در می‌آیند. در این مطالعه آزمایشگاهی، از ۴ نمونه گاز غنی شده حاصل از گاز همراه میعانات گازی مخزن A با گاز تفکیک کننده مخزن A با نسبت حجمی به ترتیب $3/8$ و $2/5$ و $1/8$ و $0/25$ استفاده شد. در هر آزمایش، برداشت نفت بعد از تزریق $1/2$ برابر حجم خلل و فرج^(۱) گاز تزریقی غنی شده اندازه گیری می‌شد.

فرایندهای امتزاجی

تزریق امتزاجی گاز در نفت یکی از روش‌های موثر در ازدیاد برداشت نفت از مخازن زیرزمینی می‌باشد. در جابه‌جایی امتزاجی، کشش سطحی بین نفت و گاز از بین رفته دو فاز در همدیگر حل می‌شوند و جابه‌جایی به صورت تک فازی انجام می‌شود. هر چه غلظت ترکیب‌های میانی گاز تزریقی بیشتر شود، میزان برداشت نفت افزایش می‌یابد. چون گاز تحرک بیشتری نسبت به نفت دارد، ممکن است در نخستین برخورد با نفت وضعیت امتزاج نداشته باشد، ولی در اثر پیش‌روی گاز به تدریج در اثر برخوردهای مکرر دو فاز نفت و گاز بر اثر فرایند تبخیر یا میعان اجزای نفت و گاز، ترکیب اجزای تشکیل دهنده نفت و گاز به یکدیگر نزدیک شود و در نهایت امتزاج‌پذیری صورت گیرد [۱، ۸ و ۹].

گاز تزریقی می‌تواند به صورت سبک و یا غنی شده باشد. اگر گاز تزریقی از گاز تعادلی نفت مخزن سبک تر باشد، حالت امتزاج گاز سبک و اگر گاز تزریقی از گاز تعادلی سنگین تر باشد، یعنی درصد مولی ترکیب‌های هیدروکربن‌های میانی گاز تزریقی از درصد مولی ترکیب‌های میانی گاز تعادلی نفت مخزن بیشتر باشد، حالت امتزاج گاز غنی به وجود می‌آید [۴، ۸ و ۱۰].

در صورتی که آزمایش‌های امتزاج‌پذیری از گاز سبک برای تزریق در نفت مخزن استفاده شود، مقداری از ترکیب‌های میانی نفت (C_7-C_8) در گاز تزریقی تبخیر می‌شوند و در نهایت چون گاز در جبهه نفتی جلو می‌رود غنی می‌شود و حالت امتزاج در جلو اتفاق می‌افتد که به این حالت Frontal Dynamic Miscibility می‌گویند [۱، ۸ و ۱۱].

در حالت تزریق گاز غنی شده، این گاز بعد از تماس‌های مکرر با نفت مخزن به تدریج سبک تر گشته و مقداری از ترکیب‌های

میزان نفت مرده (بدون گاز) برداشت شده پس از تزریق $1/2$ برابر حجم تخلخل اندازه‌گیری می‌شود. به طور کلی برداشت نفت با افزایش فشار یا با تغییر ترکیب‌های میانی به سرعت افزایش می‌یابد و به جایی می‌رسد که دیگر تغییر ترکیب‌های میانی، یا افزایش فشار اثر چندانی در افزایش برداشت ندارد [۳-۶].

در این مطالعه آزمایشگاهی، امتزاج‌پذیری نفت مخزن B به واسطه‌ی تزریق ۴ نمونه گاز متفاوت در فشار مخزن (۴۱۰۰ psig) و دمای مخزن ($215^\circ F$) به وسیله‌ی دستگاه لوله قلمی انجام شد. میعانات گازی حاوی مقدارهای زیادی ترکیب‌های سنگین بودند، از این‌رو، با هیچ نسبت حجمی با گاز A تک‌فاز نمی‌شد. لذا برای غنی سازی گاز A از گاز همراه میعانات گازی مخزن A با ۵۳ درصد مولی متان استفاده شد.

به طور معمول در مطالعات آزمایشگاهی تزریق امتزاجی گاز در نفت درصد نهایی برداشت نفت در لوله قلمی به مقدارهای بالاتر از ۹۰ درصد می‌رسد که بدین طریق می‌توان حداقل غلظت امتزاجی گاز را تعیین کرد [۶ و ۷].

در این مطالعه، با افزایش غلظت ترکیب‌های میانی گاز A و با غنی کردن آن با گاز همراه میعانات گازی A در نسبت‌های متفاوت حجمی از دو گاز استفاده شد. دو نمونه استفاده شده از گازهای غنی شده از گاز تعادلی نفت مخزن B سبک‌تر و دو نمونه دیگر گاز غنی شده از گاز تعادلی سنگین‌تر بود. یعنی درصد مولی ترکیب‌های میانی (C_7^+) گاز تزریقی از درصد مولی ترکیب‌های میانی گاز تعادلی نفت مخزن B بیشتر بود و حالت امتزاج گاز غنی را به وجود می‌آورد و درصد نهایی برداشت نفت بیشتر از ۹۰ درصد شد. در این حالت گاز غنی شده بعد از تماس‌های مکرر با نفت مخزن به تدریج سبک تر گشته و مقداری از ترکیب‌های

(۱) Pore Volume

جدول ۲- آنالیز کامل نفت ته چاهی B.

شماره	اجزا	مول (درصد)
۱	N _۲	۰٫۲۰۴
۲	C _۱	۴۳٫۱۷۴
۳	CO _۲	۰٫۲۶۰
۴	C _۲	۷٫۲۸۶
۵	C _۳	۴٫۷۳۹
۶	iC _۴	۰٫۹۱۵
۷	nC _۴	۲٫۴۸۳
۸	iC _۵	۱٫۳۹۶
۹	nC _۵	۱٫۷۳۸
۱۰	C _۶	۴٫۰۶۰
۱۱	C _۷	۲٫۷۶۶
۱۲	C _۸	۴٫۱۷۶
۱۳	C _۹	۳٫۶۸۶
۱۴	C _{۱۰}	۲٫۲۰۹
۱۵	C _{۱۱}	۱٫۶۵۸
۱۶	C _{۱۲} ⁺	۱۹٫۲۵۰
جمع		۱۰۰٫۰۰۰

وزن مولکولی اندازه‌گیری شده: ۱۹/۶۳ گرم در هر گرم مول.

گاز تزریقی مرکب از گاز A و گاز همراه میعانات گازی A در اثر تزریق به نفت مخزن B است. بدین منظور ۴ آزمایش جابه جایی نفت با ۴ نمونه گاز غنی شده به نسبت حجمی گاز همراه میعانات با گاز دستگاه تفکیک A به ترتیب ۳/۸ و ۲/۵ و ۰/۸ و ۰/۲۵ در فشار ۴۱۰۰ پام نسبی و ۲۱۵ °F انجام شد. تمام آزمایش‌های امتزاج‌پذیری در مدل نمایش داده شده در شکل ۱ انجام گرفت. قبل از شروع آزمایش‌های امتزاج‌پذیری، حجم خلل و فرج، درصد تخلخل و مقدار عبور پذیری لوله قلمی در ۲۱۵ درجه فارنهایت و آزمایش‌های متفاوت به وسیله‌ی تولوئن اندازه‌گیری شد. بعد از پایان هر آزمایش محیط متخلخل لوله قلمی با چندین برابر حجم خلل و فرج محلول تولوئن شستشو داده شد تا از عدم وجود هر گونه رسوب نفت باقی‌مانده در داخل لوله قلمی اطمینان حاصل شده و دستگاه برای آزمایش بعدی آماده شود. سیلندرهای ویژه نمونه‌های گاز تزریقی و نفت B و لوله قلمی در تمام مرحله‌های آزمایش‌ها در داخل حمام هوا قرار داشته و دمای آنها در ۲۱۵ درجه فارنهایت کنترل شد.

هیدروکربنی میانی گاز در نفت مخزن به‌صورت مایع در می‌آید. از آنجایی که نفت موجود در پشت جبهه بیشتر در معرض تماس های مکرر با گاز تزریقی جدید قرار دارند، به مقدار بیشتری با ترکیب‌های میانی (C_۲-C_۵) گاز ممزوج گشته و زودتر با گاز به حالت امتزاج در می‌آیند. این حالت امتزاج را Rear Dynamic Miscibility گویند [۱، ۸ و ۱۱].

ویژگی‌های نفت و گازهای تزریقی

نفت مخزن

نفت مورد نظر در تمام آزمایش‌های امتزاج‌پذیری نفت مخزن B بوده که آنالیز کامل نفت ته چاهی (well stream) در جدول ۲ آمده است. فشار نقطه حباب نفت مخزن B در دمای مخزن °F ۲۱۵ برابر ۳۶۳۱ پام نسبی است و نسبت گاز به نفت SCF/STB ۱۰۲۱ در ابتدای تمام آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد.

گازهای تزریقی

گاز مورد استفاده برای آزمایش‌های ترکیبی از گاز A با ۸۵ درصد مولی متان و گاز همراه میعانات گازی A با ۵۳ درصد مولی متان بود که آنالیز کامل این دو گاز در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. همچنین ترکیب گازهای غنی شده مورد استفاده از آزمایش به صورت زیر است:

ترکیب گاز تزریقی آزمایش اول: شامل یک حجم از گاز همراه میعانات گازی A و چهار حجم گاز A که حاوی ۷۷/۸۵ درصد مولی متان شد که آنالیز کامل آن در جدول ۵ آمده است.

ترکیب گاز تزریقی آزمایش دوم: شامل ۲/۵ حجم از گاز همراه میعانات گازی A و یک حجم گاز A که حاوی ۶۶/۱۸ درصد مولی متان گردید که آنالیز آن در جدول ۶ آمده است.

ترکیب گاز تزریقی آزمایش سوم: شامل ۰/۸ حجم از گاز همراه میعانات گازی A و یک حجم گاز A، که حاوی ۷۴/۹۳ درصد مولی متان شد که آنالیز آن در جدول ۷ ارائه شده است.

ترکیب گاز تزریقی آزمایش چهارم: شامل ۳/۸ حجم از گاز همراه میعانات گازی A و یک حجم گاز A که حاوی ۵۹/۰۱ درصد مولی متان شد که آنالیز آن در جدول ۸ نشان داده شده است.

شرح آزمایشات

هدف از این تحقیق، اندازه‌گیری و تعیین حداقل غلظت امتزاج (Minimum Miscibility Concentration or Composition)

جدول ۳- آنالیز کامل گاز A.

شماره	اجزاء	مول (درصد)
۱	N _۲	۰٫۱۵۲
۲	C _۱	۸۴٫۹۱۹
۳	CO _۲	۲٫۷۶۴
۴	C _۲	۷٫۱۳۰
۵	C _۳	۲٫۷۶۱
۶	iC _۴	۰٫۵۳۱
۷	nC _۴	۰٫۸۶۱
۸	iC _۵	۰٫۳۴۹
۹	nC _۵	۰٫۲۸۷
۱۰	C _۶ ⁺	۰٫۲۴۷
جمع		۱۰۰٫۰۰۰

وزن مولکولی اندازه گیری شده: ۱۹/۷ گرم در هر گرم مول.

جدول ۴- آنالیز کامل گاز همراه میعانات گازی مخزن A.

شماره	اجزاء	مول (درصد)
۱	N _۲	۰/۰۷
۲	C _۱	۵۳/۰۲۸
۳	CO _۲	۳/۰۲۸
۴	C _۲	۱۳/۹۸۸
۵	C _۳	۱۱/۰۷۵
۶	iC _۴	۲/۹۸۱
۷	nC _۴	۵/۹۲۰
۸	iC _۵	۲/۷۸۸
۹	nC _۵	۲/۷۱۸
۱۰	C _۶ ⁺	۴/۴۰۴
جمع		۱۰۰/۰۰۰

میانگین وزن مولکولی گاز: ۳۲/۲۶ گرم در هر گرم مول.

جدول ۵- آنالیز کامل گاز غنی شده برای آزمایش مرحله اول MMC

در فشار ۴۱۰۰ psig و دمای مخزن ۲۱۵ °F.

شماره	اجزاء	مول (درصد)
۱	N _۲	۰٫۱۳۴
۲	C _۱	۷۷٫۸۵
۳	CO _۲	۲٫۸۲
۴	C _۲	۸٫۶۵
۵	C _۳	۴٫۶۰۴
۶	iC _۴	۱٫۰۷۴
۷	nC _۴	۱٫۹۸
۸	iC _۵	۰٫۸۹
۹	nC _۵	۰٫۸۳
۱۰	C _۶ ⁺	۱٫۱۷
جمع		۱۰۰٫۰۰۰
V _۲ /V _۱ *		۰٫۲۵

میانگین وزن مولکولی گاز: ۲۲/۵۴ گرم در هر گرم مول.
نسبت حجم گاز همراه میعانات گازی به حجم گاز A: V_۲/V_۱*

جدول ۶- آنالیز کامل گاز غنی شده برای آزمایش مرحله دوم MMC

در فشار ۴۱۰۰ psig و دمای مخزن ۲۱۵ °F.

شماره	اجزاء	مول (درصد)
۱	N _۲	۰٫۱۰۴
۲	C _۱	۶۶٫۱۸
۳	CO _۲	۲٫۹۲
۴	C _۲	۱۱٫۱۶
۵	C _۳	۷٫۶۵
۶	iC _۴	۱٫۹۷
۷	nC _۴	۳٫۸۳
۸	iC _۵	۱٫۷۸
۹	nC _۵	۱٫۷۲
۱۰	C _۶ ⁺	۲٫۶۹
جمع		۱۰۰٫۰۰۰
V _۲ /V _۱ *		۲٫۵

میانگین وزن مولکولی گاز: ۲۷/۱۷۲ گرم در هر گرم مول.
نسبت حجم گاز همراه میعانات گازی به حجم گاز A: V_۲/V_۱*

جدول ۸ - آنالیز کامل گاز غنی شده برای آزمایش مرحله چهارم MMC در فشار ۱۰۰ psig و دمای مخزن ۲۱۵ °F.

شماره	اجزاء.	مول (درصد)
۱	N _۲	۰٫۱
۲	C _۱	۵۹٫۰۱
۳	CO _۲	۲٫۹۷
۴	C _۲	۱۲٫۷
۵	C _۳	۹٫۵۲
۶	iC _۴	۲٫۵۲
۷	nC _۴	۴٫۹۷
۸	iC _۵	۲٫۳۳
۹	nC _۵	۲٫۲۶
۱۰	C _۶ ⁺	۳٫۶۲
جمع		۱۰۰٫۰۰۰
V _۲ /V _۱ *		۳٫۸

میانگین وزن مولکولی گاز: ۳۰٫۰۱ گرم در هر گرم مول.
* V_۲/V_۱ نسبت حجم گاز همراه میعانات گازی به حجم گاز A.

جدول ۷ - آنالیز کامل گاز غنی شده برای آزمایش مرحله سوم MMC در فشار ۱۰۰ psig و دمای مخزن ۲۱۵ °F.

شماره	اجزاء.	مول (درصد)
۱	N _۲	۰٫۱۳
۲	C _۱	۷۴٫۹۳
۳	CO _۲	۲٫۸۵
۴	C _۲	۹٫۲۸
۵	C _۳	۵٫۳۶
۶	iC _۴	۱٫۳
۷	nC _۴	۲٫۴۴
۸	iC _۵	۱٫۱۱۲
۹	nC _۵	۱٫۰۵
۱۰	C _۶ ⁺	۱٫۵۲۸
جمع		۱۰۰٫۰۰۰
V _۲ /V _۱ *		۰٫۸

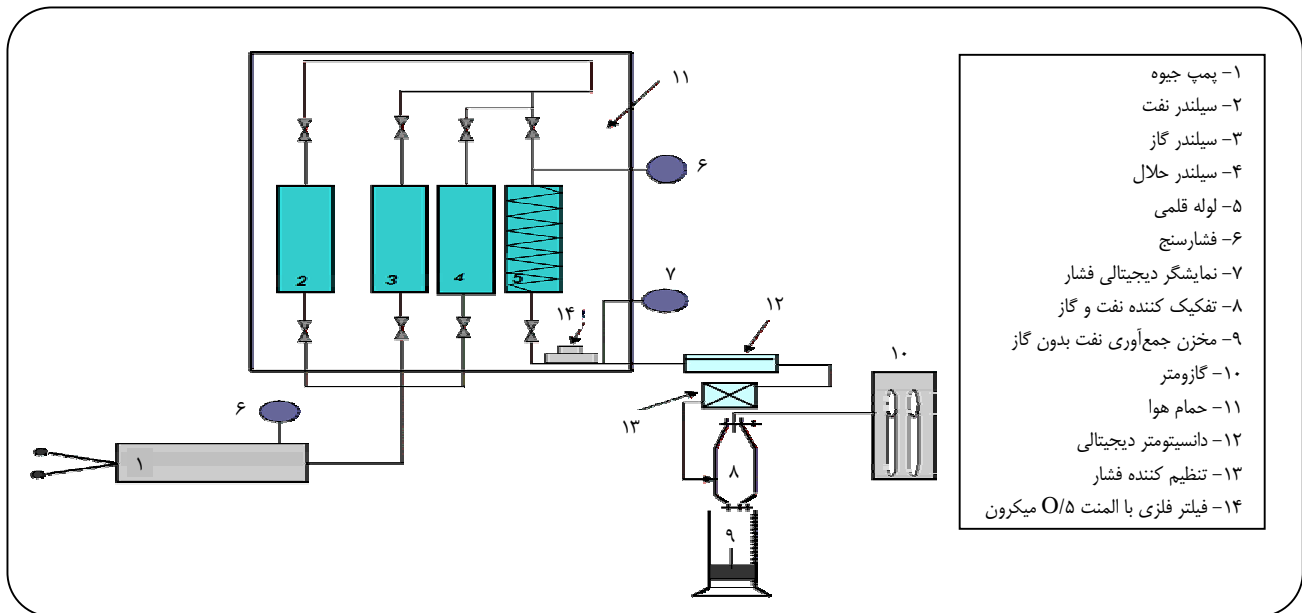
میانگین وزن مولکولی گاز: ۲۳٫۶۷ گرم در هر گرم مول.
* V_۲/V_۱ نسبت حجم گاز همراه میعانات گازی به حجم گاز A.

فشار ورودی و خروجی لوله قلمی با فشارسنج عددی با دقت ± ۵ psig اندازه‌گیری می‌شد.

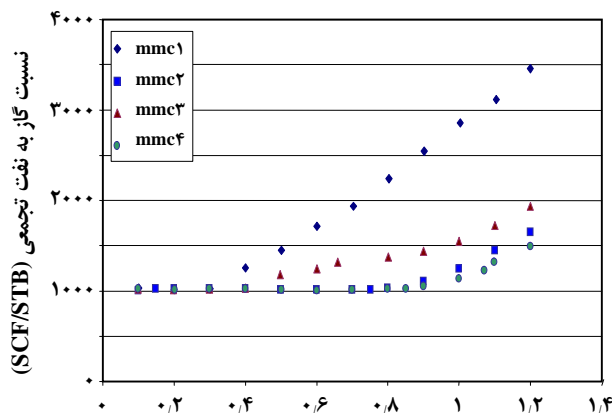
قبل از شروع هر آزمایش عبور پذیری محیط متخلخل، مقدار GOR نفت مخزن داخل لوله قلمی و آنالیز گاز همراه نفت اندازه‌گیری شد. سرعت تزریق گاز در تمام آزمایش‌های جابه‌جایی ۷٫۵ cc/hr انتخاب شد و در هر آزمایش تزریق گاز به میزان ۱٫۲ برابر حجم خلل و فرج تا حدود ۱۲ ساعت بدون وقفه به طول انجامید و به طور مداوم از خروجی لوله قلمی و بعد از تفکیک کننده نفت و گاز، نمونه‌گیری نفت و گاز انجام شد. در هر مرحله وزن نفت و حجم گازهای خروجی اندازه‌گیری شد. همچنین به وسیله‌ی دستگاه دانسیتومتر عددی که در انتهای لوله قلمی قبل از خروج نفت و گاز در مسیر جریان قرار داشت، چگالی سیال تولیدی در فشار و دمای مخزن به طور دائم ثبت شد و نیز زمان رسیدن گاز تزریقی به انتهای لوله قلمی را نشان داد. نمونه‌های گاز خروجی در زمان‌های متفاوت برای آنالیز اجزای آن به واحد گاز کروماتوگرافی ارسال شد و نمونه‌های متفاوت نفت تولیدی نیز جمع‌آوری و حجم، وزن و چگالی آن اندازه‌گیری و بعد از تزریق گاز به میزان ۱٫۲ برابر حجم خلل و فرج، عمل تزریق متوقف شد. در انتهای هر آزمایش، درصد برداشت نهایی نفت نسبت به

در تمام آزمایش‌ها ابتدا گاز غنی شده ساخته شد، بدین صورت که از تک‌فاز بودن نمونه مایعات گازی A اطمینان حاصل شد و بعد به میزان یک لیتر از آن به صورت تک‌فاز به سیلندرهای ۲ لیتری منتقل شد و با کاهش فشار سیلندر ۲ لیتری به فشار اتمسفر، کلیه ترکیب‌های گاز همراه طی چندین مرحله جدا شد. در تمام مراحل، آنالیز آن به وسیله‌ی دستگاه گاز کروماتوگرافی انجام شد. با آنالیز گاز همراه مایعات A که در پیش‌اندازه‌گیری و گزارش شده بود، چک شد. سپس حجم مشخص گاز همراه میعانات گازی تهیه شده به حجم مشخص از گاز A در دما و فشار مخزن (۲۱۵ °F و ۴۱۰۰ پام نسبی) افزوده شد. آنالیز گاز به وسیله‌ی دستگاه گاز کروماتوگرافی تعیین شد. گاز مورد نظر به عنوان گاز غنی شده برای تزریق و قراردادن در مدل تزریقی آماده شد.

در همه آزمایش‌های جابه‌جایی، ابتدا محیط متخلخل لوله قلمی با تولوئن پر شد و به مدت یک شبانه‌روز در فشار آزمایش برای تثبیت فشار و دمای مخزن قرار گرفت. تولوئن به وسیله‌ی نفت بدون گاز و سپس نفت زنده مخزن B در دمای ۲۱۵ درجه فارنهایت و فشار آزمایش با دبی ۱۰ cc/hr به میزان ۱٫۵ برابر حجم خلل و فرج لوله قلمی جابه‌جا شد. فشار تمام آزمایش‌های امتزاج‌پذیری بالاتر از فشار نقطه حباب مخزن بوده و همچنین

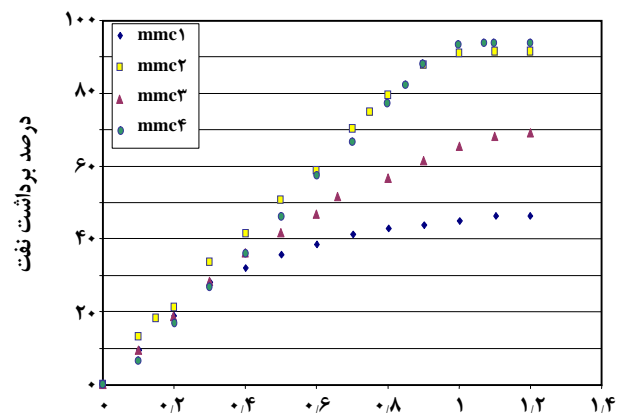


شکل ۱- مدل تزریقی طراحی شده برای آزمایش‌های اندازه‌گیری حداقل غلظت امتزاجی.



گاز تزریق شده (درصد حجم تخلخل)

شکل ۳- تغییر حجم گاز انباشتی به نفت تولیدی (Cumulative GOR) بر حسب درصد حجم خلل و فرج گاز تزریق شده ۴ مرحله آزمایش MMC در فشار ۴۱۰۰ psig و در دمای مخزن ۲۱۵ °F.



گاز تزریق شده (درصد حجم تخلخل)

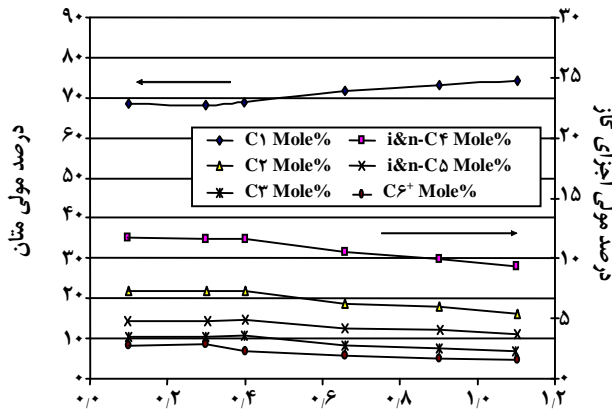
شکل ۲- تغییر درصد برداشت نفت بر حسب درصد حجم خلل و فرج گاز غنی شده ۴ مرحله آزمایش MMC در فشار ۴۱۰۰ psig و در دمای مخزن ۲۱۵ °F.

در پایان هر آزمایش، گاز موجود در لوله قلمی به آرامی طی چندین ساعت تا فشار اتمسفر تخلیه شد. سپس نفت بدون گاز باقی‌مانده در لوله قلمی به‌وسیله حلال تولوئن در دمای بالا، حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد به میزان ۵ برابر حجم تخلخل به مدت ۲ الی ۳ شبانه روز شستشو و جابه‌جا شد.

ترکیب گازهای خروجی از لوله قلمی در زمان‌های متفاوت تزریق گاز و در فشارهای متفاوت سری آزمایش‌های امتزاج‌پذیری در دمای مخزن (۲۱۵ °F) به ترتیب در شکل‌های ۴ تا ۷ آمده است.

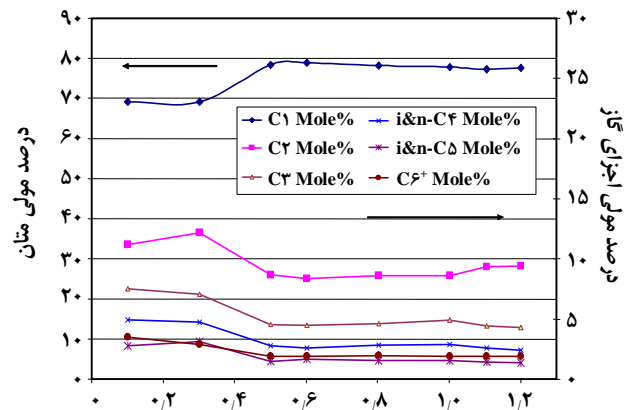
نفت مرده اولیه، زمان میان‌شکنی^(۱)، تغییرهای نسبت گاز به نفت (GOR) در طول آزمایش و همچنین مقدار نفت برداشت شده در زمان‌ها و درصدهای حجم خلل و فرج تزریقی تعیین شد (شکل ۲ و ۳). ملاحظه شد که هر چه گاز تزریقی غنی‌تر باشد، در واقع امتزاج پذیرتر بوده و زمان میان‌شکنی دیرتر اتفاق می‌افتد و میزان برداشت نفت بیشتر می‌شود. بالعکس، میزان گاز تولیدی آن کم‌تر و یا شیب تغییرهای GOR آن، نسبت به حجم خلل و فرج گاز تزریق شده، کم‌تر است.

(۱) Break through



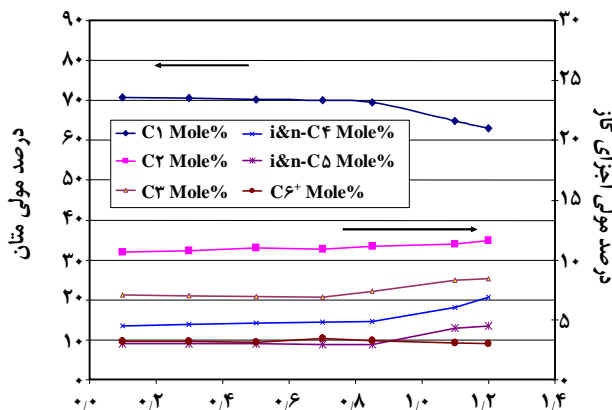
گاز تزریق شده (درصد حجم تخلخل)

شکل ۶- تغییر ترکیب‌های گاز تولیدی بر حسب حجم خلل و فرج گاز تزریق شده مرحله سوم آزمایش MMC در فشار ۱۰۰ psig و دمای مخزن ۲۱۵ °F.



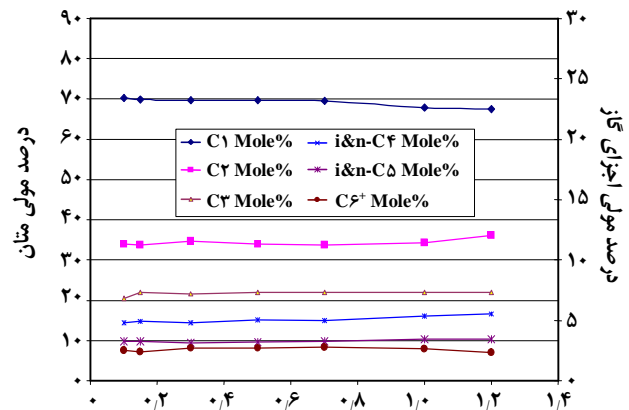
گاز تزریق شده (درصد حجم تخلخل)

شکل ۴- تغییر ترکیب‌های گاز تولیدی بر حسب حجم خلل و فرج گاز تزریق شده مرحله اول آزمایش MMC در فشار ۱۰۰ psig و دمای مخزن ۲۱۵ °F.



گاز تزریق شده (درصد حجم تخلخل)

شکل ۷- تغییر ترکیب‌های گاز تولیدی بر حسب حجم خلل و فرج گاز تزریق شده مرحله چهارم آزمایش MMC در فشار ۱۰۰ psig و دمای مخزن ۲۱۵ °F.



گاز تزریق شده (درصد حجم تخلخل)

شکل ۵- تغییر ترکیب‌های گاز تولیدی بر حسب حجم خلل و فرج گاز تزریق شده مرحله دوم آزمایش MMC در فشار ۱۰۰ psig و دمای مخزن ۲۱۵ °F.

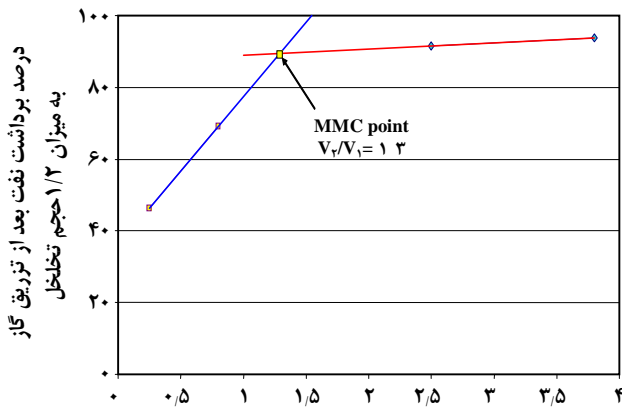
متفاوت گاز و دمای مخزن (۲۱۵ °F) در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود بعد از زمان میان شکنی همواره چگالی سیال تولیدی، آنقدر کاهش می یابد تا به چگالی گاز غنی شده مورد نظر برسد.

فشار ورودی و خروجی در حد قابل قبول همواره در طول هر آزمایش کنترل شد. تغییرهای فشار ورودی و خروجی برای آزمایش امتزاج پذیری بر حسب درصد PV گاز تزریقی برای این آزمایش در چهار مرحله در شکل ۹ آمده است.

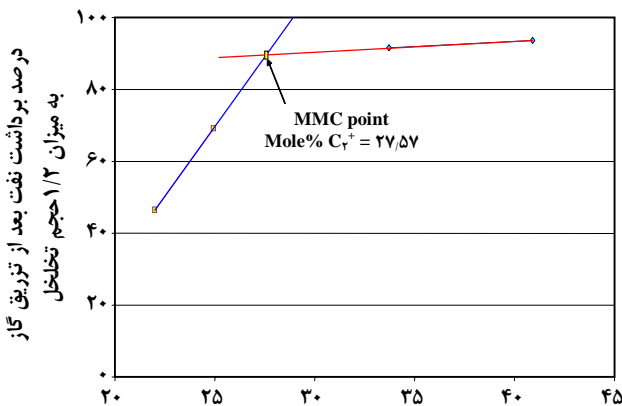
مشاهده می شود که در شکل‌های ۴ و ۶ که گاز غنی شده از ترکیب گاز تعادلی نفت مخزن سبک تر است، تغییرهای متان سیر صعودی و دیگر اجزاء بعد از زمان میان شکنی کاهش می یابند.

در شکل‌های ۵ و ۷، که ترکیب گاز تعادلی غنی تر شده، از گاز تعادلی نفت مخزن سنگین تر است. بعد از زمان میان شکنی، تغییرهای درصد متان کاهشی و دیگر اجزای افزایشی است.

تغییرهای چگالی نفت زنده B در اثر تزریق گازهای غنی شده بر حسب خلل و فرج گاز تزریق شده در غلظت‌ها و مرحله‌های

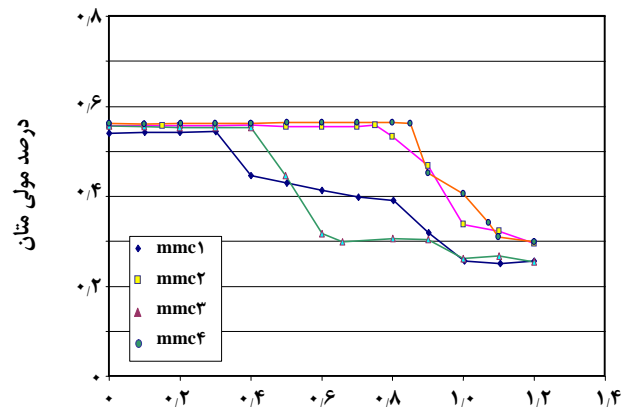
نسبت حجمی گاز همراه میعانات گازی B به گاز A، V_2/V_1

شکل ۱۰- منحنی تعیین حداقل غلظت امتزاج گاز غنی شده A با گاز همراه میعانات گازی در اثر تزریق به نفت مخزن B بر حسب نسبت حجمی گاز همراه میعانات گازی به گاز A در 4100 psig و در دمای مخزن 215°F .

نسبت حجمی گاز همراه میعانات گازی B به گاز A، V_2/V_1

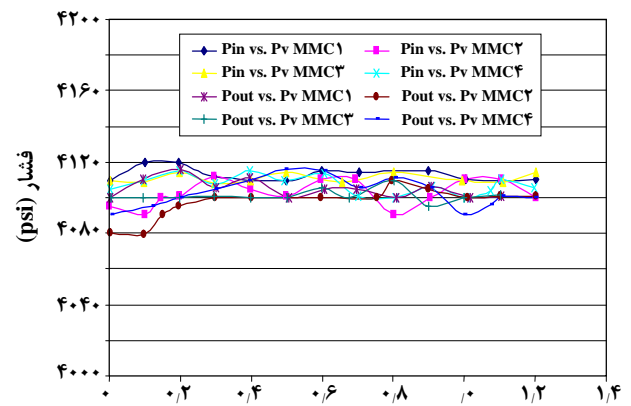
شکل ۱۱- منحنی تعیین حداقل غلظت امتزاج گاز غنی شده A با گاز همراه میعانات گازی در اثر تزریق به نفت مخزن B بر حسب درصد مولی C_2^+ در فشار 4100 psig و در دمای مخزن 215°F .

تمامی آزمایش‌های ذکر شده که شامل ۴ آزمایش بود، به مدت ۶ ماه به طول انجامید. هر آزمایش شامل ۶۰ ساعت (۲ تا ۳ شبانه‌روز) شستشوی نفت باقی‌مانده در داخل لوله قلمی با دبی بسیار پایین (۱۰ سی‌سی در ساعت) به‌نحوی که هیچ‌گونه تغییری در همگن بودن محیط متخلخل ایجاد نشد و در ضمن، هیچ نفتی داخل محیط متخلخل لوله قلمی باقی نمانده و رنگ حلال خروجی از لوله قلمی همان رنگ حلال تزریقی باشد. پس از آن، تعیین مجدد عبوردهی محیط متخلخل برای اطمینان از



گاز تزریق شده (درصد حجم تخلخل)

شکل ۸- تغییرهای چگالی سیال خروجی از لوله قلمی در اثر تزریق گاز بر حسب حجم خلل و فرج گاز تزریق شده چهار مرحله آزمایش MMC در فشار 4100 psig و دمای مخزن 215°F .



گاز تزریق شده (درصد حجم تخلخل)

شکل ۹- تغییرهای فشار ورودی و خروجی سیستم بر حسب درصد حجم خلل و فرج گاز تزریق شده چهار مرحله آزمایش در فشار 4100 psig و در دمای مخزن 215°F .

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ حداقل غلظت امتزاج (MMC) که از ترکیب گاز A و گاز همراه میعانات گازی A برای تزریق به نفت مخزن B به دست آمده است، بر حسب نسبت حجمی گاز همراه میعانات گازی به گاز A و ترکیبات C_2^+ ترسیم شده است. حداقل غلظت امتزاج (MMC) گاز A و گاز همراه میعانات گازی A در نفت مخزن B در نسبت حجمی $1/3$ حجم از گاز همراه میعانات گازی به یک حجم از گاز A با درصد مولی اجزاء میانی گاز غنی شده برابر 27.67 درصد در شرایط فشار و دمای مخزن به دست آمد.

امتزاج در می‌آیند. این حالت امتزاج را Rear Dynamic Miscibility گویند.

۳- ترکیب گازهای خروجی از لوله قلمی در طی زمان‌های متفاوت تزریق گاز تا قبل از زمان میان شکنی به تقریب ثابت می‌ماند، ولی بعد از زمان میان شکنی گازهای خروجی تغییر یافته و به ترکیب گاز غنی شده تزریقی نزدیک شده به طوری که در گازهای سبک تر از گاز تعادلی، درصد متان افزایش و درصد مجموع $C_2-C_6^+$ کاهش و برای گازهای تزریقی سنگین‌تر (غنی تر) از گاز تعادلی نفت B درصد متان کاهش و درصد مجموع $C_2-C_6^+$ افزایش یافته است.

۴- در تمام آزمایش‌های امتزاج‌پذیری، مقدار GOR پس از زمان میان شکنی به سرعت افزایش یافته و برداشت نفت به سرعت کاهش می‌یابد.

۵- برای غنی کردن گاز A با میعانات گازی A به هیچ نسبت حجمی، دو سیال با یکدیگر به صورت تک‌فاز نشدند و مشاهده شد که همواره لایه گاز در بالای سیلندر و میعانات در زیر لایه گازی قرار می‌گیرند. لذا برای غنی‌سازی گاز A از گاز همراه میعانات گازی A در نسبت‌های حجمی متفاوت استفاده شد.

۶- هرچه ترکیب‌های گاز تزریقی به ترکیب‌های گاز همراه نفت مورد آزمایش نزدیک‌تر باشد، در عمل امتزاج‌پذیری بهتر اتفاق می‌افتد.

۷- گاز سبک^(۱) در نسبت‌های بیش از ۰/۲ حجمی با میعانات گازی حاوی ترکیب‌های سنگین‌تر به‌هیچ وجه به صورت تک‌فاز گاز (در شرایط محیط و مخزن) در نمی‌آید.

همگن بودن محیط متخلخل در چند دبی متفاوت در دو روز و آزمایش فشار سیستم قبل از انجام آزمایش یک روز، تزریق نفت مرده به میزان ۱۵۰ سی‌سی با دبی ۷/۵ سی‌سی در ساعت و پس از آن تزریق نفت زنده به میزان ۱۵۰ سی‌سی با دبی ۷/۵ سی‌سی در ساعت و سپس تزریق گاز ساخته‌شده به میزان ۱/۲ حجم تخلخل با دبی ۷/۵ سی‌سی در ساعت، انجام شد. مشاهده می‌شود که انجام یک آزمایش از لحاظ زمانی بسیار وقت‌گیر است، لذا تکرار آزمایش از لحاظ زمانی مقدور نیست. از آنجایی که آزمایش‌های MMC شباهت بسیار زیادی به آزمایش‌های MMP دارد و نتیجه‌های آزمایش‌های MMP فراوانی که در این آزمایشگاه انجام شده است، در پیش به وسیله‌ی نرم‌افزار Eclipse تأیید شده است، صحت تکرارپذیری آزمایش‌های MMC محرز می‌شود.

نتیجه‌گیری نهایی

۱- حداقل غلظت امتزاج (MMC) گاز A و گاز همراه میعانات گازی A در نسبت حجمی ۱/۳ حجم از گاز همراه میعانات گازی به یک حجم از گاز A در فشار ۴۱۰۰ پام نسبی در دمای ۲۱۵ °F تعیین شد.

۲- در آزمایش‌های امتزاج‌پذیری انجام شده از گازهای غنی شده برای تزریق در نفت مخزن استفاده شد که این ترکیب‌ها بعد از تماس‌های مکرر با نفت مخزن به صورت مایع در می‌آید. از آنجایی که نفت موجود در پشت جبهه بیشتر در معرض تماس‌های مکرر با گاز تزریقی جدید قرار دارند، به‌مقدار بیشتری با ترکیب‌های میانی (C_2-C_6) گاز ممزوج شده و زودتر با گاز به حالت

تاریخ دریافت: ۱۴/۱۰/۲۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۵/۶/۲۶

مراجع

- [1] Zdenka, N., Terry, C., New Interpretation of Recovery, Mechanisms in Enriched Gas Drives, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 38th Annual Technical Meeting, JCPT, (1988).
- [2] Jones, R.T., Pashupati sah, Subromanion, S.K., Effect of Gas Enrichment Above the MME on Oil Recovery in Enriched Gas Floods, Texas, (2000).
- [3] Randall, T.E., Bennlon, D.B., Laboratory Factors Influencing Slim Tube Test Results, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 4, (1989).
- [4] Thomas, F.B., Bennion, D.B., Recent Development in Laboratory Data Sets for Determination of Miscibility Limits, *Aostr*, 2, (1991).

(۱) Lean Gas

- [5] Yuan, H., Russell, T. Johns, Simplified Method for Calculation of Minimum Miscibility Pressure or Enrichment, *SPE*, Texas, (2005).
- [6] Batycky, J.P., Wu, R.S., Evaluation of Miscibility from Displacements Tests, 39th Annual Technical Meeting, *Pet. Soc. of CIM.*, Calgary, (1988).
- [7] Hoier, L., Whiston, C.H., Miscible Variation in Compositionally Grading Reservoir, *SPE*, Annual Technical Conference and Exhibition in Texas, October (2000).
- [8] Fredi, Stalkup, J.R., Miscible Displacement, Society of Petroleum Engineers of AIME New York, (1984).
- [9] Egwuene, A.M., Jones, R.T., Li, Y., Improved Fluid Characterization for Miscible Gas Floods, *SPE*, (2005).
- [10] Yuan, H. et al., Improved MMP Correlations for CO₂ Floods using Analytical Gas Flooding Theory, *SPE*, October (2005).
- [11] Johns, R.T., Orr, F.m., Miscible Gas Displacement of Multicomponent Oils, *SPTJ*, **39**, March (1996).