

# ارزیابی و بهبود روش اختلاط تماس تعادلی در سامانه‌های گاز میعانی همراه با مطالعه‌های موردی از مخازن ایران

محمدهادی پرهام‌وند\*<sup>+</sup>

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده نفت و گاز

شهاب گرامی

تهران، شرکت ملی نفت ایران، پژوهشکده ازدیاد برداشت

محمدعلی عمادی

تهران، شرکت ملی نفت ایران، مدیریت پژوهش و فناوری

احسان مؤمنی

فارس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی نفت

**چکیده:** اهمیت به دست آوردن نمونه‌های نماینده در مدیریت بهینه مخزن بر اهل فن پوشیده نیست. همیشه تلاش شده است که نمونه‌های نماینده با استفاده از روش‌های استاندارد در زمان‌های اولیه تولید به دست آیند. بر اساس نظریه‌های معتبر، عملیات نمونه‌گیری در مخازن گاز میعانی می‌بایست پیش از کاهش فشار بیشتر مخزن به زیر فشار نقطه شبنم اولیه انجام شود. زیرا تنها در این بازه محدود می‌توان نمونه‌های نماینده را به دست آورد. اما روش اختلاط تماس تعادلی (ECM) این ادعا را دارد که می‌تواند سیال اولیه درجا را از نمونه‌های غیر نماینده بدون محدودیت زمانی به دست آورد، بنابراین نظریه‌های معتبر را نقض می‌کند. این اختلاف عظیم بین استانداردهای حاکم بر نمونه‌گیری و روش ECM، باعث شد که در این پژوهش روش ECM در ۲ منظر بررسی و آزمایش و نتیجه‌های آن با روش بازترکیب مقایسه شود. مطالعه‌های موردی از مخازن گاز میعانی ایران و مدل‌های فرضی بر پایه داده‌های واقعی PVT، منظرهای مورد بررسی می‌باشند. برای شبیه‌سازی روش ECM از توصیف جزئی معادله حالت در یک فرایند پویا برای اولین بار استفاده شد. همچنین مدل‌هایی فرضی توسط شبیه‌ساز ترکیبی ساخته شدند و نمونه‌گیری در شرایط تخلیه انجام شد. سپس روش‌های ECM و بازترکیب روی نمونه‌های به دست آمده اجرا شدند. در پایان، نتیجه‌گیری شد که روش ECM در تمام مخازن گاز میعانی قابل اجرا نمی‌باشد و نیاز به اعمال تغییرهایی دارد. برای بهبود آن، روش ECM اصلاح شده ارایه شد و نتیجه گرفته شد که این روش در هر شرایطی قابل اجرا می‌باشد و از دقت بسیار بالایی برخوردار است و دقت آن با غنی شدن گاز میعانی روندی کاهشی دارد. همچنین روش ECM در دو میدان گاز میعانی از مرکز و جنوب ایران به عنوان مطالعه‌های موردی بررسی شد. با این بررسی میدانی در مخازن گاز میعانی ایران، دقت روش ECM براساس ویژگی‌های سنگ و سیال مخازن ایران واری و دقت بالای آن تأیید شد. در پایان مشخص شد که استانداردها و نظریه‌های فعلی نمونه‌گیری با روش ECM و ECM اصلاح شده نقض می‌شوند. با مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از روش ECM و ECM اصلاح شده و بازترکیب دیده می‌شود که روش‌های ECM و ECM اصلاح شده بسیار دقیق‌تر از روش بازترکیب می‌باشند. بنابراین روش‌های دقیق اما بدون استفاده از ECM و ECM اصلاح شده بایستی جایگزین روش نادقیق اما مورد استفاده بازترکیب شوند.

+E-mail: m.h.parhamvand@gmail.com , m.parhamvand@srbiau.ac.ir

\*عهد دار مکاتبات

**واژه‌های کلیدی:** روش اختلاط تماس تعادلی، روش بازترکیب، نمونه‌گیری، نمونه‌های نماینده و غیرنماینده، روش ECM اصلاح شده.

**KEY WORDS:** Equilibrium contact mixing method, Recombination method, Sampling, Non-representative and representative samples, Modified ECM method.

## مقدمه

بدون اینکه نمونه نماینده سیال اولیه مخزن باشد. به این دلیل که فشار نقطه شبنم تابع یکنواختی از GOR (نسبت گاز به نفت تولیدی) نمی‌باشد [۳]. Danesh با بررسی رفتار تشکیل میعانات یکی از مخازن گاز میعانی دریای شمال در دمای مخزن با نسبت GORهای گوناگون، نتیجه گرفت که روش بازترکیب روش مناسبی برای ساخت سیال اولیه نیست [۴]. بررسی دیگری در تهیه سیال اولیه مخازن گاز میعانی توسط Chopra و Carter انجام شده است [۵]. آن‌ها نظریه جریان پایای دو فازی را که توسط Miller و O'Dell ارائه شده بود [۶] و بعدها Fussell آن را اصلاح کرد [۷] اثبات کردند. این نظریه رفتار یک تک چاه را در سامانه‌های گاز میعانی زمانی که با کاهش فشار ته چاهی به زیر فشار اشباع سیال مخزن، ریزش میعان اتفاق می‌افتد، پیشگویی می‌کند. بر پایه مطالعه‌های آن‌ها نمونه‌گیری روی زمینی و بازترکیب میعان و گاز تولیدی با GOR تولیدی و یا آزمایشی، فقط تا زمانی که جریان پایا و قطره‌های میعان در نزدیکی چاه متحرک می‌باشند، می‌تواند سیال اولیه را بسازد. زمانی که فشار بیشتر مخزن به زیر فشار نقطه شبنم اولیه می‌افتد، بازترکیب نمی‌تواند ترکیب سیال اولیه مخزن را بسازد، زیرا اجزای سنگین، غیرمتحرک بوده و تولید نمی‌شوند. بنابراین زمان‌بندی، عامل مهمی در به دست آوردن نمونه‌ای نماینده از سیال اولیه مخزن است. روشن است که نمونه‌گیری در زمان‌های اولیه تولید بسیار عقلانی است و به محض اینکه تولید باعث ایجاد ناحیه دو فازی در اطراف چاه شود، به دست آوردن نمونه سیال اولیه مخزن به تقریب غیر ممکن است.

به دلیل عدم قطعیت و محدودیت‌های روش بازترکیب در تخمین سیال اولیه، Olzen و Reffstrup تغییر ترکیب در طول نمونه‌گیری روی زمینی در شرایط غیرایده آل را بررسی کردند [۸]. آن‌ها از شبیه‌سازی نفت سیاه اصلاح شده برای تولید از یک مخزن گاز میعانی کم مایه و دارای نفوذپذیری<sup>(۳)</sup> پایین و از یک مدل معادله حالت برای شبیه‌سازی ترکیب دوباره نمونه‌های

هدف نمونه‌گیری از مخازن، جمع آوری نمونه‌ای نماینده از سیال موجود در مخزن در زمان نمونه‌گیری بود. یک نمونه غیرنماینده نمی‌توانست ویژگی‌های سیال موجود در مخزن را نشان دهد. زمانی که نمونه نماینده از مخزن به دست نیامده بود، عدم قطعیت چشمگیری در میزان هیدروکربن در جای اولیه وجود داشت. این عدم قطعیت باعث می‌شد که تأسیسات روی زمینی بیشتر از حد استاندارد طراحی شوند.

آماده سازی چاه قبل از نمونه‌گیری به طور معمول لازم و حیاتی بود. چاه آزمایشی اولیه یا عملیات‌های عادی تولید اغلب باعث می‌شوند که سیال اطراف حفره چاه، ترکیبی متفاوت با سیال اولیه مخزن داشته باشد. هدف آماده سازی چاه زدودن این سیال غیرنماینده بود. آماده‌سازی چاه شامل تولید از چاه با نرخ است که باعث شود سیال تغییر کرده به درون حفره چاه حرکت کند و سیال تغییر نکرده از ناحیه‌های دوردست مخزن جایگزین آن شود. آماده سازی چاه زمانی که فشار سیال مخزن در شرایط حاکم بر مخزن در و یا نزدیک فشار اشباع می‌باشد، اهمیت ویژه‌ای داشت. زیرا در این هنگام تولید از مخزن باعث کاهش فشار به کمتر از فشار اشباع در نزدیکی دهانه چاه و در نتیجه تغییر ترکیب سیال جاری به دهانه چاه می‌شود [۱]. Alexander و McCain از شبیه‌سازی ترکیبی<sup>(۱)</sup> برای مطالعه آماده سازی چاه‌های گاز میعانی استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نمونه‌های نماینده مخازن گازهای میعانی اشباع می‌توانند در مرحله اولیه تخلیه با نمونه‌گیری در نرخ‌های پایین (با کمترین افت فشار)، حتی زمانی که فشار جریانی ته چاهی پایین‌تر از نقطه شبنم اولیه است، به دست آیند. آن‌ها همچنین نشان دادند که نرخ‌های تولید باید پایدار شده باشند؛ این پایدارسازی می‌تواند از چند روز (مخازن با نفوذپذیری متعادل<sup>(۲)</sup>) تا چندین ماه (مخازن با نفوذپذیری پایین) زمان لازم داشته باشد [۲].

Standing هشدار داد که فشار نقطه شبنم نمونه گاز میعانی می‌تواند پایین‌تر، برابر یا بیشتر از نقطه شبنم اولیه باشد،

(۱) Compositional simulation

(۲) Moderate-permeability

(۳) Permeability

سیال اولیه مخزن را به تقریب قابل قبول باز ساخت می‌کند و استفاده از آن در شرایط تخلیه ممکن نیست. در نتیجه روش ECM تغییر داده شد. ابتدا نمونه جریان چاه در دمای مخزن به حالت تعادل رسانده شد و نقطه شبنم برای نمونه جریان چاه به دست آمده و سپس میعان تعادلی به دست آمده را به گاز تعادلی به دست آمده در فشار اشباع نمونه جریان چاه تا رسیدن به ترکیبی با فشار اشباع سیال اولیه مخزن تزریق شد.

بنابراین در صورتی که در زمان اولیه تولید نمونه‌گیری از مخزن گاز میعانی انجام نشده باشد و نمونه‌های نماینده به دست نیامده باشند. با نمونه‌گیری در هر زمانی و با استفاده از نمونه‌های غیر نماینده با روش ECM اصلاح شده می‌توان سیال اولیه مخزن را به دست آورد. در این مقاله با بررسی و مقایسه روش‌های بازترکیب، ECM و اصلاح ECM شده در مثال‌های گوناگونی این نتیجه به دست می‌آید که به طور کلی روش ECM اصلاح شده بسیار دقیق‌تر از روش بازترکیب می‌باشند و این روش بر خلاف روش‌های بازترکیب و ECM، بدون هیچ محدودیتی قابلیت باز ساخت سیال اولیه مخزن را دارد. بنابراین روش جدید ECM اصلاح شده بایستی جایگزین روش مورد استفاده ولی غلط بازترکیب شود.

## روش اختلاط تماسی تعادلی (ECM)

### مدلسازی مخزن مصنوعی

#### معرفی روش

به دلیل ناشناختگی روش ECM در ابتدا این روش معرفی می‌شود. روش ECM در سامانه‌های گاز میعانی در ابتدا زیراشباع با عنوان «ECM2 اصلاح شده» توسط *Fevang* و *Whitson* ارائه شده است. شیوه انجام این روش در آزمایشگاه به این صورت است که نمونه جریان چاه به حالت تعادل در دما و فشار فعلی مخزن برده می‌شود. تمام نفت تعادلی به ظرف دیگری در فشار ثابت انتقال می‌یابد و گاز تعادلی در سلول PVT باقی می‌ماند. نفت تعادلی به تدریج به سلول PVT که دارای گاز تعادلی است تزریق می‌شود. پس از هر تزریق نقطه شبنم اندازه‌گیری می‌شود، زمانی که نقطه شبنم به نقطه شبنم اولیه مخزن رسید؛ سیال به دست آمده تقریب خوبی از ترکیب سیال اولیه مخزن خواهد بود [۹].

یک شبیه‌ساز ترکیبی برای ساخت مدل‌های مصنوعی مخزن مورد استفاده قرار گرفت. سپس ویژگی‌های سیال‌های واقعی

تفکیک‌گر استفاده کردند. در مطالعه این پژوهشگران فشار نقطه شبنم جریان چاه کمتر از فشار نقطه شبنم مخزن، ولی بیشتر از فشار ته چاهی می‌باشد. آن‌ها روشی برای محاسبه ترکیب سیال اولیه مخزن با انطباق فشار نقطه شبنم سیال اولیه مخزن توصیه کردند. *Whitson* و *Fevang* روش *Olzen* و *Reffstrup* را برای انواع مخازن گاز میعانی به کمک شبیه‌سازی ترکیبی گسترش دادند. آن‌ها روشی آزمایشگاهی با عنوان اختلاط تماس تعادلی (ECM)<sup>(۱)</sup> برای به دست آوردن سیال اولیه از نمونه‌های جمع آوری شده را توصیه نمودند. روش آن‌ها بر پایه اختلاط نمونه‌های تفکیک‌گر و به تعادل رساندن مخلوط به دست آمده در شرایط اولیه اشباع طی چند تماس می‌باشد [۹]. آن‌ها ادعا داشتند که این روش بدون محدودیت زمانی و در هر شرایطی قابل اجراست.

در این مطالعه، به دلیل اختلاف بین استانداردهای فعلی نمونه‌گیری که بر نظریه *Chopra* و *Carter* استوار می‌باشند و ادعاهای روش ECM، این روش ارزیابی شد. این ارزیابی روی دو میدان گاز میعانی ایران و مدل‌های فرضی از مخازن گاز میعانی غنی و کم مایه انجام شد. از طرف دیگر روش ECM برای اولین بار در حالت دینامیک با توصیف جزئی معادله حالت شبیه سازی شد. سرانجام این نتیجه به دست آمد که با وجود اینکه روش ECM در مطالعه‌های موردی دقیق بوده ولی در مدل‌های فرضی در شرایط تخلیه غیر قابل اجراست و نیاز به اصلاح دارد. بنابراین در این مطالعه، روش ECM با ارایه اصلاحیه تکمیل شد.

*Whitson* و *Fevang* در توضیح روش ECM پیشنهاد کرده بودند که ابتدا بایستی نمونه جریان چاه در دما و فشار فعلی مخزن به تعادل برده شود. سپس نفت تعادلی به تدریج به سلول PVT که دارای گاز تعادلی است تا زمانی که نقطه شبنم ترکیب به دست آمده برابر نقطه شبنم اولیه مخزن شود، تزریق شود. روش ECM پیشنهادی *Whitson* و *Fevang* دارای محدودیت فشاری می‌باشد. در این روش باید نقطه شبنم نمونه جریان چاه، بیشتر از فشار فعلی مخزن باشد تا فرایند به تعادل رسانی نمونه جریان چاه در دما و فشار فعلی مخزن ممکن شود. اما در شرایط تخلیه فشار نقطه شبنم نمونه جریان چاه اغلب به دلیل سبک شدن سیال تولیدی، کمتر از فشار فعلی مخزن است و نمونه جریان چاه تک فاز گاز می‌باشد. بنابراین استفاده از روش ECM در شرایط تخلیه ممکن نمی‌باشد. همچنین روش بازترکیب نیز فقط در شرایط اولیه تولید،

(1) Equilibrium Contact Mixing

مخازن گاز میعانی (چاه شماره ۷ از شرکت Good Oil [۱۱]، [۱۰]) به عنوان گاز میعانی غنی و یکی از مخازن گاز میعانی جنوب ایران به عنوان گاز میعانی کم مایه) به آن‌ها وارد می‌شوند. ویژگی‌های سیالات از توصیف معادله حالت (Peng- Robinson سه پارامتری اصلاح شده همراه با تصحیح گرانیوی توسط رابطه Lohrenz-Bray-Clarck) به دست آمد. برخی از ویژگی‌های مهم این مدل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در این مقاله از تغییر ترکیب با عمق، چشم پوشی شده و مخزن برای جلوگیری از تأثیر ناهمگنی روی دقت روش ECM، همگن در نظر گرفته شده است.

#### سامانه گاز میعانی غنی

ناحیه تولیدی این مدل مخزن ۴۰۰ فوت می‌باشد. دما و فشار اولیه مخزن به ترتیب  $263^{\circ}\text{F}$  و  $5760\text{ psia}$  می‌باشند. فشار اشباع سیال اولیه مخزن  $3202\text{ psia}$  است. نمونه‌ها از تفکیک‌گر اولیه جمع آوری می‌شوند. ( $T=120^{\circ}\text{F}$ ,  $P=800\text{ psia}$ )

پس از تقریباً  $1362$  روز تولید با نرخ ثابت  $10\text{ mmscf/day}$  از این مخزن، فشار عمده مخزن به کمتر از فشار نقطه شبنم اولیه می‌رسد. در شکل ۱ این اتفاق با تغییر روند CGR در نمودار نسبت میعان به گاز تولیدی (CGR)<sup>(۱)</sup> در مقابل زمان، نشان داده شده است. بنابراین روش بازترکیب تنها می‌تواند تا زمانی که CGR ثابت است استفاده شود، ولی روش ECM در هر CGR ای قابل اجراست. نمونه-گیری در زمان‌های گوناگون از ۱ روز تا ۳۰ سال پس از شروع تولید اجرا شد. اهمیت به دست آوردن ترکیب سیال اولیه مخزن پس از مدت زمان طولانی، منجر به این شد که بررسی در شرایط تخلیه (سال ۳۰ام) انجام شود.

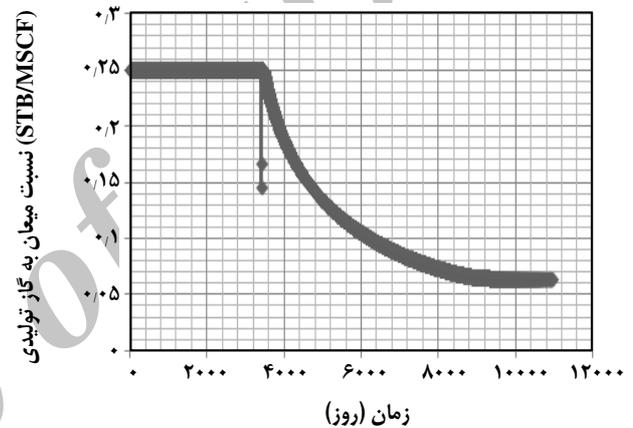
#### سامانه گاز میعانی کم مایه

ناحیه تولیدی این مدل مخزن ۴۰۰ فوت می‌باشد. دما و فشار اولیه مخزن به ترتیب  $220^{\circ}\text{F}$  و  $3500\text{ psia}$  می‌باشند. فشار اشباع سیال اولیه مخزن توسط آزمایش انبساط ترکیب ثابت (CCE)  $2621.75\text{ psia}$  به دست آمده است. نمونه‌ها از تفکیک‌گر اولیه جمع آوری می‌شوند. ( $T=120^{\circ}\text{F}$ ,  $P=800\text{ psia}$ )

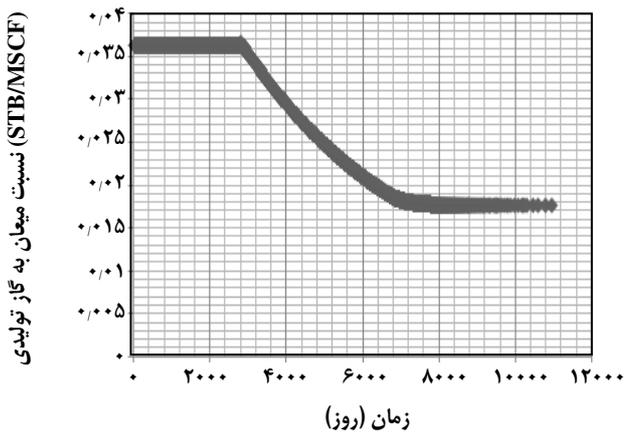
پس از به تقریب  $2800$  روز تولید با نرخ ثابت  $10\text{ mmscf/day}$  از این مخزن، فشار عمده مخزن به کمتر از فشار نقطه شبنم اولیه می‌رسد. در شکل ۲ این اتفاق با تغییر روند CGR در نمودار نسبت میعان به گاز تولیدی در مقابل زمان، نشان داده شده است. بنابراین

جدول ۱- ویژگی‌های مدل مصنوعی.

۰/۱۶	تخلخل
۲۰۲ md	نفوذپذیری در جهت r
۲۰/۲ md	نفوذپذیری در جهت z
$470E^{-6}$	تراکم پذیری سنگ مخزن
۰/۲۲	اشباع آب همزاد
۱۰ لایه با فاصله‌های لگاریتمی	تعداد لایه‌ها در جهت r
یک لایه	تعداد لایه‌ها در جهت $\theta$
۱۵ لایه با اعماق ۲۰ یا ۳۰ فوت	تعداد لایه‌ها در جهت z

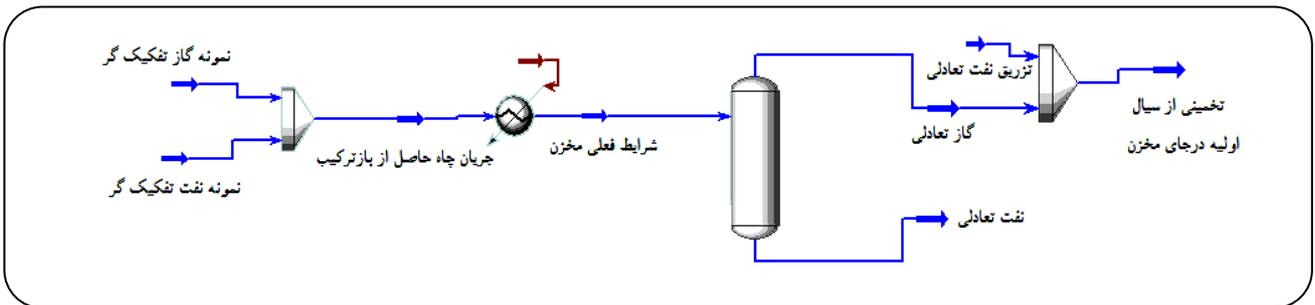


شکل ۱- نسبت میعان به گاز تولیدی در مقابل زمان (سامانه‌ی گاز میعانی غنی).



شکل ۲- نسبت میعان به گاز تولیدی در مقابل زمان (سامانه کم مایه).

(۱) Condensate Gas Ratio



شکل ۳- شبیه‌سازی دینامیک روش ECM با تأسیسات سطح الارضی.

چاه حفاری شده است و چاه ۱۶م در حال حفاری می‌باشد. این میدان دارای تولید تجمعی  $1.924E^{+9}$  Mscf گاز و  $48.904$  MMbbl میعانه‌ها است و نرخ تولید روزانه آن  $424.095$  MMscf/day می‌باشد. از این مقدار تولید، تولید روزانه از لایه اول از چاه‌های ۲، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ و تولید روزانه لایه دوم از چاه‌های ۱، ۳ و ۴ و تولید روزانه لایه سوم از چاه ۵، ۹ و ۱۴ می‌باشد. چاه ۸ به علت تولید آب از مدار تولید خارج شده است و مشبک‌های چاه ۷ به دلیل افت فشار تخطانی و چاه ۵، ۶ و ۹ به دلیل تولید آب در لایه سوم مسدود شده‌اند و هم‌اکنون تولید این چاه‌ها از لایه اول و دوم می‌باشد. همچنین چاه شماره ۱۵ در لایه دوم و سوم تکمیل شده است.

در این مقاله داده‌های نمونه‌گیری اخیر مخزن (۲۰۱۱ میلادی) از چاه شماره ۷ که از لایه اول تولید می‌کند، مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین داده‌های نمونه‌گیری اولیه از چاه شماره ۲ که در سال ۱۹۸۶ میلادی به دست آمده است، به عنوان نمونه سیال اولیه لایه اول استفاده شده است.

سطح تماس گاز/ آب در عمق ۱۰۴۸۲ فوتی زیر سطح دریا واقع شده است. فشار مخزن در عمق مبنای ۹۰۲۲ فوت زیر سطح دریا  $5350$  psia است. دمای مخزن  $208^{\circ}F$  می‌باشد. از نمونه‌گیری اولیه فشار نقطه شبنم  $3875$  psia در این دما به دست آمده است.

#### میدان «ب»

این میدان در سال ۱۹۵۸ میلادی در مرکز ایران کشف شده است. تولید از این میدان با حفر چاه شماره ۲ در سال ۱۹۵۹ میلادی آغاز شده است. ۹ حلقه چاه در این میدان از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۰۵ میلادی حفاری شده است. اما در حال حاضر فقط ۴ چاه (چاه‌های شماره ۲، ۳، ۵ و ۸) در حال تولید می‌باشند و چاه‌های دیگر متروک شده و یا خارج از ساختار می‌باشند. مقدار گاز و میعان تولیدی انباشت

روش بازترکیب تنها می‌تواند تا زمانی که CGR ثابت است استفاده شود، ولی روش ECM در هر CGR ای قابل اجراست. نمونه‌گیری در زمان‌های گوناگون از ۱ روز تا ۳۰ سال پس از شروع تولید اجرا شد. اهمیت به‌دست آوردن ترکیب سیال اولیه مخزن پس از مدت زمان طولانی، منجر به این شد که بررسی در شرایط تخلیه (سال ۳۰م) انجام شود.

#### مدلسازی روش ECM

به دلیل پیچیدگی روش ECM از دو شیوه برای مدل‌سازی دینامیک این روش برای اولین بار استفاده می‌شود:

(۱) استفاده از تجهیزهای سطح الارضی (تفکیک‌گر و مخلوط‌کن) در یک نرم افزار پایین دستی همراه با چک کردن مداوم نقطه شبنم به کمک نرم افزار PVT (شکل ۳):

(۲) تعریف کردن روش‌های اختلاط و ترکیب دوباره و انجام آزمایش تفکیک‌گر توسط توصیف جزئی معادله حالت و استفاده از حدس و خطا در واریسی مداوم نقطه شبنم سیال‌های به دست آمده تا رسیدن به نقطه شبنم اولیه

نتیجه‌های به‌دست آمده از هر دو شیوه عقلانی و نزدیک به هم می‌باشند. این تأییدی بر درستی شیوه‌های مدل‌سازی است. در این مقاله از شیوه دوم برای مدل‌سازی روش ECM استفاده شده است.

#### مطالعه‌های موردی

##### میدان «الف»

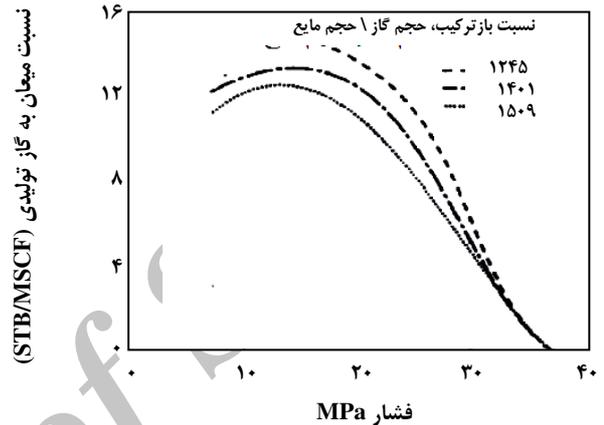
این میدان گاز میعانی با اندازه‌های تقریبی  $21.75 \times 7.5$  کیلومتر در جنوب ایران واقع است. این میدان دارای سه لایه گوناگون و متشکل از دو مخزن می‌باشد. در این میدان تا به حال ۱۵ حلقه

بنابراین ۳۰امین سال تولید به عنوان شرایط تخلیه در نظر گرفته شد. در این زمان فشار فعلی مخزن ۱۵۰۰ psia بود که از فشار اشباع سیال اولیه مخزن بسیار پایین تر بود. برای تهیه سیال اولیه درجای مخزن از روش‌های ترکیب دوباره و ECM استفاده شد. همان‌گونه که بیان شد روش ترکیب دوباره روش مناسبی برای ساخت سیال اولیه مخزن نمی‌باشد و از علت‌های آن کوهانی بودن نمودار جزء حجمی میعان در مقابل فشار (شکل ۴) است، یعنی با استفاده از یک نسبت گاز به نفت در ترکیب دوباره یک نوع سیال در دو فشار متفاوت به دست می‌آید. بنابراین قطعیتی در سیال ساخته شده با روش ترکیب دوباره وجود ندارد [۱۲]. همچنین روش ترکیب دوباره تنها با استفاده از نمونه‌های نماینده شاید بتواند تخمینی از سیال اولیه را به دست آورد. اما به دلیل اینکه با نمونه‌گیری در شرایط تخلیه تنها نمونه‌هایی غیر نماینده به دست می‌آیند. استفاده از روش بازترکیب عقلانی نیست و خطای بسیاری دارد (جدول ۳). روش ECM به شیوه ای که توسط *Whitson* و *Fevang* ارایه شده بود، نیز قابل اجرا نبود (شکل ۵). زیرا این روش زمانی که نقطه شبنم نمونه جریان چاه بالاتر از فشار فعلی مخزن باشد قابل اجراست. ولی در زمان نمونه‌گیری در این مخزن فشار نقطه شبنم نمونه جریان چاه کمتر از فشار فعلی مخزن است. بنابراین تنها یک فاز (بخار) در فشار فعلی مخزن وجود دارد. این اتفاق باعث شد که روش ECM اصلاح شود. بر طبق این اصلاحیه، پیشنهاد می‌شود که به جای اینکه تفکیک جریان چاه در فشار فعلی مخزن انجام شود، به منظور جلوگیری از رخ دادن شرایط تک فازی بایستی این تفکیک در فشار نقطه شبنم جریان چاه انجام شود. سپس نفت تعادلی به گاز تعادلی تا رسیدن فشار اشباع سیال به دست آمده به نقطه شبنم سیال اولیه تزریق شود (شکل ۶). بنابراین با استفاده از روش ECM اصلاح شده (روش پیشنهادی در این مقاله) دیگر لازم نیست ابتدا فشار اشباع جریان چاه تولیدی واریسی شود تا بالاتر از فشار فعلی مخزن باشد و این روش دیگر در تمام شرایط فشاری و زمانی قابل اجراست. فلوجارت روش‌های ECM و ECM اصلاح شده در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند.

سیال اولیه مخزن، ترکیب‌های تخمین زده شده با روش‌های بازترکیب و ECM اصلاح شده پس از ۳۰ سال تولید در جدول شماره ۳ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، روش بازترکیب فقط جریان چاه به دست آمده را تخمین می‌زند و نمی‌تواند سیال اولیه مخزن را به دست آورد.

جدول ۲- شرایط اخیر نمونه‌گیری از میداین مطالعات موردی.

میدان	الف	ب
فشار تفکیک‌گر اولیه	۸۰۰ psig	۳۰۰ psig
دمای تفکیک‌گر اولیه	۹۵ °F	۱۱۳ °F
نسبت گاز به نفت تولیدی	۵۱.۶۶۸ MSCF/day	۸.۰۷۲ SCF/day
فشار فعلی مخزن	۳۰۹۰ psig	۳۰۰۰ psig



شکل ۴- جزء حجمی میعان سیال به دست آمده با استفاده از ترکیب دوباره در مقابل فشار.

تا سال ۲۰۰۶ میلادی به ترتیب  $۸.۲۶ E^{+۷}$  Mscf و  $۲.۳۳ E^{+۷}$  bbl می‌باشند. میزان گاز اولیه درجا  $۳.۰۵ E^{+۱۱}$  ft<sup>3</sup> تخمین زده شده است. این مخزن ۷ لایه دارد. لایه‌های ۱ و ۲ بسیار شکافدار و لایه‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ شکاف‌های کمتری دارند. لایه‌های ۶ و ۷ شکافدار نمی‌باشند. لایه‌های ۱ تا ۶ بیش از ۷۰٪ گاز درجای مخزن را دارا می‌باشند و لایه ۷ به تقریب با آب اشباع شده است. سطح تماس گاز/آب  $۵۹۸۷.۵۳$  فوت زیر سطح دریاست. دمای مخزن  $۲۱۷$  °F است. از نمونه‌گیری اولیه فشار نقطه شبنم ۵۵۶۱.۳۵ psia در این دما به دست آمده است. شرایط فعلی نمونه‌گیری (۲۰۱۱) در جدول ۲ برای هر دو میدان آمده است.

## نتیجه‌ها و بحث

### مخزن گاز میعانی کم مایه مصنوعی در ابتدا زیر اشباع

داده‌های واقعی PVT یکی از مخازن گاز میعانی جنوب ایران که از آزمایشگاه به دست آمده است به یک مدل فرضی مخزن با ویژگی‌هایی نزدیک به مخازن ایران وارد شد. هدف به دست آوردن سیال اولیه مخزن با نمونه‌گیری از تفکیک‌گر در شرایط تخلیه بود.

جدول ۳- نتیجه‌های روش ECM اصلاح شده در قیاس با ترکیب دوباره و ترکیب سیال اولیه پس از ۳۰ سال تولید از مخازن گاز میعانی کم مایه و غنی.

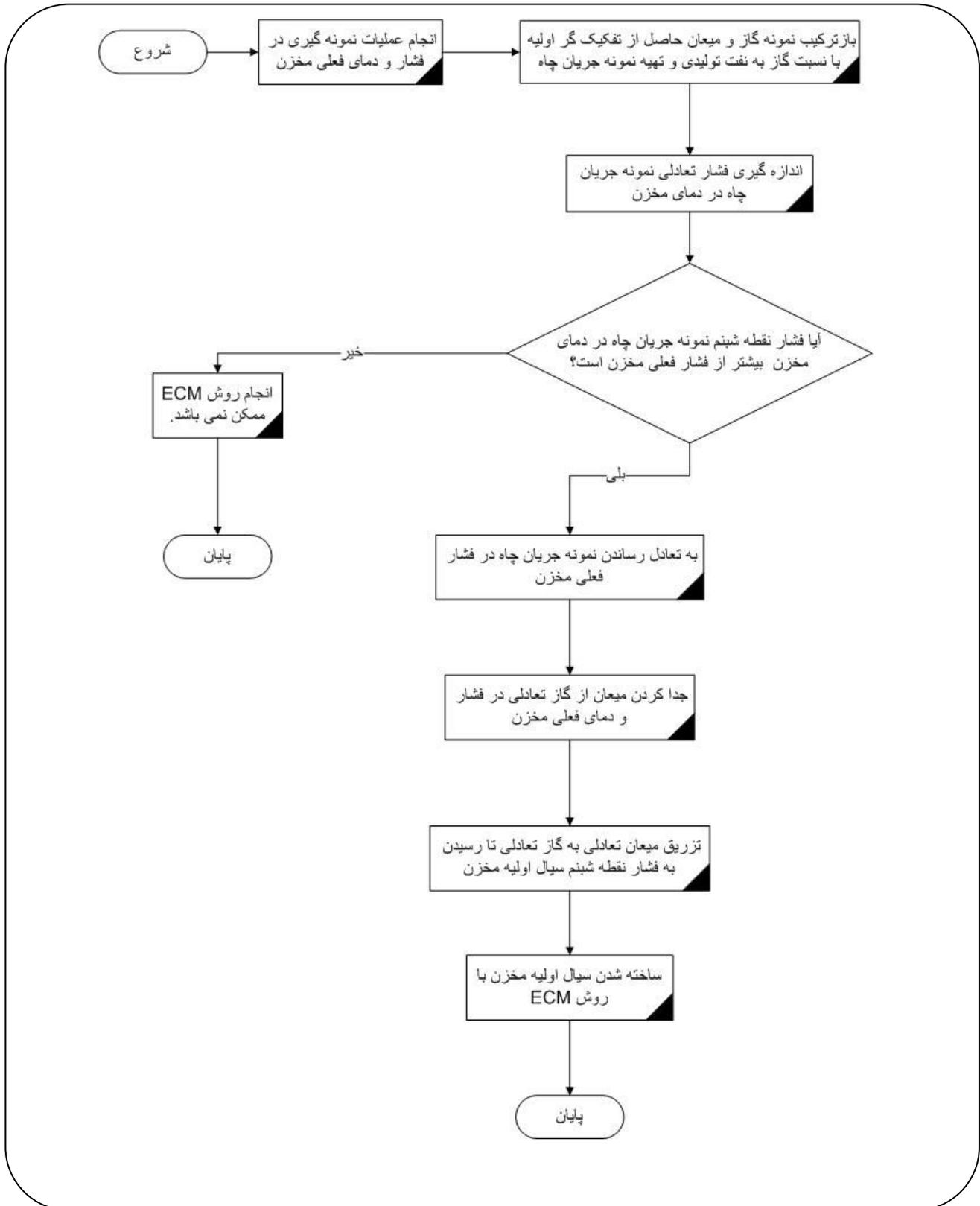
گاز میعانی غنی			گاز میعانی کم مایه			سیستم
اجزاء	سیال اولیه (درصد مولی)	باز ترکیب (درصد مولی)	ECM اصلاح شده (درصد مولی)	باز ترکیب (درصد مولی)	سیال اولیه (درصد مولی)	ECM اصلاح شده (درصد مولی)
N2	۳,۳۴۹	۳,۴۰۰	۳,۳۴۸	۳,۴۰۰	۰,۱۲۹	۰,۱۴۶
H2S	۳,۰۲۹	۳,۰۳۳	۳,۰۳۰	۳,۰۳۳		
CO2	۱,۷۵۵	۱,۷۷۱	۱,۷۵۵	۱,۷۷۱	۰,۱۸۱	۰,۱۹۵
C1	۸,۷۶۴	۸۱,۸۰۰	۸۰,۷۶۶	۸۱,۸۰۰	۶۲,۰۴۹	۶۸,۵۰۵
C2	۵,۱۵۸	۵,۱۸۲	۵,۱۵۹	۵,۱۸۲	۱۴,۱۷۷	۱۴,۸۵۳
C3	۱,۹۰۷	۱,۸۹۳	۱,۹۰۷	۱,۸۹۳	۸,۳۷۷	۸,۳۴۹
IC4	۰,۴۰۹	۰,۳۹۹	۰,۴۰۹	۰,۳۹۹	۰,۹۶۴	۰,۸۸۶
NC4	۰,۶۹۹	۰,۶۷۷	۰,۶۹۸	۰,۶۷۷	۳,۳۷۶	۲,۹۹۹
IC5	۰,۲۸۰	۰,۲۶۳	۰,۲۷۹	۰,۲۶۳	۰,۸۲۰	۰,۶۶۰
NC5	۰,۲۸۰	۰,۲۶۱	۰,۲۷۹	۰,۲۶۱	۱,۴۳۸	۱,۱۹۹
C6	۰,۳۹۰	۰,۳۳۹	۰,۳۸۷	۰,۳۳۹	۱,۷۱۰	۱,۱۱۲
C7+	۱,۹۸۰	۰,۹۸۱	۱,۹۸۱	۰,۹۸۱	۶,۷۸۱	۱,۲۷۶
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
ویژگی‌های C7+	وزن مولکولی: ۱۳۶,۸۱۰ وزن مخصوص: ۰,۷۷۱	وزن مولکولی: ۱۴۳ وزن مخصوص: ۰,۷۹۰				

بنابراین این روش فقط در زمان‌های اولیه تولید که ترکیب جریان چاه تولیدی با ترکیب سیال موجود در مخزن یکسان است و تغییرهای فازی در اطراف چاه کم و میعان تشکیل شده قابل تولید است، مناسب می‌باشد، ولی با گذشت زمان از تولید این روش غیر قابل اتکاست. جدول ۴، میانگین درصد خطای مطلق هر روش را نشان می‌دهد. دقت بسیار کم روش باز ترکیب و بسیار بالای روش ECM اصلاح شده در این جدول نمایان است.

به‌عنوان گاز میعانی غنی به مدل فرضی مخزن وارد شد. هدف واریسی روش ECM و یا ECM اصلاح شده در سامانه گاز میعانی غنی و مقایسه آن با سامانه گاز میعانی کم مایه بود. بنابراین نمونه‌های به دست آمده از تفکیک‌گر در ۳۰امین سال تولید به عنوان شرایط تخلیه مورد استفاده قرار گرفتند. در این زمان فشار میانگین فعلی مخزن ۱۵۰۲ psia است که بسیار کمتر از فشار اشباع اولیه مخزن می‌باشد. باز هم در این سامانه، فشار اشباع جریان چاه حاصل کمتر فشار فعلی مخزن می‌باشد و در نتیجه اجرای روش ECM ممکن نمی‌باشد. بنابراین باز هم از روش ECM اصلاح شده (روش پیشنهادی ما) برای تهیه سیال اولیه مخزن استفاده می‌شود (شکل ۶).

مخزن گاز میعانی غنی مصنوعی در ابتدا زیر اشباع

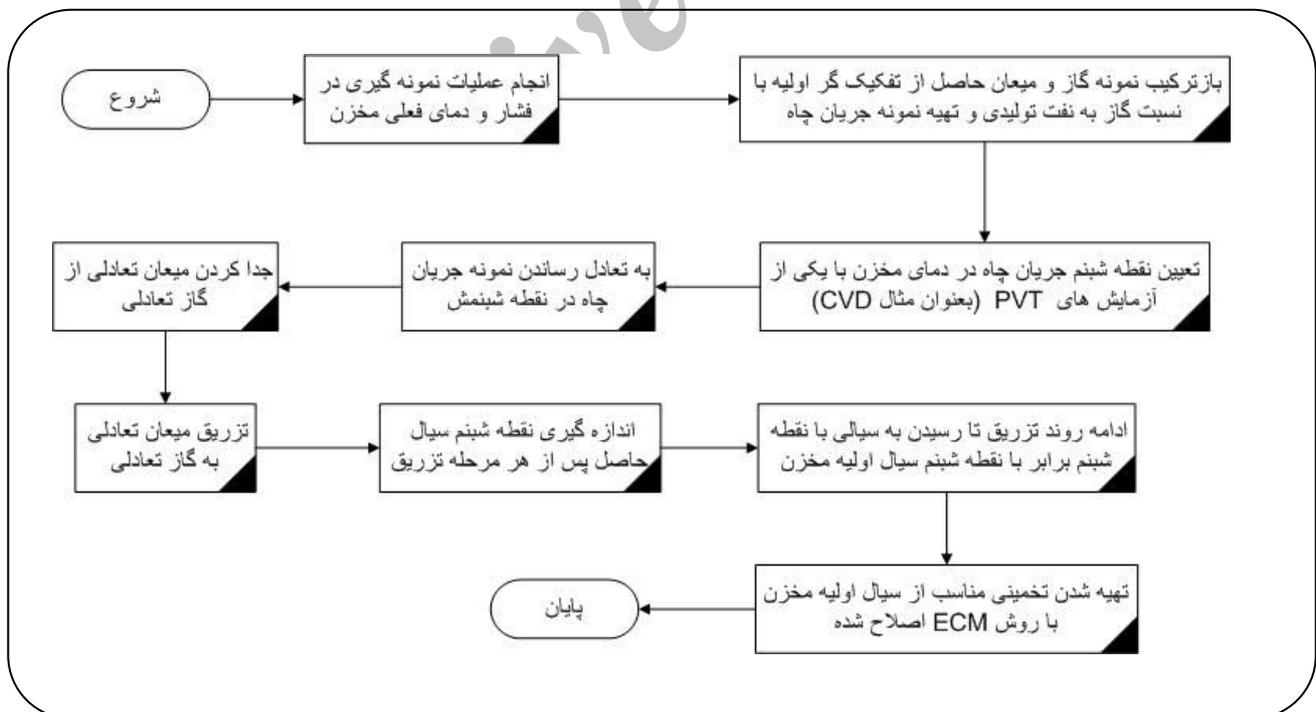
ویژگی‌های سیال چاه شماره ۷ شرکت Good Oil پس از واریسی آن با آزمایش CVD و تشکیل حداکثر ۱۷/۵ درصد میعان



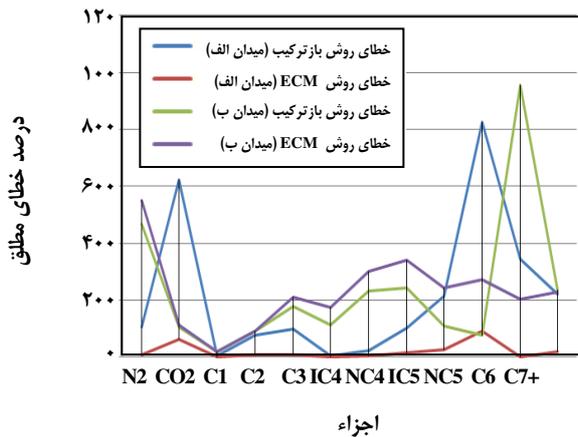
شکل ۵- نمودار جریانی روش ECM.

جدول ۴ - درصد خطای روش‌های باز ترکیب و ECM اصلاح شده پس از ۳۰ سال تولید در سیستم‌های گاز میعانی کم مایه و غنی.

گاز میعانی غنی		گاز میعانی کم مایه		سیستم
اجزاء	باز ترکیب (درصد خطا)	ECM اصلاح شده (درصد خطا)	باز ترکیب (درصد خطا)	ECM اصلاح شده (درصد خطا)
N2	۱۲,۱۰۸	۰,۱۸	۱,۵۲۶	۰,۴۴۶
H2S		۰,۴۰	۰,۱۴۲	
CO2	۸,۴۶۱	۰,۲۳	۰,۹۱۷	۰,۶۰۶
C1	۱۰,۶۳۵	۰,۰۰۲	۱,۲۸۳	۰,۲۰۸
C2	۵,۴۹۰	۰,۲۷	۰,۴۵۸	۰,۶۸۹
C3	۱,۲۰۶	۰,۱۶	۰,۷۲۹	۰,۲۷۹
IC4	۸,۶۸۰	۰,۶۶	۲,۳۳۷	۰,۵۸۶
NC4	۱۲,۰۵۳	۰,۲۹۳	۳,۱۷۵	۰,۹۹۷
IC5	۲۱,۴۶۵	۰,۳۶۸	۵,۹۱۴	۲,۳۶۲
NC5	۲۴,۳۹۹	۰,۳۶۸	۶,۹۵۴	۲,۸۱۱
C6	۳۷,۸۸۳	۰,۷۷۴	۱۲,۹۷۲	۴,۴۶۴
C7+	۸۱,۳۶۶	۰,۴۰	۵۰,۴۵۷	۱,۰۰۴
درصد خطای مطلق میانگین	۲۰,۳۴۱	۰,۱۴۷	۷,۲۳۹	۱,۳۱۴



شکل ۶ - نمودار جریانی روش ECM اصلاح شده.

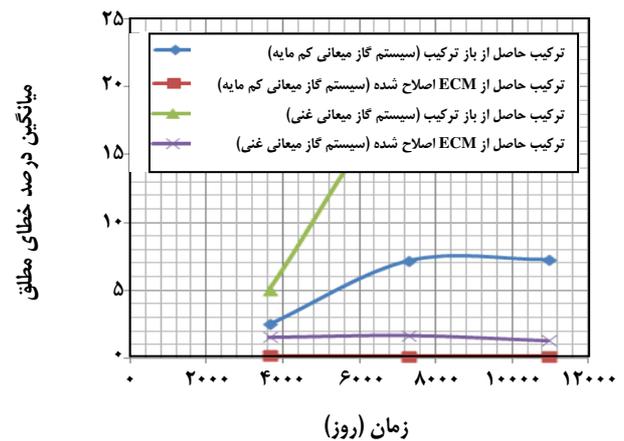


شکل ۸- اهمیت روش ECM در میدان‌های ایران.

ساخته شده این میداین با روش‌های ECM و ترکیب دوباره نشان داده شده‌اند. جدول ۶ دقت هر روش را در هر یک از میدان‌ها با محاسبه درصد خطای مطلق هر جزء و میانگین اجزاء نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۶ نمایان است، روش ECM بسیار دقیق‌تر از روش ترکیب دوباره می‌باشد. همچنین با مقایسه میانگین درصد خطای مطلق دیده می‌شود که دقت روش ECM در میدان «الف» بالاتر از میدان «ب» می‌باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد که روش ECM بیشترین درصد خطای روش ترکیب دوباره را در میدان «الف» ۷۳٪ و در میدان «ب» ۷۵٪ کاهش داده است، این امر اهمیت استفاده از روش ECM را نشان می‌دهد.

کمتر بودن دقت روش ECM در میدان «ب» نسبت به انتظار ما (جدول ۶)، باعث شد که دقت این روش با نمودارهای فازی نیز در این میدان بررسی شود. شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودار فازی سیال‌های اولیه و ساخته شده با روش‌های ترکیب دوباره و ECM را برای میداین «الف» و «ب» نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، نمودار فازی سیال ساخته شده با روش ECM در میدان «الف» به طور کامل بر نمودار فازی سیال اولیه منطبق است، اما در میدان «ب» این دو نمودار به طور کامل بر هم منطبق نیستند، ولی نسبت به نمودار فازی سیال ساخته شده با روش ترکیب دوباره ویژگی‌های فازی بسیار نزدیکتری به سیال اولیه دارد. این امر باعث شد که بررسی گسترده تری روی این میدان انجام شود. پس از بررسی جامع‌تر وجود حلقه‌ای نفتی<sup>(۱)</sup> در میدان تأیید شد.

(1) Oil Rim



شکل ۷- تغییرهای روش‌های ساخت سیال اولیه با گذر زمان در سامانه‌های گاز میعانی غنی و کم مایه.

جدول ۳، سیال اولیه مخزن و سیال ساخته شده با روش‌های بازترکیب و ECM اصلاح شده را پس از ۳۰ سال تولید نشان می‌دهد. باز هم نمایان است که بازترکیب نمی‌تواند سیال اولیه مخزن را بسازد و فقط تخمینی از سیال جریان چاه را به دست می‌آورد. جدول ۴، میانگین درصد خطای مطلق هر روش را نشان می‌دهد. دقت بالای روش ECM اصلاح شده و بسیار کم ترکیب دوباره در این جدول نمایان است.

همچنین دقت روش‌های ECM اصلاح شده و ترکیب دوباره در هر دو سامانه گاز میعانی کم مایه و غنی با گذشت زمان از تولید مورد رسیدگی قرار گرفت. شکل ۷ نتیجه‌های به دست آمده را برای دهمین، بیستمین و سی امین سال تولید نشان می‌دهد. با توجه به این شکل روشن است که:

- (۱) دقت این روش‌ها در سامانه گاز میعانی کم مایه بیشتر از سامانه گاز میعانی غنی است.
- (۲) دقت روش بازترکیب با گذشت زمان به شدت کاهش می‌یابد، ولی دقت روش ECM اصلاح شده یکنواخت باقی می‌ماند.
- (۳) دقت روش ECM اصلاح شده به صورت چشمگیری بسیار بیشتر از روش بازترکیب است.

### نتیجه‌های به دست آمده از مطالعه‌های میدانی

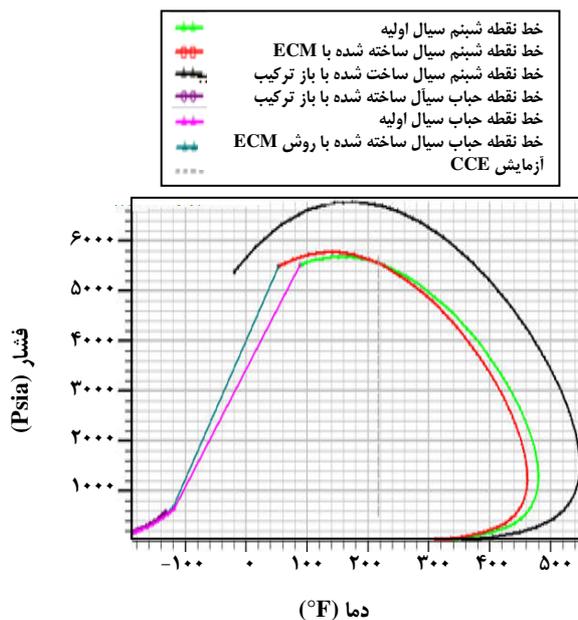
برای بررسی اعتبار روش ECM در میدان‌های ایران، اطلاعات نمونه‌های تفکیک‌گر اخیر دو میدان گاز میعانی ایران به مدل دینامیک ECM شبیه سازی شده وارد شد. در جدول ۵ سیال اولیه و

جدول ۵ - سیال‌های اولیه و ساخته شده با روش‌های ترکیب دوباره و ECM در مطالعه‌های موردی.

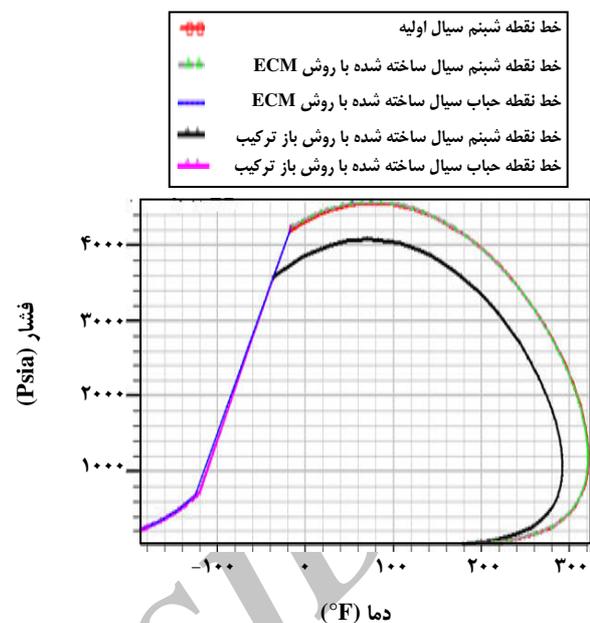
ب			الف			میدان
اجزاء	سیال اولیه (درصد مولی)	باز ترکیب (درصد مولی)	ECM اصلاح شده (درصد مولی)	باز ترکیب (درصد مولی)	سیال اولیه (درصد مولی)	
N2	۲,۱۰۴	۳,۰۹۱	۵,۱۲۳	۵,۱۶۹	۴,۶۸۰	
CO2	۰,۱۷۹	۰,۱۹۸	۰,۱۳۰	۰,۱۳۰	۰,۳۴۶	
C1	۸۲,۱۷۴	۸۰,۵۵۹	۸۶,۸۴۳	۸۷,۳۴۳	۸۶,۹۳۳	
C2	۶,۳۰۸	۵,۷۳۲	۲,۲۷۸	۳,۳۷۶	۳,۶۵۴	
C3	۳,۴۳۸	۲,۸۲۵	۱,۳۰۲	۱,۲۹۲	۱,۴۳۴	
IC4	۰,۵۳۶	۰,۴۷۶	۰,۳۴۶	۰,۳۴۱	۰,۳۳۹	
NC4	۱,۳۰۹	۱,۰۰۵	۰,۵۳۱	۰,۵۲۱	۰,۵۱۰	
IC5	۰,۴۳۹	۰,۳۳۳	۰,۲۶۸	۰,۲۶۰	۰,۲۳۶	
NC5	۰,۴۵۴	۰,۴۰۴	۰,۲۳۸	۰,۲۳۰	۰,۱۹۰	
C6	۰,۵۸۷	۰,۵۴۱	۰,۳۹۲	۰,۳۷۱	۰,۲۰۳	
C7+	۲,۴۷۲	۴,۸۳۶	۱,۴۴۹	۰,۹۶۶	۱,۴۷۵	
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
ویژگی‌های C7+	وزن مولکولی: ۱۸۸,۷۵۰ وزن مخصوص: ۰,۸۶۷		وزن مولکولی: ۱۵۲,۵۱۰ وزن مخصوص: ۰,۷۹۳			

جدول ۶ - درصد خطای روش‌های باز ترکیب و ECM اصلاح شده پس از ۳۰ سال تولید در سیستم‌های گاز میعانی کم مایه و غنی.

ب		الف		میدان
اجزاء	باز ترکیب (درصد خطا)	ECM (درصد خطا)	باز ترکیب (درصد خطا)	ECM (درصد خطا)
N2	۴۶,۹۰۶	۰,۹۴۷	۱۰,۴۵۱	۵۴,۹۸۱
CO2	۱۰,۶۱۵	۶,۲۴۸	۶۲,۳۶۱	۱۱,۳۹۱
C1	۱,۹۶۵	۰,۱۰۰	۰,۴۷۲	۱,۸۵۱
C2	۹,۱۳۳	۰,۷۵۷	۷,۶۱۱	۹,۰۲۸
C3	۱۷,۸۳۳	۰,۹۱۹	۹,۸۸۱	۲۰,۹۳۴
IC4	۱۱,۱۹۶	۰,۱۹۵	۰,۴۷۲	۱۷,۳۹۲
NC4	۲۳,۲۲۴	۰,۴۱۲	۲,۱۴۳	۳۰,۱۰۶
IC5	۲۴,۱۴۸	۱,۳۷۲	۱۰,۳۶۴	۳۴,۱۷۵
NC5	۱۱,۰۱۵	۲,۵۵۲	۲۱,۲۶۳	۲۴,۱۴۳
C6	۷,۸۳۸	۹,۲۹۵	۸۲,۵۸۶	۲۷,۲۲۸
C7+	۹۵,۶۲۷	۰,۱۷۷	۳۴,۵۱۰	۲۰,۳۳۲
درصد خطای مطلق میانگین	۲۳,۵۹۱	۲,۰۸۰	۲۲,۰۱۰	۲۲,۸۶۹



شکل ۱۰- ارزیابی روش‌های ساخت سیال مخزن با نمودار فازی در میدان ب.



شکل ۹- ارزیابی روش‌های ساخت سیال مخزن با نمودار فازی در میدان الف.

- روش‌های ECM و اصلاح شده دقیق‌ترین روش‌ها در تهیه سیال اولیه درجا می‌باشند. بنابراین روش مورد استفاده ولی غلط بازترکیب بایستی جای خود را به روش‌های بی‌استفاده ولی دقیق ECM و اصلاح شده دهد.
- وجود داشتن نفت در مخزن از دقت روش ECM می‌کاهد، ولی بر اساس رفتار فازی هنوز این روش دقت کافی را دارا می‌باشد.
- به دلیل اینکه روش‌های ECM و اصلاح شده می‌توانند سیال اولیه مخزن را با دقت بسیار بالایی از نمونه‌های غیر نماینده بازسازی کنند، مؤسسات استاندارد صنعتی نظیر API بایستی استانداردهای فعلی نمونه‌گیری را تغییر دهند.

### قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران می‌باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۳/۱۳

بنابراین کاهش دقت روش ECM به دلیل تولید نفت همراه با گاز از این میدان می‌باشد. با این وجود دقت بسیار بالاتر آن نسبت به روش سنتی بازترکیب باعث قابل اتکا شدن نتیجه‌های به دست آمده از روش ECM می‌شود.

### نتیجه‌ها

- بر ارزیابی روش ECM در مخازن گاز میعانی نتیجه‌های زیر به دست آمد:
- برای اجرای روش ECM در هر شرایطی لازم است این روش اصلاح شود. بنابراین روش ECM اصلاح شده را با این تفاوت که جریان چاه در فشار اشباعش به جای فشار فعلی مخزن به تعادل برده شود، ارایه شد.
- روش ECM اصلاح شده دارای دقت یکنواختی است.
- دقت روش ECM اصلاح شده در مخازن گاز میعانی کم مایه بیشتر از مخازن گاز میعانی غنی است.
- بازترکیب نمونه‌های تفکیک‌گر زمانی که فشار بیشتر مخزن به زیر فشار اشباع اولیه افتاده است، فقط تخمینی غیر دقیق از ترکیب جریان چاه را به دست می‌دهد و این تخمین نباید به عنوان سیال درجای مخزن استفاده شود.

## مراجع

- [1] American Petroleum Institute, "API Recommended Practice 44, Sampling Petroleum Reservoir Fluids", API Publishing Services, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C. 20005 (2003).
- [2] McCain W.D.J., Alexander R.A., Sampling Gas-Condensate Wells, *SPE Reservoir Engineering*, 7, p. 358 (1992).
- [3] Standing M.B., "Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems", SPE Monograph Volume 20, Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, USA (1977).
- [4] Danesh A., "PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids, Application in Reservoir Simulation, in: Evaluation of Reservoir Fluid Samples", Elsevier, Netherlands (2003).
- [5] Chopra A.K., Carter R.D., Proof of the Two-Phase Steady-State Theory for Flow through Porous Media, *SPE Formation Evaluation Journal*, 1, p. 603 (1986).
- [6] O'Dell H.G., Miller R.N., Successfully Cycling a Low-Permeability High-Yield Gas Condensate Reservoir, *Journal of Petroleum Technology*, 19, p. 41 (1967).
- [7] Fussel D.D., Single Well Performance for Gas Condensate Reservoirs, *Journal of Petroleum Technology*, 25, p. 860 (1973).
- [8] Refstrup J., Olsen H., "Evaluation of PVT Data from Low Permeability Gas Condensate Reservoirs, North Sea Oil and Gas Reservoirs – III", Kluwer Academic Press, pp. 289-296 (1994).
- [9] Fevang Ø., Whitson C.H., Accurate Insitu Compositions in Petroleum Reservoirs, SPE European Petroleum Conference, London, U.K., October 25-27 (1994).
- [10] Core Laboratories Good Oil Company Condensate Well No. 7 PVT Study, Core Laboratories, Houston.
- [11] Whitson C.H., Brulé M.R., "Phase Behavior", SPE Monograph Series, Society of Petroleum Engineers Inc., Richardson, Texas, USA (2000).
- [۱۲] پرهام وند، محمدهادی؛ گرامی، شهاب؛ عمادی، محمدعلی؛ اعتبار سنجی روش اختلاط تماس تعادلی در ساخت سیال اولیه مخازن گاز میعانی، مجله پژوهش نفت، ۷۳، ص ۹۵، (۱۳۹۲)