



## عوامل مؤثر بر مهاجرت سیال و تولید بهینه از میداين مشترک به همراه تخمین میزان گاز مهاجرت کرده در میدان پارس جنوبی

مهدی زینلی حسونند<sup>\*</sup>، ابوالفضل هاشمی، سارا شکوه‌الزاده، ناصر قراهانی، ماستری، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز اروندگان

چکیده

مهاجرت سیالات هیدروکربنی در لایه‌های رسوبی اعماق زمین از مرزهای بین دو کشور باعث تشکیل مخازن هیدروکربنی مشترک می‌شود. استفاده از منابع طبیعی زیرزمینی از جمله مخازن هیدروکربنی حق مسلم هر کشور است و توسعه و بهره‌برداری از آن می‌تواند به صورت مستقل انجام شود. با این حال ارتباط هیدرولیکی سیال مخزن باعث می‌شود هر گونه تولید و تغییر فشار در یک سوی مرز بر نرخ تولید و آهنگ تغییر فشار در سوی دیگر مرز تأثیر بگذارد. از دیدگاه مخازن مشترک ایران یکی از کشورهای مطرح دنیاست که با پنج کشور همسایه خود میداين نفت و گاز مشترک دارد. برخی از این میداين از مدت‌ها قبل توسط همسایگان به بهره‌برداری رسیده و برخی نیز در حال توسعه می‌باشد. هدف این مقاله بررسی عواملی از توسعه و بهره‌برداری میدان است که می‌تواند بهره‌وری از یک میدان مشترک را به حداکثر برساند. طی این تحقیق با استفاده از داده‌های واقعی مخازن مشترک، حرکت سیال در مرز مخزن مدل‌سازی شده و با اجرای سناریوهای مختلف راه‌های جلوگیری از حرکت سیال به سمت کشور همسایه بررسی می‌شود. در نهایت نیز عوامل مؤثر به دو دسته کلی (چگونگی توسعه میدان و خصوصیات ذاتی مخزن) طبقه‌بندی می‌شود. بهره‌گیری از این دو عامل می‌تواند هر کشور را در مدیریت سیال ناحیه مرزی مخزن و نیز جبران عقب‌ماندگی احتمالی در تولید بهینه از میداين مشترک باری نماید.

واژگان کلیدی: سیانت از مخازن، مخازن مشترک، مهاجرت هیدرولیکی سیال، مدیریت مخزن

### مقدمه

کشورها کنند، همسایگان را ترغیب کرده تا توسعه این میداين را در اولویت برنامه‌های خود قرار دهند.

با توجه به مقدار منابع قابل برداشت از میداين مشترک، هر کشور سعی می‌کند در بهره‌برداری از این میداين از طرف مقابل پیشی بگیرد. اگر چه مناسب‌ترین گزینه مدیریت یکپارچه مخزن با همکاری و جمع‌آوری اطلاعات از سوی دو کشور همسایه است ولی به دلیل مسائل اقتصادی و سیاسی این مهم در بیشتر مواقع امکان‌پذیر نیست [۴]. به دلیل برخی مسائل بین‌المللی، اتفاقات تاریخی، جنگ‌ها و اختلافات منطقه‌ای، مخازن مرزی ایران نیز به صورت مستقل توسط هر کدام از کشورهای دو سوی مرز توسعه داده می‌شوند. در برخی از مخازن، کشورهای همسایه سال‌ها قبل از ایران تولید و توسعه را آغاز کرده و در برخی مخازن دیگر کشورمان توسعه را زودتر شروع کرده است. با این حال نکته اصلی میزان جابجایی سیال هیدروکربنی از زیر مرز یک کشور به حریم همسایه و نیز افت فشار حاصل از تولید یک کشور در کشور همسایه است.

در این نوشتار سعی شده صرف نظر از دیدگاه حقوقی، با ارزیابی فنی سناریوهای برداشت دو همسایه از میدان، به تعیین متغیرهای مؤثر بر میزان مهاجرت نفت و گاز پرداخته شود. در ادامه نشان داده خواهد شد که تولید از یک بخش میدان دارای دو اثر مهم خواهد بود؛ نخست افت فشار در همان ناحیه و دوم مهاجرت سیال از نواحی برداشت نشده مخزن برای جبران این افت فشار. کمی‌سازی این متغیرها به این پرسش پاسخ خواهد داد که آیا در تولید از میداين مشترک منافع کشورها به‌طور یکسان حفظ شده یا خیر و هم‌چنین چگونگی اثرگذاری این عوامل در برداشت هر کشور مشخص خواهد شد. در ادامه به عنوان یک مطالعه موردی، وضعیت مهاجرت سیال در میدان پارس جنوبی از طریق

تولید برابر از میداين مشترک از لحاظ فنی قابل قبول نیست؛ چرا که هر کشور حق دارد حجمی از مخزن را که در زیر زمین خود قرار دارد تولید کند. تجربه نشان داده که تعیین حجم یک مخزن دارای عدم قطعیت‌هایی است که حتی سال‌ها پس از توسعه میدان نیز می‌تواند وجود داشته باشد. این امر تعیین سهم طرفین را با مشکل مواجه می‌کند. با این حال حتی اگر سهم طرفین از حجم یک مخزن مشخص باشد؛ از آنجا که ممکن است خصوصیات مخزن نظیر تخلخل، اشباع نفت و نفوذپذیری، از دیدگاه استاتیکی و دینامیکی در هر نقطه نسبت به نقاط دیگر تفاوت داشته باشد، بنابراین نرخ برداشت طرفین نیز می‌تواند متفاوت باشد.

از دیدگاه تعدد مخازن مشترک، ایران جایگاه منحصر به فردی دارد. جدول ۱- نشان می‌دهد کشورمان دارای ۲۸ مخزن ثابت شده مشترک شامل ۱۸ مخزن نفتی، ۴ مخزن گازی و ۶ مخزن نفتی-گازی با ۶ کشور همسایه است. از میان این مخازن، ۱۵ مخزن در دریا و ۱۳ مخزن در خشکی قرار دارد. ایران ۱۲ میدان مشترک با عراق، ۷ میدان مشترک با امارات متحده عربی، ۴ مخزن مشترک با عربستان و ۲ مخزن مشترک با قطر دارد و با هر کدام از کشورهای عمان، کویت و ترکمنستان نیز یک مخزن مشترک دارد. وجود منابع هیدروکربنی مشترک در دریای خزر نیز دور از واقعیت نیست. نکته حائز اهمیت اینست که تولید روزانه ایران در بسیاری از مرزها کمتر از کشورهای همسایه است.

در بین مخازن مشترک ایران، مهم‌ترین میدان، مخزن گازی فوق‌عظیم پارس جنوبی است که با کشور قطر مشترک است. هم‌چنین مهم‌ترین میدان نفتی مشترک ایران میدان آزادگان است که با کشور عراق مشترک است [۳]. بررسی این ارقام و نگاه به سود مالی که توسعه مناسب و به موقع این میداين می‌تواند نصیب

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات (hasanvand@put.ac.ir)

شبهه سازی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در دو مخزن نفتی و گازی ارائه شده است.

## ۱- روش تحقیق

در مهندسی نفت پایه ای ترین رابطه ای که حرکت سیال در محیط متخلخل سنگ را نشان می دهد رابطه دارسی (Henry Darcy, 1856) است. این رابطه برای حرکت تک بعدی یک سیال به قرار زیر است:

$$q = - \frac{kA}{\mu} \times \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

که در آن  $q$ ,  $k$ ,  $A$ ,  $\mu$ ,  $P$  و  $x$  به ترتیب نرخ سیال تولیدی، تراوایی سنگ، سطح مقطع سنگ در برابر گذر سیال، گرانیوی سیال، فشار و طول سنگ است [۵]. رابطه ۱ نشان می دهد هنگامی که بین دو نقطه تغییر فشار ایجاد شود با توجه به خواص سنگ و سیال، جابجایی صورت می گیرد. اما در شرایط واقعی تولید چاه از یک مخزن نفتی گسترده، حرکت سیال به صورت استوانه ای است. با استفاده از روابط موازنه جرم در یک دیفرانسیل استوانه ای از مخزن و نوشتن روابط بقاء و پیوستگی و همچنین استفاده از روابط دارسی، رابطه مهم دیگری در مهندسی نفت به دست می آید که به معادله نفوذ<sup>۲</sup> معروف است. معادله نفوذ یک معادله دیفرانسیل جزئی درجه دو است که در آن فشار به صورت تابعی از دو متغیر مکان و زمان می باشد و برای یک مخزن نفتی به صورت رابطه ۲ نوشته می شود:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن:

$$\eta = \frac{0.000264k}{\phi \mu c_t} \quad (2)$$

با توجه به معادله نفوذ، حرکت موج افت فشار، تابع زمان و شرایط فیزیکی سنگ و سیال درون مخزن است. زمان رسیدن موج فشار به هر شعاع از مخزن همگن ( $r_e$ ) از رابطه  $t_{\alpha} \propto \frac{r_e^2}{\eta}$  محاسبه می شود [۶].

جهت و مقدار مهاجرت سیال در مخزن تابعی از قاعده برهم نهی موج های فشار است. زمانی که یک موج افت فشار به مرز مخزن می رسد در نتیجه اختلاف فشار ایجاد شده، منجر به حرکت سیال جهت مخالف به سمت خود می شود. هر چه مقدار ثابت نفوذ ( $\eta$ ) در یک سوی مخزن بیشتر باشد (تراوایی بیشتر، تخلخل، گرانیوی و تراکم پذیری کمتر) تولید در آن قسمت بیشتر بوده و سیال مرزی تمایل به حرکت به آن سمت دارد. جهت بررسی رفتار سیال مرزی در حالت های مختلف توسعه مخازن، مدل سازی داده های میادین نفتی و گازی با نرم افزار (Eclipse®2009,1) انجام شده است. بدین منظور، ابتدا مخزنی را با طول و عرض ۲۰ و ۸ کیلومتر و ضخامت ۱۰۰ متر طراحی کرده ایم. تخلخل این مخزن ۱۰ درصد و تراوایی آن در هر سه جهت مختصات ۴۰ میلی دارسی است. خصوصیات اصلی سیال برای ایجاد مدل در جدول ۱- ارائه شده است. برای توسعه میدان در هر دو طرف مخزن تعداد ۱۰ چاه تولیدی با تولید یکسان قرار داده شده اند.

## ۲- عوامل توسعه ای میدان

این عوامل به سه دسته کلی زمان بهره برداری از میدان، فاصله چاه ها از مرز و وجود چاه های افقی تقسیم می شوند. در ادامه هر یک از این موارد و نتایج شبهه سازی شده برای آنها مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل های ۲ و ۳ نتایج سه سناریو زمان بهره برداری، عدم تقارن در تولید و تفاوت نرخ تولیدی برای مقایسه

## ۱-۲- زمان بهره برداری از میدان

با توجه به معادله نفوذ و معادله دارسی، زمان بهره برداری از مخزن می تواند در مقدار و جهت مهاجرت نفت از مرز جغرافیایی مؤثر باشد. به منظور تعیین کمی و کیفی تأثیر این عامل روی مخزن مورد مطالعه، تمامی کمیت های جنس سنگ و سیال، آبده، شیب و چینش چاه ها را در دو طرف مرز یکسان در نظر می گیریم. تنها تفاوت در زمان بهره برداری از میدان است که یکی از کشورها سه سال زودتر شروع به تولید می کند. در شکل های ۲ و ۳ مقدار کل نفت و گاز مهاجرت کرده در هر دو مخزن نفتی و گازی نشان داده شده است.

در مدل نفتی، سه سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی نخست یکی از کشورها نرخ تولید دو برابری دارد. در سناریوی دوم چاه های دو کشور نامتقارن حفاری شده اند. در سناریوی سوم یکی از کشورها با اختلاف سه سال اقدام به تولید زود هنگام کرده است. مشابه این سناریو ها برای یک مخزن گازی نیز رسم شده است. در مخزن نفتی، کشوری که سریع تر بهره برداری کرده پس از طی ۸ سال توانسته است ۱/۱ درصد از کل نفت در جا را به سمت خود بکشد. در مخزن گازی به دلیل حرکت سریع تر موج افت فشار اثر آن در زمان کمتری (۳ سال) به حداکثر خود رسیده است. با توجه به تراکم پذیری زیاد گاز نسبت به نفت، سرعت موج افت فشار در مخزن گازی بیشتر از مخزن نفتی است. مسئله مهم دیگری که باید به آن توجه کرد اینست که حتی پس از برابر شدن تولید در دو سوی مرز، مهاجرت سیال در خط مرزی تا زمانی که موج تغییر فشار دو کشور در مرز اثر هم را تضعیف کنند ادامه می یابد. تنها در این شرایط است که دیگر مهاجرتی در مرز صورت نمی گیرد.

## ۲-۲- فاصله چاه ها از مرز

در مخزن طراحی شده، دو ردیف چاه به فاصله یکسان از مرز با شرایط یکسان تولید طراحی شده اند. با توجه به قاعده برهم نهی امواج<sup>۴</sup> و این مسئله که حرکت

۱ | خصوصیات سنگ و سیال مدل شبهه سازی شده برای یک میدان نفتی

مقدار	کمیت (واحد)
۰/۲	SWR (جزء)
۰/۱۹	Sor (جزء)
۰/۱	Sgr (جزء)
۲۸۰۰	فشار حباب (psia)
۱۱۳۰	گاز محلول (scf/stb)
$1 \times 10^{-6}$	تراکم پذیری کل (psia <sup>-1</sup> )
۶۳/۰۱	چگالی آب سازند (lbm/cft)
۴۴/۹۸	چگالی نفت مرده (lbm/cft)
۰/۰۷۰۲	چگالی گاز (lbm/cft)
۰/۹۶	گرانیوی آب (cp)
۰/۹۴	گرانیوی نفت (cp)
۱	گرانیوی گاز (cp)



عمود بر مرز کشور باشد. در مدل مورد مطالعه چاه‌هایی افقی به طول ۱۰۰۰ متر در دو حالت موازی و عمودی قرار داده شده است. شبیه‌سازی این دو حالت نشان می‌دهد که در هر دو مخزن نفتی و گازی عملکرد چاه‌های افقی عمود بر مرز بهتر از عملکرد چاه‌های افقی موازی با مرز است (شکل‌های ۴ و ۵). برای روشن شدن عملکرد چاه‌های افقی، در یک طرف از میدان، بهره‌برداری با چاه‌های عمودی و در طرف مقابل، بهره‌برداری از چاه‌های افقی انجام می‌شود. در این سناریو، در مخزن نفتی مهاجرت سیال از ابتدای تولید آغاز شده و پس از ۱۰ سال متوقف می‌گردد. در حالی که این رفتار در مخزن گازی متفاوت است. همان‌گونه که شکل ۵- نشان می‌دهد، در سال‌های اولیه گاز و میعانات گازی با شیب زیادی از مرز می‌گذرند. در ادامه برای یک مدت نسبتاً طولانی مهاجرت متوقف می‌شود اما پس از آن بار دیگر مهاجرت سیال از مرز رخ می‌دهد. این مهاجرت ثانویه به دلیل افت عملکرد چاه‌های عمودی همسایه و حفظ تولید (ایجاد افت فشار) در چاه‌های افقی است. نکته جالب دیگر مهاجرت دائمی گاز و مهاجرت موضعی میعانات گازی است. دلیل این پدیده اینست که میعانات گازی برای مهاجرت نیازمند حداقلی از درصد اشباع ( $S_{oc}$ ) هستند. تعیین دقیق مهاجرت میعانات گازی نیازمند تعیین دقیق  $S_{oc}$  است که این امر خود نیازمند تعیین دقیق خواص سنگ و سیال می‌باشد.

### ۳- خصوصیات در جای مخزنی

#### ۳-۱- شیب مخزن هیدروکربوری

وجود شیب در مخزن عاملی مؤثر بر تغییرات فشار در طول مخزن است. در واقع فشار هیدرواستاتیکی ناشی از اختلاف ارتفاع بر حرکت سیال اثر می‌گذارد. این اثر سبب می‌شود سیال در شرایط یکسان تولید، به سمت کشوری حرکت کند که در ارتفاع کمتری قرار دارد.

برای ملاحظه این اثر، روی مخزن مورد مطالعه شیبی به اندازه ۵ درجه ایجاد شده تا کشور-۱ در پایین دست (ارتفاع کمتر) و کشور-۲ در بالادست (ارتفاع بیشتر) قرار گیرد است. در مخزن نفتی حدود یک درصد از نفت در جا پس از ۳ سال از مرز مهاجرت می‌کند و پس از آن مهاجرت متوقف می‌شود (شکل ۶-). با توجه به شکل ۷-، در یک مخزن گازی مهاجرت گاز برای ۵ سال ثابت مانده و در ادامه با سرعت ثابتی ادامه می‌یابد. پس از ۵۰ سال ۲/۱ درصد گاز در جای مخزن از مرز مهاجرت خواهد کرد. با دوبرابر کردن شیب در مدل‌های بعدی مقدار مهاجرت در مخزن نفتی دوبرابر شده و در مخزن گازی تا سه برابر افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر تمایل یک مخزن گازی به حرکت در اثر شیب، پیوسته‌تر و بیشتر از یک مخزن نفتی است.

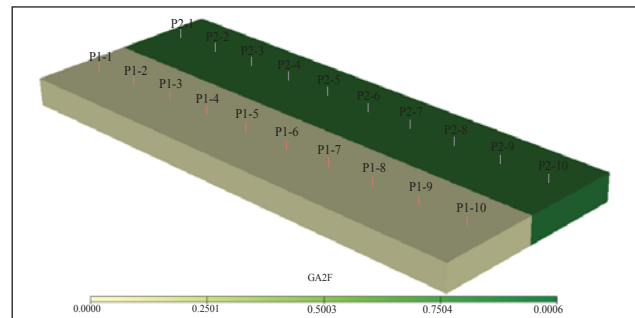
افت فشار در محیط مخزن نوعی حرکت موجی است، موج تولیدی چاه‌ها در دو سوی مخزن یکسان عمل کرده و اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند؛ بنابراین سیالی که در نواحی مرزی قرار دارد در دو طرف خود با پتانسیل یکسانی روبرو شده و به میزان برابر به سمت دو همسایه جریان می‌یابد و در نهایت جابجایی سیال از محدوده یک کشور به کشور دیگر صفر خواهد بود.

برای روشن شدن اثر آرایش چاه‌ها و محل قرار گرفتن آنها بر میزان تولید از یک مخزن مشترک نفتی، در مدل شبیه‌سازی شده، فاصله چاه‌های کشور-۱ از مرز سه برابر چاه‌های کشور-۲ از مرز قرار داده شد. نتایج حاصل نشان داد که هرچه چاه‌ها به مرز نزدیکتر باشند تولید نفت بیشتری خواهند داشت. اثر این عامل ضعیف‌تر از عامل زمان است. همان‌طور که در شکل ۳- نشان داده شده پس از ۶ سال حدود یک درصد از کل نفت در جا از مرز مهاجرت می‌کند که در ادامه تولید در اثر قاعده برهم‌نهی امواج مقداری از این مهاجرت جبران می‌شود. نکته مهم دیگر اینست که در کشوری که نفت از مرزهای آن مهاجرت می‌کند افت فشار بیشتری رخ می‌دهد؛ به این معنی که این کشور هم از بابت هدر رفتن منابع هیدروکربوری و هم به دلیل افت فشار چاه‌ها متضرر خواهد شد.

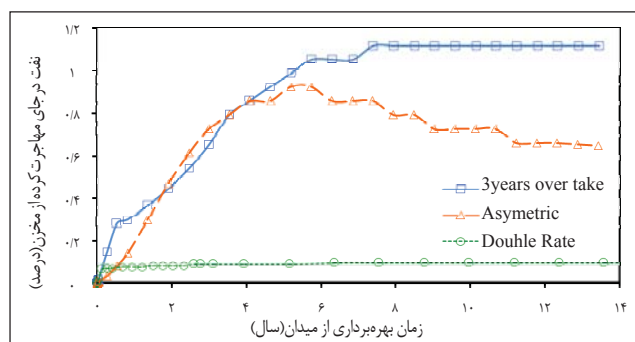
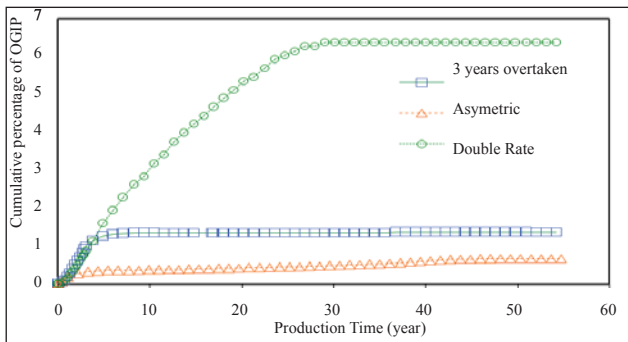
در وضعیت مشابه، در مخزن گازی مهاجرت کمتری سریع‌تری انجام شده و در کل برگشت سیال نیز رخ نمی‌دهد (شکل ۲-). در این مخزن نیز مانند مخزن نفتی افت فشار در چاه‌های دور از مرز بیشتر از افت فشار در چاه‌های نزدیک به مرز است که این امر در بلندمدت سبب محدود شدن تولید در این ناحیه می‌شود.

#### ۳-۲- حفر چاه‌های افقی

حفر چاه‌های افقی در مخزن مشترک با ایجاد شکاف مصنوعی در چاه، برگ برنده مدیریت سیال مرز مخزن است. در یک چاه عمودی آغاز افت فشار حاصل از چاه در یک نقطه متمرکز است؛ در صورتی که در یک چاه افقی افت فشار در طول یک خط پراکنده می‌شود. این خط افت فشار می‌تواند موازی با



شکل ۱ | آرایش چاه‌ها در مدل ساخته شده با داده‌های واقعی



شکل ۲ | اثر عوامل توسعه‌ای میدان بر مهاجرت نفت از مرز در یک مخزن گازی

شکل ۳ | اثر عوامل توسعه‌ای میدان بر مهاجرت نفت از مرز در یک مخزن نفتی

### ۲-۳- خواص سنگ در دوطرف مرز

بدین منظور در دو سوی مرز، تراوایی سنگ مخزن در کشورهای ۱ و ۲ را به ترتیب ۱۰ و ۴۰ میلی داری در نظر می گیریم. با توجه به مقدار ثابت معادله نفوذ که رابطه مستقیمی با تراوایی دارد انتظار داریم این ناهمگونی مخزن به لحاظ تراوایی بر حرکت نفت از مرز اثرگذار باشد. با شبیه سازی فرآیند در می بایم که در شرایط تولید برابر در مخزن نفتی (شکل ۶-۶)، سیال از قسمت کم تراوا (کشور ۱) به سمتی که تراوایی بیشتری دارد حرکت می کند که این امر سبب مهاجرت بیش از یک درصد نفت در جای مخزن می شود. این رفتار در مخزن گازی متفاوت است؛ مهاجرت سیال در یک مخزن گازی در اثر تفاوت تراوایی تا نیمه عمر مخزن (۳۵ سال) اندک است اما در این سال مهاجرت سرعت گرفته و به بیش از یک درصد پس از پایان تولید می رسد (شکل ۷-۷). با بررسی تغییرات فشار در سطح مخزن در می بایم که موج افت فشار با تراوایی رابطه مستقیمی داشته و با افزایش تراوایی سرعت موج افت فشار نیز افزایش می یابد. از این رو موج افت فشار در کشور ۲ (با تراوایی بیشتر)، سریعتر به مرز جغرافیایی می رسد و سبب مهاجرت نفت کشور ما به داخل مرز این کشور می شود. از سوی دیگر افت فشار در ناحیه ای که تراوایی کمتری دارد کمتر رخ داده و نفت این مخازن به دلیل نسبت حرکت (MR)<sup>۵</sup> کمتر، میل کمتری به حرکت دارد.

خاصیت دیگری از سنگ که هم به طور کلی در برداشت از مخزن مؤثر است و هم در میبخت میدان مشترک می تواند بر مهاجرت نفت از مرز جغرافیایی تأثیر گذار باشد، تخلخل مخزن است. تخلخل دو دیدگاه بر میزان نفت تولیدی اثر می گذارد؛ نخست اینکه هر چه تخلخل کمتر باشد مقدار نفت در جا در آن ناحیه از مخزن کمتر خواهد بود. دوم اینکه با توجه به ثابت معادله نفوذ (رابطه ۳-۳)، تخلخل با سرعت حرکت موج افت فشار رابطه عکس دارد؛ بدین معنا که هر چه تخلخل کمتر باشد موج افت فشار زودتر به مرز جغرافیایی رسیده و در نتیجه نفت از آن ناحیه مهاجرت نمی کند. از این دیدگاه، در مخزن اثر تخلخل کمتر مانند اثر تراوایی بیشتر است. در مخزن مورد مطالعه تخلخل نواحی ۱ و ۲ را به ترتیب ۶ و ۱۰ درصد قرار داده و شبیه سازی را انجام می دهیم. همان گونه که شکل ۶-۶ نشان می دهد در توان تولید برابر، مهاجرت نفت مرزی از کشور با تخلخل بیشتر به سوی کشور با تخلخل کمتر (از کشور ۲ به کشور ۱) خواهد بود؛ چرا که مقدار افت فشار و سرعت حرکت موج فشار در کشور دارای تخلخل کمتر، بیشتر است. تمام این نتایج با استفاده از روابط نفوذ در محیط متخلخل، داریسی و موازنه جرم قابل تفسیر است. نکته جالب توجه آنست که اگر چه تخلخل یک مخزن جزو خواص ذاتی مخزن است اما به دلیل همین روابط، کشوری که تخلخل کمتری دارد (یا لایه تولیدی آن باریک تر است) در شرایط یکسان تولید، در عمل

بیشتر از سهم خود تولید خواهد کرد (با فرض مساوی بودن تراوایی). با مقایسه تأثیر ناهمگونی سنگ مخزن در مهاجرت سیال از مخزن گازی و مخزن نفتی (شکل های ۷ و ۶) می توان گفت: مهاجرت در مخزن نفتی پس از مدتی متوقف می شود اما در مخزن گازی این مهاجرت هم چنان ادامه خواهد داشت.

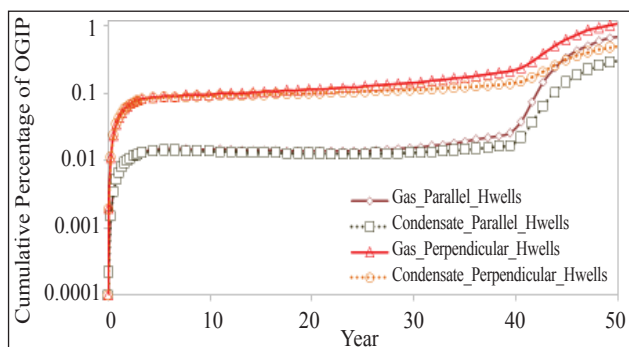
### ۳-۳- وجود سفره آبد

وجود آبد، قدرت و محل قرار گرفتن آن همه از عواملی هستند که بر میزان برداشت از یک مخزن نفتی (به ویژه در مخازن مشترک) تأثیر مستقیم دارند. به طور کلی یک آبد با توجه به مقدار توانایی که در تأمین فشار از دست رفته مخزن دارد و هم چنین محل قرار گرفتن آن می تواند تأثیری مثبت یا منفی بر میزان تولید هر کشور داشته باشد. هر کشور که شناخت بیشتری از فعالیت آبد خود داشته باشد، بهتر می تواند تأثیر آبد در طرح ریزی سناریوی برداشت از میدان را در نظر بگیرد. از فواید وجود آبد، افزایش ضریب برداشت در ناحیه ای که آبد وجود دارد. زمانی که در شرایط یکسان تولید، در یک سمت مخزن آبد کناری وجود داشته باشد، آبد بخشی از فشار از دست رفته مخزن را بر گردانده و با جاروب کردن نفت به سمت چاه های تولیدی همان کشور سبب ثابت ماندن تولید برای مدت زمان طولانی تری می شود. در ناحیه ای که آبد به مخزن نفوذ کرده تقریباً تمام نفت قابل برداشت جاروب شده و به سوی چاه های آن کشور و هم چنین مرز کشور همسایه حرکت کرده است. در شکل ۶-۶ که یک مخزن نفتی است آبد مهم ترین عامل مهاجرت نفت است اما در مخزن نفتی شکل ۷-۷، اثر آبد به اندازه مخزن نفتی نیست؛ دلیل آن هم تأثیر کمتر آبد بر عملکرد مخازن گازی در مقایسه با مخازن نفتی است.

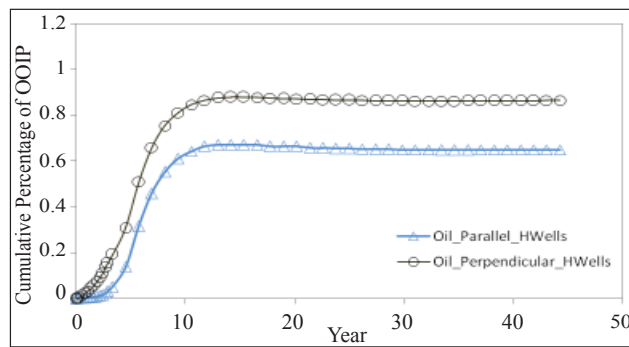
باید دقت داشت که آبد با توجه به میزان قدرتش می تواند موجب مهاجرت سیال مرزی مخزن نفتی به کشور همسایه گردد. در صورتی که آبد تنها در قسمتی از کناره مخزن فعال باشد یا قدرت آن در نگهداشت فشار کم باشد به همین میزان از نتایج حاصل کاسته خواهد شد.

### ۴- مطالعه موردی مهاجرت سیال در میدان گازی پارس جنوبی

مخزن مشترک پارس جنوبی بزرگ ترین مخزن گازی جهان با ۵۱ تریلیون متر مکعب گاز و ۴۷ میلیارد بشکه نفت در جابین کشورهای ایران و قطر قرار گرفته است. این مخزن دارای ۱۵۵ کیلومتر طول، ۷۵ کیلومتر عرض و ضخامت کلی ۴۳۵ متر می باشد و حدود ۳۸ درصد آن در ایران قرار دارد. تاقدیس این مخزن دارای دوشیب ۰/۶ درجه شرقی غربی و ۰/۵ درجه شمالی جنوبی است. فشار اولیه مخزن ۵۲۹۰ پام است و توزیع تراوایی و تخلخل مخزن مناسب می باشد.



شکل ۵ | مهاجرت سیال در یک مخزن گازی در حالی که چاه های افقی به شکل موازی و عمود بر مرز احداث شده اند



شکل ۶ | مهاجرت سیال در یک مخزن نفتی در دو حالت؛ با چاه های افقی به شکل موازی و عمود بر مرز



توسعه میدان را به تأخیر بیاندازد. هم‌چنین در توسعه فازهای جدید، ایجاد چاه‌های افقی در نزدیکی مرز و در محل‌هایی با تراوایی زیاد و تخلخل کم می‌تواند به‌عنوان یک روش میانبر مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات مکانیک سنگ جهت افزایش بهره‌وری طولانی‌مدت چاه‌ها برای این نوع مخازن مشترک بسیار ضروری است. در این مقاله به دلیل فقدان اطلاعات کافی، تأثیر آبدۀ در مخزن پارس جنوبی لحاظ نشده است. به دلیل اینکه ایران سهم کمتری از این میدان دارد، این عامل نیز باید در بررسی‌های آینده لحاظ گردد.

**۵- بحث**

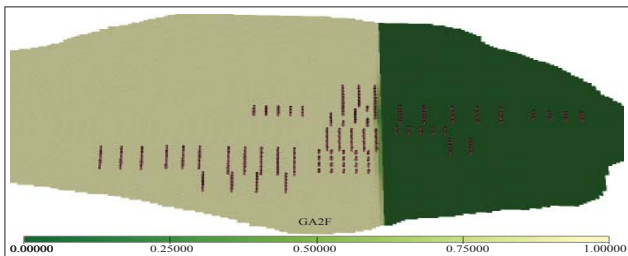
اگر چه با بررسی مدل هر مخزن مشترک می‌توان بهترین سناریوی تولید را برای آن استخراج کرد ولی شناخت متغیرهای حاکم بر مدیریت سیال مرزی مخزن می‌تواند در تعیین سناریوی نهایی توسعه و تولید از میدان مشترک نقشی کلیدی داشته باشد. عوامل کلیدی، در مدیریت حرکت سیال نفتی بین مرز دو کشور به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند؛ نخست عوامل توسعه مخزن و دوم عوامل ذاتی مخزن. عوامل توسعه مخزن مانند زمان آغاز تولید، محل حفر چاه‌های تولیدی و نحوه حفر آنهاست که در اختیار شرکت بهره‌بردار می‌باشد و هرچه کشورهای ذینفع در یک مخزن مشترک، سریع‌تر اقدام به بهره‌برداری نموده و چاه‌های خود را نزدیک‌تر به مرز مشترک حفر کنند در بهره‌برداری از سیال مرزی مخزن پیشی خواهند گرفت. این عامل سبب کاهش پتانسیل تولید در طرف مقابل شده و موجب کاهش نفت قابل برداشت آن کشور می‌گردد. در شکل‌های ۲ و ۳ تأثیر هر یک از عوامل توسعه‌ای مخزن به صورت درصدی از نفت در جای مهاجرت کننده ارائه شده است.

با توجه به این مسئله در صورتی که به هر دلیلی، دو کشور جهت بهره‌برداری با مدیریت مشترک از میدان به توافق نرسند باید تا حد امکان چاه‌های تولیدی خود را نزدیک مرز احداث کنند. این عامل نه تنها مانع مهاجرت کامل نفت

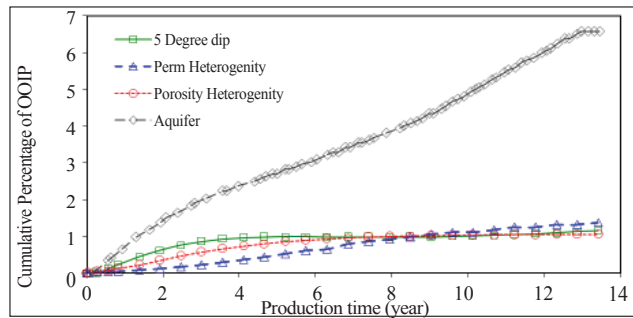
مدل استاتیک مخزن به همراه چاه‌هایی که در فازهای مختلف در دو کشور حفر شده‌اند در شکل ۸ ارائه شده است. در این مدل از داده‌های موجود در مقالات علمی برای تهیه مدل استاتیک استفاده شده است [۹۸]. تفاوت فازهای تولید در دوسوی مرز در طول زمان برداشت، تولید متفاوتی را رقم زده است. کشور همسایه تولید خود را در سال ۱۹۹۱ به‌طور پیوسته آغاز کرده و تا سال ۲۰۱۰ با به خدمت گرفتن شرکت‌های بزرگ صنعت نفت به تولیدی نزدیک به ۵۰۰ میلیون مترمکعب در روز رسیده است (شکل ۹).

ایران پس از حدود ۱۲ سال از آغاز تولید قطر، در سال ۲۰۰۲ تولید از مخزن را آغاز کرده است. توسعه میدان در ایران از بخش شمالی میدان ادامه می‌یابد تا در سال ۲۰۱۱ تولید به رقم ۱۳۰ میلیون مترمکعب در روز بالغ می‌گردد. تأخیر کشورمان در تولید، نرخ تولید کمتر ایران نسبت به قطر، وجود تعداد چاه‌های بیشتر در قطر، وجود چاه‌های افقی و نزدیکی این چاه‌ها به مرز در سمت قطر و در نهایت شیب ۰/۵ درجه‌ای میدان به سمت این کشور، سبب مهاجرت بخشی از گاز کشورمان به سوی قطر گردیده است. روند نشان داده شده با خط -دایره مشکی رنگ در شکل ۹- مقدار گاز مهاجرت کرده از مرزهای ایران را نشان می‌دهد. نمایش تصویری این مهاجرت در شکل ۸- نشان داده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، تا سال ۲۰۱۰ مقدار ۸۳ میلیارد مترمکعب گاز از مرز ایران مهاجرت کرده که با ادامه روند کنونی این مقدار در سال ۲۰۳۵ به بیش از ۲۴۰ میلیارد مترمکعب خواهد رسید. دو کشور ایران و قطر در سال‌های اخیر سرمایه‌گذاری‌های زیادی جهت بهره‌برداری از این میدان انجام داده‌اند. افاق تولید روزانه ۹۰۰ میلیون مترمکعب گاز می‌تواند نتایج حاصل از پیش‌بینی مقدار گاز مهاجرت کرده را دچار تغییر کند [۱۰].

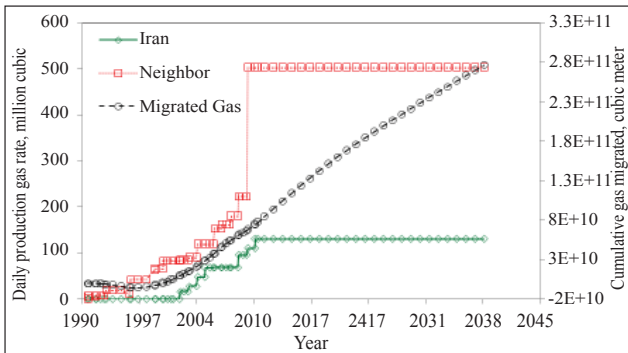
نکات ذکر شده در این مقاله و توجه به عوامل اصلی تأثیرگذار در مهاجرت سیال از مرزها را می‌توان به‌عنوان راهنمایی برای برنامه‌ریزی‌های آینده این مخزن دانست. نکته حائز اهمیت‌تر اینکه کشور تحت هیچ شرایطی نباید روند



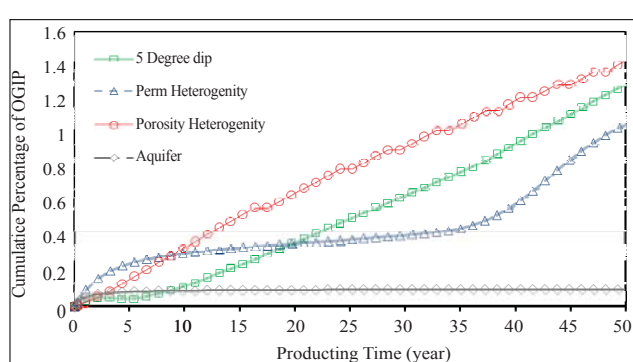
شکل ۸ | نمایی از مدل شبیه‌سازی شده مخزن گازی پارس جنوبی و چاه‌های تولیدی؛ رنگ سبز نشان‌دهنده گاز ایران است که ۷۰ میلیارد مترمکعب آن تا ۲۰۱۰ به کشور قطر مهاجرت کرده



شکل ۶ | اثر عوامل ذاتی مخزن بر مهاجرت نفت از مرز در یک مخزن نفتی



شکل ۹ | تولید گاز ایران و قطر از سال ۱۹۹۱ و مقدار کلی گاز مهاجرت کرده از ایران



شکل ۷ | اثر عوامل ذاتی مخزن بر مهاجرت گاز از مرز در یک مخزن گازی

که با همسایگان خود دارای مخازن نفتی مشترکی با حجم حدود ۷۲ میلیارد بشکه نفت در جامی باشد بسیار حائز اهمیت است.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که در مدیریت سیال مرز مخزن، شناخت رفتار موج افت فشار از عوامل کلیدی است که در اثر شناخت درست این عامل، بهره‌وری از میادین مشترک مناسب خواهد بود. علاوه بر این، عوامل مؤثر بر حرکت سیال در مرز مخزن بررسی و مشخص شد که اگر چه بهره‌وری زود هنگام، عاملی تعیین کننده است ولی عوامل زیر نیز بر مدیریت مهاجرت سیال نفتی در مرزهای کشورهای همسایه تأثیر گذار خواهد بود:

■ محل چاه‌های تولیدی و افقی بودن آنها تأثیر چشم‌گیری بر حرکت سیال از مرز دارد. هر چه چاه‌ها به مرز نزدیک‌تر باشند امکان جریان یافتن سیال از سمت دیگر مرز به سمت خودی بیشتر خواهد بود. تولید باید بدون توقف و با بیشترین نرخ از این چاه‌ها انجام شود تا جهت هدایت سیال مرزی به سمت خودی، موج افت فشار مناسب به مرز ارسال گردد.

■ حفاری و تولید چاه‌هایی که در ناحیه‌ای از مخزن با نفوذپذیری مناسب‌تر و تخلخل کمتر قرار دارند باید در اولویت قرار گیرد. این امر سبب می‌شود تا موج فشاری قوی‌تری به مرز ارسال شده و این موج با سرعت بیشتری به سمت دیگر مخزن منتقل گردد تا علاوه بر حرکت سیال از مرز به سمت خودی، حداکثر بهره‌وری از آهنگ افت فشار مخزن انجام شود.

■ وجود شیب مناسب در مخزن می‌تواند تولید نفت از چاه‌ها را برای مدت بیشتری افزایش دهد؛ چرا که کلاهیگ گازی در تیغ مخزن ایجاد شده و افت فشار را کنترل می‌کند. این مسئله در کشوری که تیغ مخزن در آن قرار دارد باعث کاهش تولید نفت خواهد شد.

■ اگر آبرده قوی فقط در یک سوی مخزن واقع شود، به دلیل اینکه آبرده افت فشار حاصل از موج فشار را جبران می‌کند، در حالت کلی نفت مرز مخزن به سمت همسایه برانده می‌شود.

■ اگر کشوری دیرتر اقدام به تولید از مخزن مشترک کند، می‌تواند با حفر چاه‌های بیشتر در نزدیکی مرز و نیز تمرکز حفاری در نقاطی از مخزن که تراوایی زیادی دارند و هم‌چنین حفاری افقی موازی با مرز تا حدودی عقب‌ماندگی بهره‌وری خود را جبران کند. ■

به کشور همسایه می‌شود بلکه گاهی می‌تواند تا نیمی از تولید چاه را از کشور همسایه تأمین کند. با این استراتژی یک کشور علاوه بر جلوگیری از مهاجرت سیال مرزی، می‌تواند با کنترل شرایط مهاجرت، خود را در شرایط دست بالای تولید قرار دهد. کشوری که از لحاظ زمانی در تولید عقب می‌ماند اگر آهنگ توسعه مخزن را افزایش نداده و از عوامل مؤثر در مدیریت سیال مرزی مخزن بهره نگیرد، امکان جبران خسارت را از دست خواهد داد و تنها در باقیمانده نفت مخزن سهم خواهد بود.

از عوامل مهم ذاتی مخزن می‌توان به شیب آن اشاره کرد که هر چه در یک میدان نفتی بیشتر باشد، شرایط تولید به سود پایین دست مخزن خواهد بود. از دیگر عوامل ذاتی، وجود آبرده است که با توجه به اثری که روی حفظ فشار و نرخ تولید دارد در مجموع سبب ثابت ماندن توان تولید آن قسمت خواهد شد. ولی با جاروب نفت به سمت چاه‌های نزدیک خود می‌تواند سبب مهاجرت نفت به سمت دیگر مخزن گردد. از دیگر عوامل مهم ذاتی مخزن، خواص سنگ و سیال مخزن یا به طور کلی ناهمگونی<sup>۷</sup> است که هم بر توان تولید یک میدان و هم در برداشت نهایی از یک میدان تأثیر گذار خواهد بود. در واقع اثر عوامل ذاتی تخلخل و تراوایی سنگ و هم‌چنین گرانیروی و تراکم‌پذیری سیال توسط رابطه نفوذ (رابطه ۳) روی زمان و سرعت حرکت موج  $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$  نمایانگر است. هر چه مقدار  $\eta$  در یک سوی مخزن بیشتر باشد (تراوایی بیشتر، تخلخل، گرانیروی و تراکم‌پذیری کمتر)، تولید آن قسمت از مخزن در مقایسه با طرف مقابل بیشتر است و نفت مرزی نیز به آن سمت مهاجرت خواهد کرد. در واقعیت برای یک مخزن خواص سیال یعنی گرانیروی و تراکم‌پذیری آن ثابت است ولی تراوایی و تخلخل مخزن می‌تواند در نقاط مختلف متفاوت باشد. بنابراین کشوری که از تولید عقب افتاده باید سعی کند با مطالعه و کسب شناخت از مخزن چاه‌های بیشتری در نقاطی با تراوایی زیاد یا نقاطی که با داشتن تراوایی زیاد تخلخل کمتری دارد حفر نماید. اثر خصوصیات ذاتی مخزن بر درصد نفت مهاجرت کرده از مرز در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

با توجه به همه عوامل می‌توان گفت در یک میدان مشترک نه تنها از جهت سرمایه گذاری زود هنگام بلکه برای کسب اطلاعات و شناخت مخزنی نیز رقابتی تنگاتنگ بین کشورهای تولید کننده وجود دارد. در این رقابت پیروزی با کشوری است که با شناخت مخزن و درک بهتر عوامل تأثیر گذار بر حرکت سیال مرزی، از طریق طراحی مهندسی، سرمایه گذاری بیشتری انجام دهد. این مهم برای ایران

### پانویس‌ها

1. abolfazl\_hashemi@yahoo.com

2. s\_shokrolahzadeh@ahwaz.put.ac.ir

3. diffusivity equation

4. waves super position rule

5. Mobility Ratio

6. edge aquifer

7. heterogeneity

### منابع

[1] <http://www.mehnews.com/fa/newsdetail.aspx?NewsID=1360901>, August 2011.

[2] علی خواجوی، (دی ۱۳۹۰) "بررسی راهبردهای قطر در بهره‌برداری از بخش قطری میدان پارس جنوبی و ارائه راهکار برای تسریع ایران در توسعه بهینه بخش ایرانی" ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۸۶، صفحه ۵-۱۱.

[3] رضا عاقبتی، (۱۳۸۸) "معرفی یک میدان طرح توسعه میدان آزادگان"، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۵۱، صفحه ۹-۶.

[4] Weems, Ph. Fallon, A. (2012) "Strategies for Development of Cross-Border Petroleum Reservoirs", EneryNewsletter, King & Spalding.

[5] Singh, M. Singh, L.P. Husain, A. (2010) "Propagation of nonlinear travelling waves in Darcy-type porous media" Acta Astronautica, Vol67, Iss 9-10, 1053-1058p.

[6] Ren, J. Röckner, M. Wang, F.Y (2007) "Stochastic generalized porous media and fast diffusion equations" Journal of Differential Equations, Vol 238, Iss 1, 118-152p.

[7] فاطمه محمدی، حوزه‌های مشترک نفتی: ایران و عراق، مرکز بین‌المللی مطالعات صلح، مرداد ۱۳۹۱  
[8] مهناز دهقان زاده، بهمن بهلولی، محمد رضا رضایی؛ "مقایسه تخلخل و تراوایی حاصل از نمودار NMR با تخلخل و تراوایی مغزه در یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی." پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی،

[http://sid.ir/fa/vewwsid/s\\_pdf/101138424286.pdf](http://sid.ir/fa/vewwsid/s_pdf/101138424286.pdf)

[9] سهیلا روستایی، فهیمه شکرانه، حسین رحیم پور بناب، علی کدخدایی ایلخچی؛ "تخمین تراوایی توسط تکنیک منطق فازی و روش‌های آماری در میدان گاز پارس جنوبی"، نشریه اکتشاف و تولید، مرداد ۱۳۸۸، شماره ۵۹، صفحه ۴۱-۴۶

[10] <http://www.naftnews.net/view-14048.doc>