

# بررسی پدیده نفوذ مولکولی در فرایند ذخیره سازی گاز طبیعی در یک مخزن نفتی تخلیه شده ی شکافدار

یوسف کاظم زاده<sup>۱</sup>، مسعود ریاضی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی نفت

۲- دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، استادیار بخش مهندسی نفت

mriazi@shirazu.ac.ir

## چکیده

مخازن شکافدار بخش عمده ای از مخازن هیدرو کربوری کشور را تشکیل می دهند. عملکرد مخازن شکافدار با مخازن معمولی متفاوت می باشد. در مخازن شکافدار مکانیزم های زیادی به تولید کمک می نماید. یکی از مکانیزم های که به تولید کمک می کند پدیده نفوذ مولکولی (Diffusion) می باشد. این پدیده هنگامی که گاز در تماس با نفت قرار گیرد تاثیر خود را نمایان تر نشان می دهد. نفوذ مولکولی در مخازن شکاف دار بر خلاف مخازن معمولی می تواند به صورت موثر بر بازده تزریق گاز در مخازن نفتی و یا ذخیره سازی گاز طبیعی موثر باشد. ذخیره سازی گاز طبیعی در مخازن شکافدار دارای نفت با توجه با عدم امکان تخلیه کامل نفت موجود در فضای خالی، باعث می شود گاز تزریقی در تماس با نفت در جای مخزن قرار بگیرد، بنابراین مکانیزم نفوذ مولکولی در طولانی مدت خود را نشان دهد و میزان بازدهی ذخیره سازی را کنترل می نماید.

در این مطالعه ذخیره سازی گاز طبیعی درون یک مخزن شکافدار دارای نفت سنگین مورد بررسی قرار می گیرد. در این مقاله اثر پدیده نفوذ مولکولی سیالات بر میزان تولید نفت و گاز در برداشت اولیه نفت مخزن به منظور تخلیه، آماده سازی اولیه جهت تزریق گاز برای فرآیند ذخیره سازی و همچنین عملکرد مخزن حین حضور گازی غیر از گاز آزاد شده از نفت در طولانی مدت در حضور و عدم حضور مکانیزم نفوذ مولکولی تجزیه و تحلیل می شود. طبق مطالعه انجام شده نفوذ مولکولی هر چند به مقدار اندک اما در فرایند ذخیره سازی گاز طبیعی در مخازن تخلیه شده ی نفتی به دلیل حضور هم جوار نفت و گاز میزان بازدهی فرایند را تحت تاثیر قرار می دهد. به دلیل حضور گازی با ترکیبات متفاوت از گاز مخزن، عملکرد مخزن چه از نظر تولید و چه از نظر تزریق پذیری تغییر می کند.

کلمات کلیدی: نفوذ مولکولی، مخازن شکافدار، ذخیره سازی گاز طبیعی، شبیه سازی، مخازن نفتی تخلیه شده،

## ۱- مقدمه

یک مخزن معمولی تطبیق داد. به طور تقریبی می توان با چند برابر کردن میزان سیال در جای یک مخزن معمولی به رفتاری مشابه یک مخزن شکافدار رسید [1]. اما این تقریب تنها در شرایط خاصی معتبر است. بنابراین باید تفاوت های مخازن شکافدار و معمولی چه از لحاظ ساختار و چه از لحاظ مکانیزم های تولید مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند. در حالت استاتیک (قبل از تولید) سطوح تماس فازهای

مخازن شکافدار بخش عمده ای از مخازن هیدروکربوری کشور را تشکیل می دهند. مهندسان مخزن اغلب تلاش می کنند تا با بررسی تاریخچه و تقریب هایی از مخازن معمولی عملکرد آینده یک مخزن شکافدار را پیش بینی نمایند. اما تفاوت مخازن شکافدار و معمولی آن چنان زیاد است که رفتار واقعی یک مخزن شکافدار را به سختی می توان با رفتار

مختلف در مخازن شکافدار به صورت خطی، کاملاً مجزا و افقی هستند. به عبارت دیگر هیچ ناحیه گذاری وجود ندارد و نواحی مخزن از بالا به پایین به سه ناحیه گاز، نفت، آب تقسیم بندی می شوند. در حالت دینامیک (در زمان تولید) فشار مخزن به زیر فشار نقطه حباب می افتد. باید توجه داشت که به علت درجه اشباع مختلف سیالات در ماتریس و شکاف، مکانیزم های متفاوتی در هر یک از نواحی فعال می باشد [1].

معمولاً در مطالعات مربوط به جریان غیر امتزاجی گاز و نفت در یک محیط متخلخل، فرایند نفوذ مولکولی در نظر گرفته نمی شود. این بدان دلیل است که در یک سیستم بزرگ مانند یک مخزن، فرایند نفوذ غیر تعادلی گاز یا گاز محلول در نفت که حاوی حجم متفاوتی از گاز محلول می باشد بسیار طولانی و زمان بر است. بنابراین می توان مشاهده کرد که تغییرات ترکیب سیال اغلب بسیار بیشتر از حالتی است که بر اثر پدیده نفوذ مولکولی در طول یک دوره مشخص از زمان به وقوع می پیوندد. از سوی دیگر در مخازن نیمه شکافدار تا کاملاً شکافدار که نفت درون شکاف های عمودی بر اثر گرادیان دمایی دچار همرفت می گردد، فرایند نفوذ مولکولی نقش مهمی را بازی می کند. در اثر این فرایند با کاهش فشار مخزن، حجم زیادی از گاز از بلوک ماتریکس و از درون منطقه نفتی به سمت کلاهک گازی جابجا می شود. به عکس با افزایش فشار مخزن این فرایند باعث انتقال گاز کلاهک گازی به بلوک های ماتریکس می گردد.

هنگامی که در یک مخزن شکافدار پدیده نفوذ مولکولی به وقوع می پیوندد، با کاهش فشار مخزن، حجم زیادی از گاز موجود در ستون نفتی به کلاهک گازی منتقل می گردد و بالعکس. این امر باعث کاهش فشار حباب اولیه نفت موجود در بلوک های ماتریکس و کوچک تر شدن ناحیه گاز زده در مخزن می گردد. بنابراین برای در دست داشتن یک تحلیل مناسب از یک مخزن مخصوصاً بر حسب بازدهی جابجایی گاز و نفت، موقعیت چنین حجم گازی تاثیر مهمی در نتایج تحلیل (راندمان جابجایی ها) خواهد داشت [1].

بررسی نفوذ مولکولی اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط ارتکین<sup>۱</sup> و همکاران به جامعه علمی ارائه شد [2]. این گروه یک الگو را به منظور مشخص نمودن اهمیت هر کدام از دو عامل تولید سیال (دارسی و فیکس) را برای مخازن معمولی پیشنهاد داد. اما از آنجایی که کار این گروه در مخازن معمولی با تراوایی بسیار پایین (در حد ۰/۰۱ میلی دارسی) کاربرد داشت و این

مخازن نیز به ندرت یافت می شوند کار ارتکین و همکاران در آن سال ها چندان مورد استقبال مهندسان نفت واقع نشد. در سال ۲۰۰۵ آیالا<sup>۲</sup> در تز دکترای خود به راهنمایی ارتکین در دانشگاه پنسیلوانیا بر روی موضوع مکانیزم های چندتایی مخازن گاز میعانی شکاف دار مطالعه نمود [3]. در اهمیت این موضوع همین بس که در فرآیند تزریق گاز طبیعی در یک مخزن شکاف دار با تراوایی ماتریس خیلی کم، شبیه سازی که در آن نفوذ مولکولی در نظر گرفته نشده است تزریق در فشار بالاتر را پیشنهاد می کند در حالی که براساس مدل ورن و روت<sup>۳</sup> [4] آنچه در عمل مشاهده می شود این است که تزریق در فشار بالا، علاوه بر بالا بردن هزینه تزریق، میان شکنی زود هنگام گاز تزریقی را هم به دنبال خواهد داشت. برعکس مدل سازی که در محاسبات خود نفوذ مولکولی را در نظر می گیرد، تزریق با فشار بالا را پیشنهاد نمی کند چرا که در مخازن شکاف دار با تراوایی خیلی کم بلوک های ماتریس عملاً گرادیان فشاری سهم زیادی در تولید هیدروکربن نخواهد داشت و عمده هیدروکربن تولید شده به دلیل پدیده نفوذ مولکولی می باشد [5]. پدیده نفوذ مولکولی هم در حالت تک فازی و هم در حالت دو فازی در مخزن اتفاق می افتد که در حالت دو فازی مخازن شکاف دار از اهمیت بیشتری برخوردار است.

وقتی دو فاز گاز و مایع در تماس با همدیگر قرار می گیرند، سه مرحله انتقال جرمی مختلف اتفاق می افتد: ابتدا گاز به سمت مرز گاز-مایع حرکت می کند سپس درون مرز نفوذ کرده و نهایتاً وارد فاز مایع میگردد. انتقال جرم گاز در نفت خام باعث می شود برخی خصوصیات مرزی بین گاز و مایع تغییر کند. در گذشته مطالعات زیادی صورت گرفته است تا پارامترهای انتقال جرمی را ارزیابی نماید [6-8]. این پژوهش ها را می توان به طور کلی به دو دسته ی روش های مستقیم و غیر مستقیم تقسیم کرد. در همه روش ها گاز در تماس با مایع قرار گرفته و در یک شرایط دمایی ثابت، داده های اندازه گیری شده در یک مدل انتقال جرمی قرار داده می شوند تا ضریب نفوذ گاز را در مایع محاسبه کنند. در فرایند ذخیره سازی گاز طبیعی همواره بحث نفوذ و ضریب نفوذ اهمیت دارد، به خصوص هنگامی که مخزن مورد مطالعه از نوع تخلیه شده ی نفتی باشد.

در فرایند ذخیره سازی گاز طبیعی، پیش بینی میزان تزریق پذیری و همچنین میزان تولید مخزن بسیار حائز اهمیت است. ساختار مورد مطالعه یک مخزن هیدروکربوری دارای نفت سنگین می باشد.

2. Ayala

3. Warren & Root

1. Ertekin



بعد از تخلیه شدن نیمی از مخزن برای یک دوره ی بلند مدت ۲ تا ۷ ساله فرایند ذخیره سازی در مخزن انجام می شود. در فرایند ذخیره سازی، نفت و گاز چه در حین تزریق و چه پس از آن (در چرخه های تولید و تزریق) برای مدت طولانی در مجاور یکدیگر قرار خواهند گرفت، لذا باید پیش بینی تغییرات دبی تزریق و تولید همچنین فشار متوسط مخزن را تحت تاثیر پدیده نفوذ مورد مطالعه قرار داد. نادیده گرفتن میزان تغییرات ناشی از پدیده نفوذ باعث تخمین پایین میزان تزریق پذیری گاز و تخمین بالای فشار تزریق می شود که این خود احتمال شکست پوش سنگ را به همراه خواهد آورد. در تولید از مخزن نیز نادیده گرفتن پدیده نفوذ باعث پیش بینی نادرست دبی تولید و فشار متوسط مخزن می شود.

## ۲- روش انجام کار

این مطالعه بر روی یکی از ساختارهای زمین شناسی واقع در استان فارس انجام شده است. ساختار مورد نظر دارای افق های زمین شناسی مختلفی می باشد و از بین گروه های

مختلف زمین شناسی، گروه های بنگستان، خامی، کازرون و دهرم دارای پتانسیل ذخیره سازی گاز طبیعی می باشد. از بین گروه های ذکر شده گروه بنگستان دارای نفت سنگین می باشد که در صورت تخلیه نفت این گروه و ایجاد فضای متخلخل مناسب جهت قرار گیری گاز طبیعی درون ساختار می تواند گزینه مناسبی جهت ذخیره سازی گاز طبیعی باشد [9]. گروه خامی این ساختار غالباً از آب اشباع [10] و گروه های کازرون و دهرم نیز عمدتاً حاوی گاز نیتروژن می باشد [11]. همانطور که ذکر شد گروه بنگستان دارای نفت سنگین بوده و با توجه به وسعت زیاد این ساختار و ضخامت زیاد، دارای نفت درجای بسیار زیادی می باشد که تخلیه کامل نفت موجود در گروه زمین شناسی بنگستان بصورت عملی میسر نیست. لذا در این مطالعه فرض می شود ۵۰ درصد نفت با استفاده از تکنیک های مخصوص برداشت از مخازن نفت سنگین تولید می شود و سناریو تزریق گاز جهت ذخیره سازی از این زمان آغاز می شود. خصوصیات نفت درجا و گاز تزریقی که از خط لوله سراسری که از مجاور ساختار عبور می نماید در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱ ترکیب نفت درجای مخزن [12]

Component	Mole percent
CO <sub>2</sub>	۱/۴۰۵۰
C <sub>1</sub>	۴۴/۴۸۹
C <sub>2</sub>	۸/۰۲۷۲
C <sub>3</sub>	۵/۴۹۳۵
iC <sub>4</sub>	۱/۸۴۲۷
nC <sub>4</sub>	۴/۵۸۳۷
iC <sub>5</sub>	۱/۸۴۲۷
nC <sub>5</sub>	۱/۹۸۰۹
C <sub>6</sub> <sup>+</sup>	۳۰/۳۳۵

جدول ۲ ترکیب گاز تزریق به مخزن [11]

Component	Mole percent	Component	Mole percent
CO <sub>2</sub>	۰/۸۶۵۹	iC5	۰/۰۰۷۰۱
H <sub>2</sub> S	۰/۰۰۰۳	C5	۰/۰۰۱۹۴
H <sub>2</sub> O	۰/۰۰۳۲	C6	۰/۰۰۰۰۹
N <sub>2</sub>	۳/۵۵۰۰	C7	۰/۰۱۶۳۰
C1	۸۷/۰۰۰	C8	۰/۰۰۷۰۷
C2	۵/۵۶۱۴	C9	۰/۰۰۰۸۲
C3	۲/۰۴۸۷	C10	۰/۰۰۰۰۹
iC4	۰/۳۶۸۶	C11	۰/۰۰۰۰۱

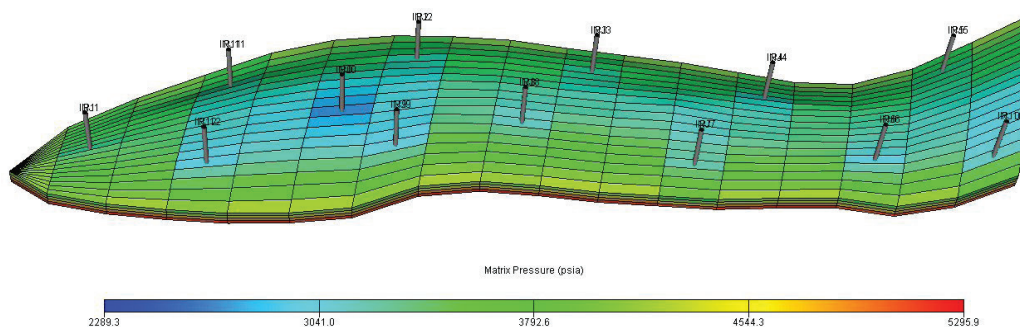
از نمودارهای چاه پیمایی برداشت شده و پس از بررسی T تجزیه و تحلیل وارد مدل استاتیک گردید. در سناریو تعریف شده در این مطالعه برای تزریق یا تولید از مخزن از یک الگوی تقریباً منظم ۱۳ حلقه چاه درون مدل استاتیک استفاده گردید. خصوصیات کلی و پتروفیزیکی مخزن مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است. مدل استاتیک و موقعیت مکانی چاه ها نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

پس از ساخت مدل PVT به وسیله نرم افزار PVTi خواص سیالات مخزن جهت استفاده وارد شبیه ساز اکلیپس شد. برای بررسی دقیق مخزن، نیاز به ساخت مدل استاتیک می باشد. از نقشه های زمین شناسی موجود برای تکمیل مدل استاتیک استفاده شد. مدل استاتیک با استفاده از نقشه های در دسترس به وسیله نرم افزار پترل ساخته شده است. برای شبیه سازی تولید و تزریق مخزن نیاز به اطلاعات پتروفیزیکی می باشد که

جدول ۳ خصوصیات کلی و پتروفیزیکی مدل طراحی شده برای مخزن مورد مطالعه [12]

Properties	Values
Porosity (%)	۱۰
Permeability x,y (mD)	۵
Permeability z (mD)	۰/۵
Inter porosity coefficient (-)	۰/۰۱
Datum Depth (ft)	۶۵۶۱
Pressure (psia)	۴۶۰۰
WOC Depth (ft)	۷۵۰۰
Number of wells (-)	۱۳





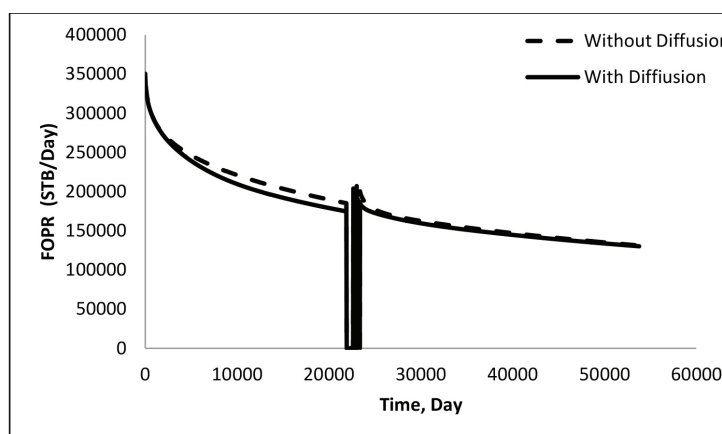
شکل ۱ موقعیت مکانی چاه ها و توزیع فشار در مدل استاتیک ساخته شده در این مطالعه

پدیده نفوذ مولکولی مورد بررسی قرار می گیرد. بررسی عملکرد مخزن در ۴ بازه ی زمانی بررسی می شود. بازه ی اول شامل برداشت طولانی مدت از نفت موجود در مخزن به منظور تخلیه نیمی از فضای خالی جهت قرارگیری گاز تزریقی می باشد. بازه ی دوم آماده سازی مخزن جهت ذخیره سازی می باشد که به مدت زمانی مشخص به طور پیوسته گاز تزریق می شود تا فضایی از مخزن پر از گاز بالستکی جهت مصرف در چرخه های تولید و تزریق شود. بازه ی سوم چرخه های تولید و تزریق می باشد که در این بازه چاه ها به طور متوالی در چرخه های تولید و یا تزریق ۶ ماهه قرار می گیرند. بازه ی چهارم زمانی صرفاً جهت بررسی عملکرد مخزن و پدیده نفوذ حین حضور گازی غیر از گاز آزاد شده از نفت مخزن می باشد. این بازه نیز در مدت زمان طولانی بررسی می شود تا پدیده نفوذ مولکولی بهتر نمایان شود. شکل ۲ میزان تولید نفت میدان را بر حسب زمان نشان می دهد.

فشار اولیه مخزن در عمق مینا (۶۵۶۱ فوت) برابر ۴۶۰۰ پام در نظر گرفته شده است و با توجه به گرادیان سیال موجود در مخزن، در کل مخزن توزیع شده است (شکل ۱). ضریب نفوذ ترکیبات مختلف نفت درجا براساس داده های منابع تعیین شده است [2] و ضریب نفوذ اجزای گاز تزریقی در نفت نیز ۱۰۰ برابر ضریب نفوذ اجزای موجود در نفت در گاز در نظر گرفته شده است. در زمان تولید کنترل بر فشار ته چاهی می باشد بدین صورت که هر گاه فشار ته چاهی به ۱۰۰۰ پام برسد تولید از چاه مربوطه قطع می شود. در زمان تزریق نیز کنترل بر دبی بوده و میزان تزریق ۳ میلیون فوت مکعب در روز به ازای هر چاه در نظر گرفته شده است.

### ۳- آنالیز نتایج

بعد از طراحی مدل استاتیک و دینامیک مخزن، میزان تولید نفت و گاز در هر کدام از سناریو های وجود یا عدم وجود



شکل ۲ دبی تولید نفت میدان در حضور (نمودار ممتد) و عدم حضور (خط منقطع) پدیده نفوذ مولکولی بر حسب زمان.

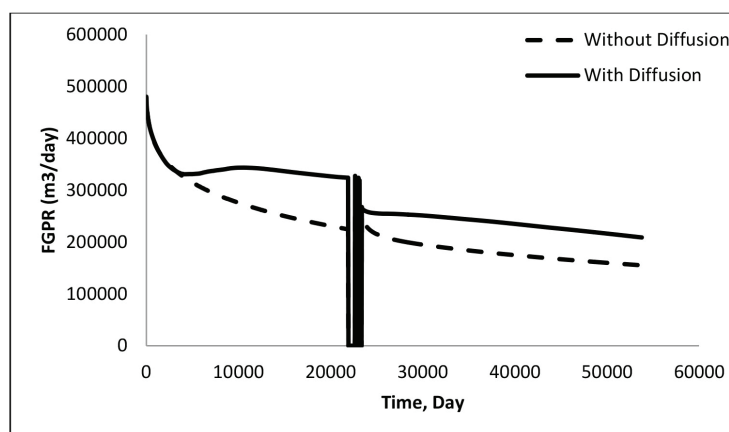




تفاوت را می توان در حرکت آسان تر گاز در مقایسه با نفت و در نتیجه تولید بیشتر گاز دانست. اما پس از تزریق گاز طبیعی به مدت ۲ سال و قرار گیری در چرخه های تولید و تزریق این مخزن برای بررسی اثر پدیده نفوذ مولکولی در حضور گازی غیر از گاز آزاد شده از نفت درجا در یک دوره طولانی مدت با کنترل بر فشار ته چاهی ثابت (فشار ۱۰۰۰ پام ته چاهی) برداشت دوباره صورت می پذیرد. اما این بار وجود پدیده نفوذ مولکولی باعث می شود که با شیب بیشتری (شیب کمتر افت) نفت تولید شود.

شکل ۳ دبی گاز تولیدی را بر حسب زمان برای هر دو حالت وجود و عدم وجود مکانیزم نفوذ مولکولی در مخزن شکافدار مورد نظر را نشان می دهد.

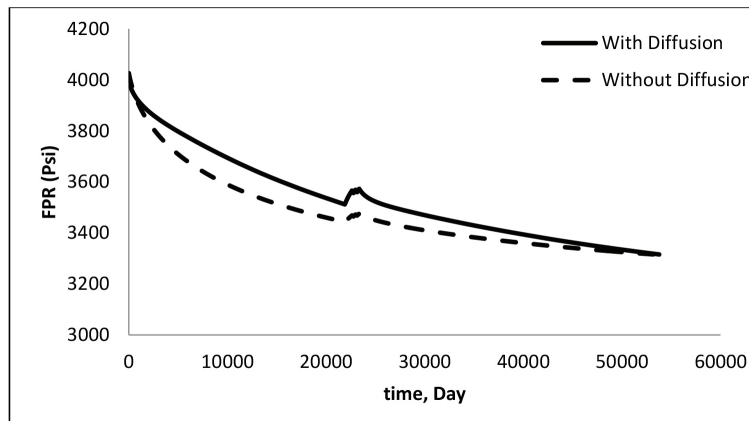
همانطور که شکل ۲ نشان می دهد ابتدا در یک دوره ی طولانی برداشت نفت از مخزن مورد نظر صورت می پذیرد تا تقریباً ۵۰ درصد از فضای مورد نظر جهت ذخیره سازی گاز طبیعی تخلیه گردد سپس گاز خط لوله سراسری چهارم به مدت ۲ سال با دبی ثابت ۳ میلیون فوت مکعب در روز (MMscf/day) تزریق می شود. این گاز تزریقی ضمن تامین گاز در چرخه های تولیدی و گاز بالشتکی مورد نظر، فشار مخزن را نیز بالا می برد و افت فشار صورت گرفته در دوره ی طولانی مدت برداشت نفت را جبران می کند. نکته ای دیگر که از شکل ۲ بر می آید این است که در دوره ی اولیه برداشت، فعال بودن و در نظر گرفتن مکانیزم نفوذ مولکولی (نمودار با خط ممتد) هر چند به مقدار اندک باعث می شود که مقدار برداشت نفت کمتر شود. دلیل این



شکل ۳ دبی گاز تولیدی میدان در حضور (نمودار ممتد) و عدم حضور (خط منقطع) پدیده نفوذ مولکولی بر حسب زمان .

عملکرد مخزن در برداشت دوباره قرار گرفت که همانطور که مشاهده می شود همچنان میزان دبی گاز تولیدی در حالتی که نفوذ مولکولی فعال است بالاتر می باشد، اما نتایج این قسمت از شبیه سازی نشان می دهد که هر دو سناریوی وجود و عدم وجود پدیده نفوذ مولکولی در بازه ی زمانی تولید دوم تاثیر چندانی بر تغییر شیب دبی گاز ندارد. شکل ۴ فشار متوسط مخزن را بر حسب زمان نشان می دهد برای حالتی که نفوذ مولکولی در نظر گرفته شده است و برای حالتی که نفوذ مولکولی در نظر گرفته نشده است.

همانطور که شکل ۳ نشان می دهد در برداشت اولیه جهت تخلیه کردن مخزن به دلیل فعال بودن پدیده نفوذ مولکولی دبی گاز تولیدی (نمودار با خطوط ممتد)، نسبت به حالتی که نفوذ مولکولی فعال نمی باشد (نمودار با خطوط منقطع) ، بعد از زمان مشخصی به طور چشم گیری بیشتر می باشد. دلیل این افزایش حرکت آسان گازها به دلیل ضریب نفوذ بالای اجزای تشکیل دهنده ی آن ها و به تبع راهیابی آسان تر به چاه های تولیدی می باشد. اما پس از آماده سازی اولیه به وسیله تزریق گازی غیر از گاز آزاد شده از نفت درجا و قرار گیری در چرخه های تولید و تزریق جهت نمایان نمودن



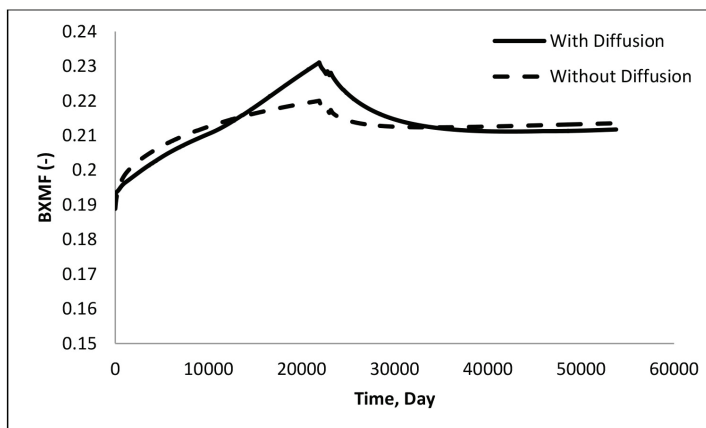
شکل ۴ فشار متوسط مخزن در حضور (نمودار ممتد) و عدم حضور (خط منقطع) پدیده نفوذ مولکولی بر حسب زمان .

شکل ۵ میزان درجه اشباع نفت موجود در بلوک مورد نظر را بر حسب زمان نشان می دهد. طبق شکل ۵ هنگامی که مکانیزم نفوذ مولکولی فعال می باشد (نمودار با خط ممتد) در ابتدای برداشت اولیه مقدار مایعات موجود در بلوک مورد نظر کمتر می باشد اما پس از تولید مقدار زیادی از گاز در این مکانیزم (با توجه به شکل ۳) در صد گاز مورد نظر کم شده در نتیجه میزان مایعات به نسبت افزایش می یابد. اما پس از این که به مدت ۲ سال گاز خط لوله سراسری چهارم که با ترکیبات گاز درجای موجود در نفت مخزن متفاوت می باشد تزریق می گردد مقدار مایعات در موقع فعال بودن مکانیزم نفوذ مولکولی با شیب بیشتری افت می کند تا اینکه مقدار مایعات موجود در این بلوک در هر دو سناریو برابر می شود. دلیل این نیز می تواند این باشد که در برداشت دوم (برداشت بعد از آماده سازی اولیه و سپس قرارگیری در چرخه های تولید و تزریق) مقدار تولید گاز در هر دو سناریو با شیب یکسان افت می کند و تولید نفت به مقدار بسیار اندکی بیشتر می باشد پس قاعدتا میزان مایعات (نفت) موجود در بلوک نیز تقریباً ثابت بوده و در موقعی که مکانیزم نفوذ مولکولی فعال است به مقدار بسیار اندکی، به دلیل تولید بیشتر نفت، کمتر می باشد.

طبق شکل ۴ افت فشار در مخزن متأثر از میزان تولید نفت و گاز می باشد در اینجا تقابل دو سیال در برداشت بسیار مهم می باشد، به این صورت که هر چند در برداشت طولانی مدت اولیه میزان تولید نفت در زمانیکه مکانیزم نفوذ مولکولی فعال می باشد (نمودار با خطوط ممتد)، از زمانی که مکانیزم نفوذ مولکولی فعال نمی باشد (نمودار با خطوط منقطع) کمتر می باشد، اما میزان تولید گاز در هنگام فعال بودن مکانیزم نفوذ مولکولی بیشتر می باشد. در نتیجه، تقابل تولید این دو سیال بر شیب و میزان افت فشار متوسط مخزن تأثیر می گذارد. همانطور که شکل ۴ نشان می دهد، در حالتیکه پدیده نفوذ مولکولی حضور ندارد به دلیل تخلیه بیشتر نفت فشار کمتر خواهد بود. ولی پس از اتمام فرایند آماده سازی و چرخه های تولید و تزریق تولید گاز که با شیب ثابتی در هر دو سناریو انجام می شود و تولید نفت و گاز در وجود مکانیزم نفوذ مولکولی بیشتر می باشد لذا افت فشار نیز در این حالت بیشتر می باشد. تا جایی که در انتهای بازه تولیدی دوم مقدار فشارها برابر می گردند.

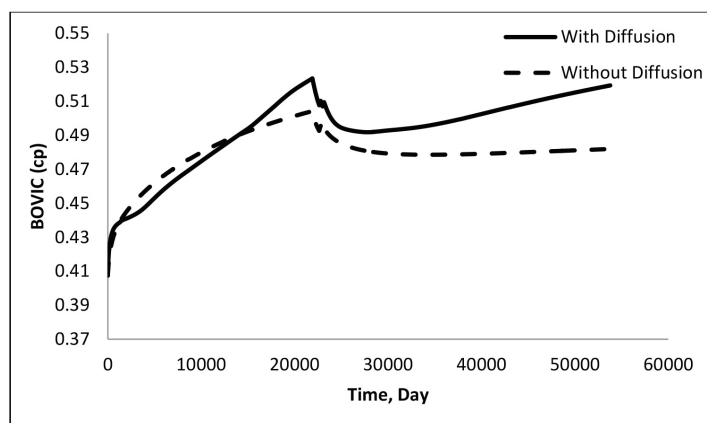
جهت بررسی دقیق تر مکانیزم نفوذ مولکولی، یکی از بلوک های این میدان واقع در نزدیکی چاه موجود در وسط یال بزرگتر از نظر میزان نفت و گاز موجود در آن و هم چنین چگالی سیالات موجود مورد ارزیابی قرار گرفته می شود.





شکل ۵ کسر مولی مایعات موجود در یک بلوک مشخص در حضور (نمودار ممتد) و عدم حضور (خط منقطع) پدیده نفوذ مولکولی بر حسب زمان .

برای تسهیل بیان ویسکوزیته نفت موجود در بلوک مورد نظر بلوک مورد نظر بر حسب زمان نشان می دهد. مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۶ ویسکوزیته نفت را در



شکل ۶ ویسکوزیته نفت موجود در بلوک مشخص شده در حضور (نمودار ممتد) و عدم حضور (خط منقطع) پدیده نفوذ مولکولی بر حسب زمان .

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

ذخیره سازی گاز طبیعی در مخازن تخلیه شده ی نفتی باعث می شود که گازی غیر از گاز محلول در نفت درجا در مخزن در طولانی مدت حضور یابد. وجود این گاز باعث می شود که مکانیزم نفوذ مولکولی بازده فرایند ذخیره سازی چه از نظر میزان تزریق پذیری و چه از نظر میزان گاز تولیدی تحت تاثیر قرار گیرد. مکانیزم نفوذ مولکولی در مخازن شکافدار هر چند به مقدار اندک ولی در طولانی مدت بر میزان تولید نفت و گاز تاثیر می گذارد. نفوذ مولکولی سیالات موجود در مخزن در فرایند ذخیره سازی در مخازن نفتی تخلیه شده تحت تاثیر عوامل زیادی می باشد. از جمله اینکه تفاوت گاز تزریقی و گاز آزاد شده از نفت درجای مخزن، میزان تولید نفت و گاز را به واسطه پدیده نفوذ مولکولی تحت تاثیر قرار

شکل ۶ نشان می دهد در ابتدا ویسکوزیته نفت در هر دو سناریو یکسان می باشد اما هنگامی که تولید نفت از مخزن شروع می شود در سناریویی که مکانیزم نفوذ مولکولی فعال می باشد گاز به سهولت بیشتری حرکت می کند گاز بیشتری تولید می شود (شکل ۳). تولید گاز بیشتر باعث می شود که نفت سنگین تر شود و همانطور که قسمت ابتدایی شکل ۶ نشان می دهد (از روز ۴۰۰ تا روز ۲۰۰۰) ویسکوزیته نفت با شیب بیشتری افزایش یابد. پس از تزریق ۲ ساله گاز و قرار گیری در سیکل تولید و تزریق همچنان تولید گاز در سناریویی که مکانیزم نفوذ مولکولی فعال می باشد بیشتر بوده و در نتیجه میزان گاز موجود در بلوک کمتر می باشد و این باعث بیشتر بودن ویسکوزیته نفت در این سناریو می شود.







47, 5447-5455, 2008.

[7] Yang, D., Gu, Y., "A new experimental technique for studying gas mass transfer in crude oil by analysis of the measures dynamic and equilibrium interfacial tension." , Proceedings of the SPE Annual Technical Conference, San Antonio, Texas, U.S.A., 24-27 September, 2006.

[8] Saboorian-Jooybari, H., "A novel methodology for simultaneous estimation of gas diffusivity and solubility in bitumens and heavy oils". Proceedings of the SPE Heavy Oil Conference Canada, Calgary, Alberta, Canada, 12-14 June 2012

[9] یوسف کاظم زاده، مسعود ریاضی، سید شهاب الدین آیت الهی، بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر IPR (عملکرد مخزن)، TPR (عملکرد چاه) و دبی بهینه تزریق در سیستم ذخیره سازی گاز یکی از مخازن ایران، کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت، ۲۴-۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۲.

[10] آرمین عبداللهی، مسعود ریاضی، سید شهاب الدین آیت الهی، امکان سنجی ذخیره سازی گاز طبیعی در یکی از سازندهای آبی ایران، کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت، ۲۴-۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۲.

[11] امیر گل پرور، یوسف کاظم زاده، مسعود ریاضی، سید شهاب الدین آیت الهی، مطالعه و شبیه سازی میدانی فرآیند ذخیره سازی گاز در یکی از سازندهای حاوی آب واقع در یکی از مخازن جنوب ایران، کنفرانس و نمایشگاه تخصصی نفت، ۲۴-۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۲.

[12] گزارشات مهندسی نفت شرکت ذخیره سازی گاز طبیعی ایران ۱۳۸۴ .

می دهد. وجود شکاف و فعال شدن پدیده نفوذ مولکولی در مخزن باعث می شود که میزان تولید گاز به طور قابل ملاحظه ای افزایش یابد و تولید گاز باعث می شود که چگالی نفت موجود در مخزن افزایش یابد که با توجه به وجود نفت سنگین در مخزن مورد مطالعه تولید باقی مانده نفت در جا را با مشکلاتی بیشتر، مواجه خواهد شد.

## ۵- تشکر و قدردانی

این مطالعه با همکاری تیم ذخیره سازی گاز طبیعی دانشگاه شیراز صورت پذیرفته است لذا از همه کسانی که در انجام این امر همکاری نموده اند تقدیر و تشکر می شود. از آقایان دکتر مهدی اسکروچی، مهندس آرمین عبداللهی و مهندس مصطفی تک بند و خانم مهندس حدیثه باغویی جهت مشاوره های ارزشمند در انجام هر چه بهتر این مطالعه نهایت تشکر را داریم.

## مراجع:

[1] علی شاه محمد، بررسی مکانیزم های تولید درمخازن شکافدار طبیعی، اکتشاف و تولید نشریه فنی و تخصصی شرکت ملی نفت ایران، شماره ۳۶ .

[2] Ertekin T., King, G., & Schwerer, F., Dynamic as slippage: A Unique dual mechanism approach to the flow of gas in tight formations, SPE Paper 2045, pp. 43, 1986.

[3] Ayala L.F., Compositional modeling of naturally-fractured reservoirs in multi-mechanistic flow domains, PhD dissertation. Penn. State U., University Park, Pennsylvania, 2005.

[4] Warren R.B. & Root P.J, The Behavior of naturally fractured reservoirs, SPE Journal, pp. 245-255, Trans. AIME, V. 234, 1963.

[5] ابوالقاسم کاظمی نیاکرانی ، شهاب گرامی، سیروس قطبی و عبدالنبی هاشمی، مدلسازی ترکیبی پدیده نفوذ ملکولی در تزریق گاز طبیعی به مخازن گازی و گاز میعانی شکاف دار کم تراوا - مدل تک بلوکی، پژوهش نفت، شماره ۶۵، صفحه ۳-۱۷، ۱۳۹۰.

[6] Yang, D., Gu, Y., "Determination of diffusion coefficients and interface mass transfer coefficients of the crude oil-CO<sub>2</sub> system by analysis of the dynamic and equilibrium interfacial tensions". Industrial and Chemical Research Journal, Vol.

# Investigating the Impact of Molecular Diffusion in Natural Gas Storage Process in an Iranian Depleted Fractured Oil Reservoir

Yousef Kazemzadeh<sup>1</sup>, Masoud Riazi<sup>2\*</sup>

1- Shiraz University, school of chemical, petroleum and gas engineering,  
MSc student of petroleum engineering department

2- Shiraz University, school of chemical, petroleum and gas engineering,  
Assistant Professor of petroleum engineering department

\*mriazi@shirazu.ac.ir

## Abstract

Iranian oil reservoirs are mainly fractured. Performance of such reservoirs could be significantly different from the conventional reservoirs. That is mainly due to some additional flow displacement mechanisms, which take place in fractured reservoir. One of these mechanisms is molecular diffusion, which could play a key role on oil production. The impact of molecular diffusion on flow displacement during gas injection for either displacement or storage purposes would be more pronounced in a fractured reservoir compared to that in a conventional reservoir. It is mainly because of different oil trapping types and huge difference between contact area of the in situ oil and the injected gas phase in these two kinds of reservoir.

In this study, the process of natural gas storage in an Iranian heavy oil fractured reservoir is investigated. In this paper, specifically the impact of molecular diffusion on the primary oil production and different stages of gas storage process are studied using a commercial simulator. The results of this study show that molecular diffusion could play an important role on injection/production rates as well as the average reservoir pressure during injection process. This impact would be more pronounced when a gas with different composition compared to that in the reservoir is used for storage purposes.

**Keywords:** molecular diffusion, fractured reservoir, natural gas storage, simulation, depleted oil reservoir.

